

Парадигма развития науки

А. Е. Кононюк

**Основы фундаментальной
теории искусственного
интеллекта**

Книга 5

**Интеллектуальные сенсоры как
органы чувств систем
искусственного интеллекта**

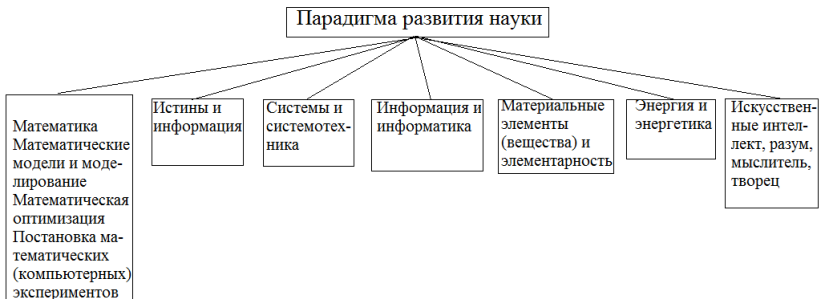
**Киев
«Освіта України»
2017**



Кононюк Анатолий Ефимович



Структурная схема парадигмы развития науки



УДК 51 (075.8)

ББК В161.я7

К65

Рецензент:

Н.К.Печурин - д-р техн. наук, проф. (Национальный авиационный университет).

Кононюк А. Е.

К213 Основы фундаментальной теория искусственного интеллекта. — В 20-и кн. Кн.5. — К.:Освіта України. 2017. 844с.

ISBN 978-966-373-693-8 (многотомное издание)

ISBN 978-966-373-694-13 (книга 5)

Многотомная работа посвящена систематическому изложению общих формализмов, математических моделей и алгоритмических методов, которые могут быть используемых при моделировании и исследованиях математических моделей объектов искусственного интеллекта.

Развиваются представления и методы решения, основанные на теориях эвристического поиска и автоматическом доказательстве теорем, а также процедуральные методы, базирующиеся на классе проблемно-ориентированных языков, сочетающих свойства языков программирования и автоматических решателей задач отображения искусственного интеллекта различными математическими средствами.

В работе излагаются основы теории отображения искусственного интеллекта такими математическими средствами как: множества, отношения, поверхности, пространства, алгебраические системы, матрицы, графы, математическая логика и др.

Для бакалавров, специалистов, магистров, аспирантов, докторантов всех специальностей.

УДК 51 (075.8)

ББК В161.я7

ISBN 978-966-373-693-8 (многотомное издание)

ISBN 978-966-373-694-13 (книга 5)

© Кононюк А. Е., 2017

© Освіта України, 2017

Оглавление

Введение.....	10
1. Органы чувств человека и сенсоры	10
1.1. Рецепторы.....	10
1.2. Классификация рецепторов.....	12
1.3. Возбудимость рецепторов.....	13
1.4. Адаптация рецепторов.....	15
1.5. Кодирование информации в нервной системе	17
1.6. Болевые рецепторы.....	20
1.7. Висцерорецепторы	25
1.8. Терморецепторы.....	28
1.9. Характеристика кожного анализатора.....	31
1.10. Тактильные рецепторы	33
1.11. Проприорецепторы.....	36
1.12. Рецепторы вестибулярного аппарата.....	43
1.13. Обонятельные рецепторы.....	48
1.14. Вкусовые рецепторы.....	52
1.15. Зрительная рецепция.....	55
2. Сенсоры как искусственные органы чувств.....	60
2.1. Введение.....	60
2.2. Уточнение понятия "сенсор"	62
2.3. Простые сенсоры	64
2.4. Активные и пассивные сенсоры.....	68
2.5. Сенсорно-компьютерные системы.....	70
2.6. Интеллектуальные сенсоры	74
2.7. Классификация интеллектуальных сенсоров.....	77
2.8. Виды механических сенсоров.	82
2.9. Представление о микросистемных технологиях.....	84
2.10. Деформационные чувствительные элементы.....	87
2.11. Деформационные интеллектуальные сенсоры.....	95
3. Механические сенсоры перемещения. Принципы работы глобальной системы ориентирования и сенсоры GPS.....	101
3.1. Механические сенсоры перемещения	101
3.2. Принципы работы глобальной системы ориентирования	103
3.3. Сенсоры GPS.....	106
3.4. Сенсоры линейного перемещения.....	111
3.5. Сенсоры углового перемещения.....	115
4. Акселерометры и гироскопы.	130
4.1. Линейные акселерометры	130
4.2. Угловые акселерометры.....	133

4.3. Промышленные акселерометры и их "интеллектуальное расширение".....	134
4.4. Гироскопы.....	137
4.5. Микромеханические гироскопы-акселерометры.....	140
4.6. Вибрационные сенсоры.....	143
4.7. Кантилеверы.....	144
4.8. Виброанализаторы.....	147
4.9. Хроматографические сенсоры.....	149
5. Физические основы работы акустических сенсоров. Приемники акустических сигналов.....	157
5.1. Физические основы работы акустических сенсоров.....	157
5.2. Приемники акустических сигналов.....	160
5.3. Некоторые интеллектуальные акустические сенсоры.....	170
6. Активные акустические сенсоры: тонометры, эхолоты, гидролокаторы.....	181
6.1. Тонометры.....	181
6.2. Гидролокаторы.....	189
6.3. Рыбопоисковые эхолоты.....	198
7. Интеллектуальные акустические сенсоры для УЗИ. Сенсоры для сейсморазведки. Сенсоры на ПАВ.....	209
7.1. УЗ-сенсоры расстояния.....	209
7.2. Интеллектуальные портативные сенсоры для УЗ исследований.....	214
7.3. Интеллектуальные портативные сенсоры для сейсморазведки.....	220
7.4. Сенсоры на поверхностных акустических волнах.....	225
8. Физические основы работы и классификация электрических сенсоров.....	237
8.1. Физические основы работы электрических сенсоров.....	237
8.2. Резистивные сенсоры.....	239
8.3. Емкостные и импедансные сенсоры.....	251
9. Вольтаические сенсоры. Сенсоры на диодах и биполярных транзисторах.....	258
9.1. Вольтаические сенсоры.....	258
9.2. Сенсоры на диодах и биполярных транзисторах.....	265
10. Сенсоры на полевых транзисторах и на приборах с отрицательной ВАХ. Газоразрядные сенсоры.....	275
10.1. Сенсоры на полевых транзисторах.....	275
10.2. Сенсоры на элементах с отрицательной ВАХ.....	287
10.3. Газоразрядные сенсоры.....	291
11. Цифровые фотоаппараты и видеокамеры, тепловизоры, дактилоскопические сенсоры.....	295
11.1. Цифровые фотоаппараты.....	295
11.2. Цифровые видеокамеры.....	298

11.3. Камеры видеонаблюдения.....	300
11.4. Тепловизоры.....	312
11.5. Дактилоскопические сенсоры.....	320
12. Магнитные сенсоры. Сенсоры на сквидах. Индуктивные сенсоры.....	329
12.1. Необходимые сведения из физики.....	329
12.2. Магнитные сенсоры.....	334
12.3. Сверхчувствительные магнитные сенсоры на сквидах.....	339
12.4. Индуктивные сенсоры.....	348
13. Радиосенсоры и радиолокаторы.....	355
13.1. Радиоприемники.....	355
13.2. Мобильные телефоны.....	364
13.3. Радиосенсоры "Bluetooth".....	370
13.4. Радиолокаторы.....	374
14. Радиотелевизионные сенсоры.....	387
14.1. Тюнеры.....	387
14.2. ТВ ресиверы.....	395
14.3. Мобильные телефоны 3-4-го поколения.....	400
14.4. Компьютерные кабельные модемы.....	405
15. Принципы работы электрохимических сенсоров. Потенциометрические сенсоры.....	409
15.1. Принцип работы электрохимического элемента.....	409
15.2. Классификация электрохимических сенсоров.....	413
15.3. Селективность электрохимических сенсоров.....	414
15.4. Потенциометрические электрохимические сенсоры.....	416
16. Химически чувствительные полевые транзисторы и биосенсоры на их основе.....	428
16.1. Электрохимические биосенсоры.....	429
16.2. Химически чувствительный полевой транзистор.....	430
16.3. Кондуктометрические и импедансные сенсоры.....	433
16.4. Амперометрические и кулонометрические сенсоры.....	438
17. Вольтамперометрические и хроноамперометрические сенсоры.....	448
17.1. Вольтамперометрические сенсоры.....	448
17.2. Хроноамперометрические сенсоры.....	451
17.3. Примеры интеллектуальных электрохимических сенсоров.....	454
18. Спектрофотометрические сенсоры как один из видов оптических сенсоров. Фотоплетизмографы. Оксиметры и пульсоксиметры.....	474
18.1. Спектрофотометрические сенсоры как один из видов оптических сенсоров.....	474
18.2. Фотоплетизмографы.....	481
18.3. Оксиметры и пульсоксиметры.....	490

19. Спектрофотометрия в обратно рассеянном свете. Гемоглобиномеры и сенсоры кровенаполнения.....	500
19.1. Анализ трудностей, возникающих при реализации неинвазивных спектрофотометрических сенсоров.....	500
19.2. Спектрофотометрия в обратно рассеянном свете.....	504
19.3. Неинвазивные гемоглобиномеры.....	514
19.4. Неинвазивный сенсор кровенаполнения.....	525
19.5. Интеллектуальный сенсор для неинвазивного исследования микроциркуляторного русла системы кровообращения.....	526
20. Неинвазивные глюкометры. Спектрофотометрический сенсор хлорофилла.....	533
20.1. Неинвазивные глюкометры.....	533
20.2. Сенсор для измерения хлорофилла в листьях растений.....	545
21. Теоретические основы работы люминесцентных сенсоров.....	554
21.1. Общие сведения о люминесценции.....	554
21.2. Теоретические основы метода индукции флуоресценции хлорофилла.....	555
21.3. Хронофлуорометры.....	563
21.4. Обзор выпускаемых марок хронофлуорометров.....	574
22. Сенсоры с люминесцентными маркерами.....	583
22.1. Сенсор для определения квантового выхода фотосинтеза.....	583
22.2. Сенсоры с люминесцентными "маркерами".....	586
22.3. Биолюминесцентные сенсоры.....	590
22.4. Сцинтилляционные сенсоры.....	594
23. Принципы работы ППР-сенсоров.....	605
23.1. Поверхностный плазмонный резонанс и его применение для построения сенсоров.....	605
23.2. Анализ оптоэлектронных каналов ППР сенсоров с параллельным и с расходящимся световым пучком.....	611
23.3. Промышленные ППР сенсоры.....	616
24. ППР-сенсоры Spreeta.....	629
24.1. Микроэлектронные ППР сенсоры семейства Spreeta.....	629
24.2. Технология работы со съёмными рецепторными чипами.....	634
24.3. Пример использования ППР иммуносенсора для выявления заболевания коров на лейкоз.....	645
24.4. Волоконно-оптические ППР сенсоры.....	651
25. Элементная база интеллектуальных сенсоров. Часть 1.....	656
25.1. Электронные усилители.....	656
25.2. Шумы и борьба с ними.....	666
25.3. Аналого-цифровые преобразователи.....	669
25.4. Микрокомпьютеры.....	670
26. Элементная база интеллектуальных сенсоров. Часть 2.....	680

26.1. Жидкокристаллические индикаторы.....	680
26.2. Клавиатура.....	685
26.3. Сенсорные экраны.....	687
26.4. Внутренняя память интеллектуальных сенсоров.....	689
26.5. Внешний интерфейс.....	693
26.6. Питание портативных интеллектуальных сенсоров.....	700
27. Селекция полезных сигналов.	703
27.1. Обзор способов селекции полезных сигналов.....	703
27.2. Проектирование интеллектуальных сенсоров.....	710
27.3. Программирование интеллектуальных сенсоров.....	718
28. Перспективы развития интеллектуальных сенсоров.....	728
28.1. Перспективы развития интеллектуальных сенсоров.....	728
28.2. Заключительные замечания.....	742
29. Методы распознавания тактильных образов.....	746
29.1. Бионический подход к проблеме разработки тактильного сенсора и тактильного распознавания пространственных образов...	746
29.2. Алгоритм тактильного распознавания.	759
29.3. Симбиотическая система распознавания образов.	767
Литература	771

Введение

На рубеже тысячелетий родилось новое поколение сенсоров, в состав которых входит микрокомпьютер. Их называют "интеллектуальными" сенсорами (ИС) за способность к глубокой и сложной обработке полученных сигналов, к учету нелинейностей и посторонних влияний, к извлечению из них ценной информации более высоких уровней, к рациональному изменению режимов работы в зависимости от обстоятельств, к самоконтролю и общению с компьютерной сетью. В работе описаны разные классы ИС, раскрыты методы и подходы к их разработке и проектированию. Показана значительная польза, приносимая ИС, и высказана мысль о том, что их создание является одним из признаков новой "информационной" стадии развития общества.

Эта работа – об устройствах, поставляющих объективную информацию об окружающем мире, о том, как добывается эта ценная информация. О том, как и благодаря чему сенсоры становятся "разумными", "интеллектуальными". Уточнены понятия "сенсор" и "интеллектуальный сенсор", описаны функциональные схемы простых и интеллектуальных сенсоров, приведена их классификация. Рассмотрены различные виды механических, акустических, электрических, электромагнитных, электрохимических и оптических простых и интеллектуальных сенсоров, объясняются физические принципы их действия. Приведены многочисленные примеры их применения. Изложены подходы к проектированию интеллектуальных сенсоров, даны практические рекомендации по разработке их программного обеспечения, раскрыты принципы построения и важнейшие технические характеристики их основных конструктивных узлов, описаны способы селекции полезных сигналов. Очерчены направления дальнейшего развития интеллектуальных сенсоров.

1. Органы чувств человека и сенсоры

1.1. Рецепторы

Центральная нервная система получает информацию о внешнем мире внутреннем состоянии организма от специализированных к восприятию раздражений *органов рецепции*. Многие органы рецепции называют органами чувств потому, что в результате их раздражения и поступления от них импульсов в большие полушария головного мозга

возникают ощущения, восприятия, представления, т. е. различные формы чувственного отражения внешнего мира.

Лишь благодаря информации, доставляемой органами рецепции, могут осуществляться как простые рефлексы, так и различные акты поведения и психическая деятельность. На это уже давно указывали философы и физиологи. И. М. Сеченов в своем классическом труде «Рефлексы головного мозга», писал, что «психический акт не может явиться в сознании без внешнего чувственного возбуждения».

Рецепторами являются воспринимающие раздражения нервные окончания или специализированные нервные клетки, реагирующие на определённые изменения в окружающей среде.

Импульсы от рецепторов по афферентным нервным волокнам поступают в центральную нервную систему. От первого рецепторного нейрона возбуждение переключается на второй, а затем и на третий нейроны (последний находится в таламусе) и доходит до коры больших полушарий головного мозга. Все звенья этой нейронной цепи имеют значение в анализе воспринимаемых раздражений. Высшие формы анализа осуществляются корой больших полушарий.

Всю совокупность нейронов, участвующих в восприятии раздражений при проведении возбуждений, а также сенсорные клетки коры больших полушарий головного мозга, И. П. Павлов считал единой системой, которую он обозначил термином «анализатор». **Рецепторы** — это **периферическое звено анализатора**. Афферентные нейроны и проводящие пути составляют проводниковый отдел анализатора. Участки коры больших полушарий мозга, воспринимающие возбуждение от рецепторов, представляют собой центральные концы анализаторов.

Существует множество рецепторных аппаратов, отличающихся по морфологической дифференцировке и физиологической специализации. Морфологическая дифференцировка рецепторов проявляется в различиях структуры и в том, что многие из **рецепторов** находятся в специализированных многоклеточных органах — органах рецепции, приспособлении к передаче раздражающих воздействий рецепторным клеткам или нервным окончаниям. Специализация рецепторов проявляется, во-первых, в их приспособлении к восприятию определенного вида раздражений — светового, звукового,

химического, механического, теплового, холодового и т. п. и, во-вторых, в их очень высокой возбудимости, т. е. в способности возбуждаться минимальным количеством энергии внешнего раздражения.

1.2. Классификация рецепторов

Рецепторы разделяют на две большие группы: внутренние и внешние.

Внутренние рецепторы — интерорецепторы — посылают импульсы, сигнализирующие о состоянии внутренних органов (висцерорецепторы) и о положении и движении тела и отдельных его частей в пространстве (вестибулорецепторы и проприорецепторы).

Внешние рецепторы — экстерорецепторы — сигнализируют о свойствах предметов и явлений окружающего мира и о воздействии их на организм.

У человека выделяют следующие рецепторы:

- внешние
 - зрительный
 - слуховой
 - тактильный
 - болевой
 - температурный
 - обонятельный
 - вкусовой
- внутренние
 - давления
 - кинетический
 - вестибулярный

Рецепторы могут быть классифицированы соответственно физической природе раздражителей, к которым они особо чувствительны. По такой классификации их разделяют: на фонорецепторы, фоторецепторы, механорецепторы, терморецепторы, хеморецепторы, барорецепторы.

Кроме того, возможно разделение органов рецепции соответственно характеру ощущений, возникающих при их раздражении. Согласно

этой психофизиологической **классификации**, мы различаем органы: **зрения, слуха, обоняния, вкуса, осязания, восприятия тепла и холода, положения тела и боли.**

Некоторые рецепторы способны воспринимать раздражения, исходящие от предметов, находящихся на значительном расстоянии от организма. Такие рецепторы называются *дистантными*. К их числу относятся зрительные, слуховые, обонятельные рецепторы.

Другие же рецепторы — *контактные* — способны воспринимать раздражения только от предметов которые непосредственно к ним приложены, т. е. находятся в близком соприкосновении с рецепторным аппаратом.

1.3. Возбудимость рецепторов

Рецепторы отличаются очень высокой **возбудимостью** по отношению к адекватным раздражениям, к восприятию которых они специально приспособлены. О возбудимости рецепторов судят по тому минимальному количеству энергии, которое необходимо для возникновения возбуждения т. е. по **порогу раздражения**.

Порог раздражения рецепторов к адекватным раздражениям ничтожно мал. Так, фоторецепторы могут возбуждаться единичными квантами света. Волосковые клетки кортиева органа реагируют при действии энергии звуковых колебаний, равной $1 \cdot 10^{-9}$ эрг/см²·сек.

Таким образом чувствительность ряда органов рецепции сравнима с чувствительностью наиболее совершенных современных физических приборов.

Рецепторы способны возбуждаться и при действии так называемых неадекватных раздражителей. Например, при действии на глаз электрического тока или механического раздражения (удара) возникает ощущение света (отсюда выражение: «искры из глаз посыпались»), а при действии этих же раздражителей на ухо возникает ощущение звука («в ушах зазвенело»). Однако при действии неадекватных раздражителей возбудимость рецепторов оказывается во много раз

меньше и для того, чтобы возникло, например, ощущение света при действии на глаз механического раздражителя, его сила должна быть в миллиарды раз больше той, которая требуется от адекватного раздражителя.

Возбудимость рецепторов непостоянна. Она может меняться при изменениях состояния непосредственно самих рецепторов, а также под влиянием импульсов из центральной нервной системы (из коры головного мозга и ретикулярной формации), изменяющих уровень чувствительности («настройку») рецепторных приборов.

Механизм возбуждения рецепторов

Под влиянием раздражения рецепторов в них возникают нервные импульсы, т. е. они как бы **трансформируют раздражение в возбуждение**. На этом основании **рецепторы нередко сравнивают с применяемыми в технике датчиками-преобразователями**, в которых при приложении внешних воздействий происходит генерирование электрического тока или напряжения, или изменение их электрических характеристик. Такое сравнение весьма условно. В отличие от процессов, возникающих в датчиках-преобразователях, работа которых происходит за счет воздействующей на них энергии, трансформирование энергии раздражения в процесс возбуждения в рецепторах происходит за счет обмена веществ самих рецепторов, а не за счет приложенной к ним внешней энергии.

Механизм возникновения возбуждения в рецепторах достаточно сложен.

Внешний стимул, действуя на рецептор, вызывает деполяризацию его поверхностной мембраны. Эту деполяризацию, сходную по свойствам *локальным ответом*, называют **рецепторным, или генераторным, потенциалом**. Рецепторный потенциал не подчиняется закону «все или ничего», зависит от силы раздражителя, способен суммироваться при применении быстро следующих друг за другом раздражителей и не распространяется вдоль нервного волокна.

Одной из отличительных особенностей рецепторного потенциала является его длительность: в некоторых рецепторах он может сохраняться неизменным в течение многих минут, пока действует раздражитель; в прессорецепторах каротидного синуса, реагирующих

на повышение артериального давления, зарегистрированы рецепторные потенциалы, длящиеся несколько часов. Поддержание столь длительной деполяризации мембраны связано с затратой энергии, освобождаемой в результате процессов обмена веществ; поэтому понятно, что вещества, нарушающие внутриклеточные окислительные процессы, приводят к исчезновению рецепторных потенциалов.

Имеются данные, что рецепторный потенциал возникает в результате освобождения в рецепторе под влиянием раздражения ацетилхолина, который изменяет проницаемость мембраны, что и приводит к ее деполяризации. Такой эффект наблюдали при введении ацетилхолина в область расположения рецепторов.

В фоторецепторах возникновение генераторного потенциала связано с реакцией разложения зрительного пурпура. Рецепторный потенциал может возникать в ряде рецепторов в результате непосредственного изменения свойств поверхностной мембраны под влиянием действующих на нее раздражений, без промежуточного химического звена.

Когда рецепторный потенциал достигает определенной—критически величины, он вызывает разряд афферентных импульсов в нервном волокне, связанном с рецептором. Этот разряд возникает в первом ближайшем к рецептору перехвате Ранвье. Новокаин, уничтожающий чувствительность рецепторов, не действует на рецепторный потенциал, но прекращает возникновение разряда афферентных импульсов в нервных волокнах.

1.4. Адаптация рецепторов

Общим свойством почти всех **рецепторов** является **адаптация**, т. е. приспособление к силе раздражителя. **Адаптация** проявляется в снижении чувствительности к постоянно действующему раздражителю. Субъективно адаптация проявляется в «привыкании» к действию постоянного раздражителя — запаха, шума, давления одежды и т. д.

Войдя в помещение, в котором курили, человек сразу ощущает запах табака, по пребывании в этом помещении несколько минут, он перестает ощущать этот запах. Точно так же человек «не замечает»

давления одежды на кожу или привычного шума. Выйдя из темного помещения, человек «слепнет» от действия яркого солнечного света, но через небольшой промежуток времени глаз адаптируется к действию света и зрение восстанавливается.

При адаптации снижается величина генераторного потенциала и частота импульсов, проходящих по афферентному нерву. Это показано опытами Э. Эдриана, который производил запись электрической активности афферентных волокон, отходящих от рецепторов кожи. Как показывает *рис. 1*, раздражение кожи острием иглы ведет к появлению нервных пульсов в афферентных волокнах, частота которых постепенно уменьшается, несмотря на то что сила действующего на рецепторы раздражителя не изменяется.

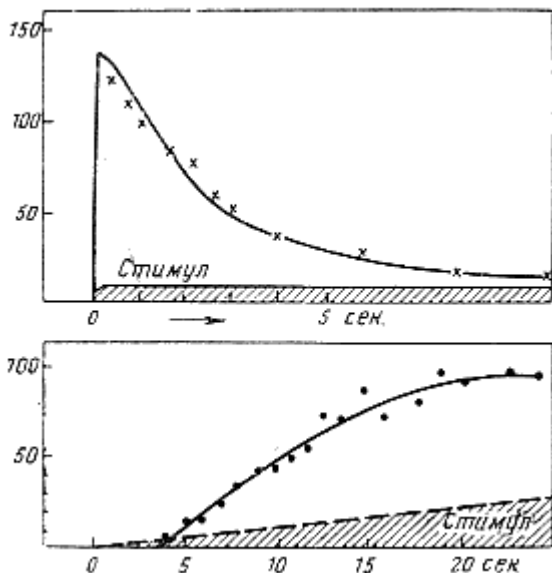


Рис. 1. Изменение частоты импульсов, возникающих в рецепторах кожи при раздражении их острием иглы (по Э. Эдрнану).

Способностью к **адаптации** обладают в той или иной мере почти все **рецепторы**. Исключение составляют вестибуло- и проприорецепторы.

Когда действие постоянного раздражителя прекращается, возникающая под его влиянием адаптация постепенно исчезает и чувствительность рецепторов повышается. Такова причина повышения чувствительности рецепторов внутреннего уха к неслышимым до того звукам, когда прекращается грохот и шум в помещении, в котором находился человек. Такова же причина повышения чувствительности рецепторов глаза при переходе из яркого освещенного помещения в темное (это явление не совсем удачно называют «темповой адаптацией»).

Механизмы адаптации органов чувств весьма сложны. В их протекании имеют значение не только процессы, происходящие в рецепторах, но и изменения состояния нервных центров, к которым поступают импульсы от данного и других цепторов.

Важное участие в процессах «настройки» уровня возбудимости всех отделов анализаторов принимает, как было показано Л. А. Орбели и его сотрудниками, симпатическая нервная тема (адаптационно-трофическое явление симпатической нервной системы), а также, как показано в недавнее время, ретикулярная формация мозга.

Р. Гранитом открыты специальные и нервные волокна (гамма-эфференты), которые проводят импульсы, меняющие возбудимость проприорецептивных приборов—мышечных веретен. Ж. Десмет обнаружил, что афферентный пучок нервных волокон, идущий от ретикулярной формации к улитке (пучок Расмуссена), несет импульсы, изменяющие чувствительность кортиева органа действию звуков.

Чувствительность органа может изменяться еще и в зависимости от количества функционирующих рецепторов. Это явление названо П. Г. Снякиным функциональной мобильностью рецепторов.

Верхний рисунок — положение иглы, воткнутой в кожу, не меняется. Быстро наступает адаптация и частота импульсов уменьшается. Нижний рисунок — игла медленно погружается в кожу. Адаптация не наступает и частота нервных импульсов нарастает. На ординате отмечена частота импульсов в секунду.

1.5. Кодирование информации в нервной системе

Раздражения, действующие на рецепторы, являются источниками

информации для организма о бесконечном разнообразии изменений, происходящих во внешней среде и в его внутреннем состоянии. Получаемая рецептором информация передается затем в центральную нервную систему, где она перерабатывается и анализируется. **Передача осуществляется по афферентным нервным волокнам в форме потоков нервных импульсов.** Воспринимают ли органы чувств свет или звук, химические или механические воздействия, тепло или холод, информация о них поступает в центральную нервную систему в виде **однородных сигналов.**

Естественно возникает вопрос: каким образом информация, получаемая организмом, «закодирована», «зашифрована» в кажущемся монотонным единообразием нервных импульсов? Достижения электрофизиологии, развитие техники связи и разработка теории информации приблизили к пониманию этого теоретически и практически важного вопроса.

Электрофизиологический анализ сигналов, поступающих в центральную нервную систему по одному афферентному волокну от рецептора, показывает, что информация о действующих раздражениях передается в виде отдельных групп импульсов — **«залпов»**. Амплитуда и длительность отдельных импульсов, проходящих по одному и тому же волокну, одинаковы, а частота и число импульсов в залпе могут быть различны. Отсюда следует, что в течение каждого малого интервала времени нервное волокно или передает импульс или не передает его, т. е. находится в одном из двух состояний: возбужденном или невозбужденном. На этом основании выдвигается предположение, что передача импульсов по нервному волокну осуществляется по двоичному коду: наличие импульса — отсутствие импульса.

Кодированием информации в нервной системе называется преобразование информации в условную форму — код. Двоичный код в виде различных комбинаций двух цифр — 0 и 1, применяется при вводе информации в электронную цифровую вычислительную машину. Он дает возможность ввести в машину очень большое количество информации о самых различных явлениях и событиях.

Объем информации, могущей быть переданной за единицу

времени, определяется количеством двоичных единиц, или бит.

Зная количество импульсов, которое может передать отдельное нервное волокно в секунду, можно измерить емкость отдельного канала передачи информации. Если нервное волокно воспроизводит 100 имп/сек, то это означает, что за каждую 0,01 секунды успевает пройти 1 двоичная единица информации (1 импульс и одна пауза, отделяющая его от следующего импульса); следовательно, отдельное нервное волокно в данном случае передает в 1 секунду 100 бит информации. Учитывая разную группировку импульсов в залпе, зависящую от характера раздражения и свойств рецептора, даже одно нервное волокно может дать широкую возможность различения свойств раздражителя, действовавшего на рецептор.

Различение характера сигналов достигается в некоторой мере уже в периферических рецепторах, вследствие того что они «настроены» на восприятие лишь строго определенных сигналов, которые для них являются адекватными и по отношению к которым они особо чувствительны. В некоторых органах чувств, например в глазу, имеются рецепторы, различно реагирующие на действие и на прекращение действия раздражителя (рис.2).

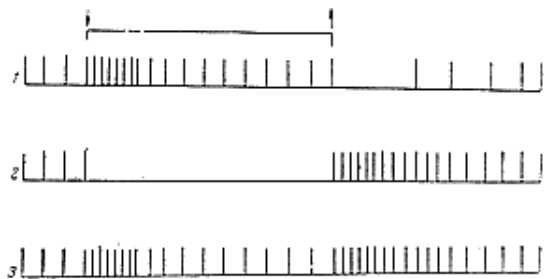


Рис.2. Фоновая импульсация и реакция на освещение в трех разных волокнах зрительного нерва. Схема (по Р. Граниту). Стрелками отмечено включение и выключение света.

1 —рецептор реагирует на включение света; 2—рецептор реагирует на выключение света; 3 — рецептор реагирует и на включение и выключение света. До и после начала реакции наблюдается фоновая импульсация.

Одни рецепторы возбуждаются только в самом начале раздражения (рецепторы, реагирующие на «включение» раздражителя), другие — в момент прекращения раздражения (рецепторы, реагирующие «выключение» раздражителя), третьи — и в начале и в конце раздражения (рецепторы, реагирующие и на «включение» и на «выключение»). Существуют рецепторы, которые служат источником непрерывной («фоновой») импульсации, дающей информацию о состоянии готовности к работе органов (об их тонусе) и состоянии организма. Они могут реагировать учащением или, напротив, урежением и прекращением импульсации при отсутствии раздражителей.

В зависимости от силы раздражителя, действующего на орган чувств, возбуждается большее или меньшее число рецепторов, импульсы от которых передаются по разному числу эфферентных нервных волокон. Так как разные рецепторы в пределах одного и того же органа чувств или рецепторного поля рефлекса могут отличаться по своей возбудимости, то при слабом раздражении оказываются возбужденными только наиболее возбудимые; при сильном раздражении возбуждаются и те рецепторы, возбудимость которых низка. К этому надо добавить, что пространственное расположение — топография — возбужденных рецепторов может быть весьма различным в зависимости от того, какая совокупность раздражений действует.

Так, при рассматривании двух разных пейзажей или при прослушивании двух разных музыкальных произведений возбуждаются разные группы рецепторов и залпы нервных импульсов, отличающиеся по частоте и числу, поступают в центральную нервную систему по-разному афферентным волокнам. Эти импульсы, возбуждая множество по-разному локализованных нейронов, являются для них источником чрезвычайно обширной информации. Вся она анализируется центральной нервной системой и ее высшим отделом — корой больших полушарий.

1.6. Болевые рецепторы

В отличие от всех других рецепторов рецепторы **болевые рецепторы** не имеют какого-либо адекватного раздражителя. Болевые, или ноцицептивные, ощущения могут возникать при действии любых раздражений чрезмерной силы. Так как такие

раздражения вызывают повреждения тканей, то возникающие под их влиянием болевые ощущения имеют важное биологическое значение. Они сигнализируют организму об опасности и вызывают оборонительные рефлексы, направленные на устранение раздражения, вызывающего боль. Именно поэтому свыше 200 лет назад французский философ Вольтер писал, что боль «является верным стражем среди всех наших опасностей; боль громко и непрерывно твердит нам: будьте осторожны, берегите, сохраняйте вашу жизнь».

Болевые ощущения нередко бывают одним из первых, а иногда и единственным проявлением заболевания, позволяющим врачу поставить диагноз, определить тяжесть болезни и необходимые лечебные мероприятия. Однако не всегда имеется соответствие между тяжестью заболевания и интенсивностью ощущений боли. Часто серьезные поражения внутренних органов не сопровождаются болевыми ощущениями и, напротив, нередко сильнейшие болевые ощущения возникают при совершенно ничтожных и не опасных поражениях и являются главной причиной страдания.

Рецепторные аппараты, воспринимающие боль

Вопрос о том, какими нервными структурами воспринимается боль, еще не решен. Одни исследователи считают, что для восприятия боли не существует особых **болевых рецепторов**, так как чрезмерное раздражение любых рецепторов и нервных стволов способно вызвать чувство боли. Другие считают, что болевые раздражения воспринимаются свободными окончаниями «болевых» нервных волокон.

Главными доказательствами второй точки зрения служат следующие факты.

1. Существует состояние, называемое анальгезией, при котором отсутствует боль, но сохранено чувство прикосновения (оно возникает при легком наркозе, а также при некоторых заболеваниях спинного мозга) тогда разрез кожи ощущается как прикосновение и давление, но не как боль.
2. На коже имеются особые болевые точки: если колоть очень

тонкой иглой различные участки кожи, то можно попасть в точки, при уколе которых боль возникает сразу, без предварительного чувства прикосновения. На середине роговой оболочки глаза нет осязательных точек, но имеются болевые; гистологические исследования показали, что там разветвляются только голые веточки чувствительных нервов без всяких специфических осязательных телец.

3. После перерезки и сшивания нерва в процессе регенерации нервных волокон сначала восстанавливается болевая чувствительность и лишь затем, через значительное время, остальные виды чувствительности. При восстановлении только болевой чувствительности любое раздражение кожи — прикосновение, поглаживание, давление — вызывает нередко ощущение нестерпимой боли. При восстановлении других видов чувствительности (тактильной, тепловой, холодной) чрезмерные болевые ощущения исчезают и болевые чувства приобретают обычный характер. Существенно, что такая последовательность восстановления ощущений после повреждения нерва соответствует определенным морфологическим этапам регенерации поврежденных нервных стволов и рецепторов. На ранних этапах регенерации нервных волокон они не имеют миелиновой оболочки и представляют собой свободные нервные окончания (голые осевые цилиндры). Именно в это время любое раздражение воспринимается как боль. По мере появления миелиновой оболочки и восстановления структуры рецепторов возникает и обычная чувствительность кожи, а чрезмерные болевые ощущения исчезают.

Волокна, проводящие болевые импульсы

Электрофизиологические исследования афферентной импульсации нервных стволов и волокон при болевых раздражениях показали, что импульсы, вызывающие ощущение боли, проводятся афферентными волокнами двух типов. Одни из них относятся к группе $A\delta$, это тонкие миелиновые волокна, со скоростью проведения возбуждения 5—15 м/сек. Другие — тонкие безмиелиновые волокна, относящиеся к группе C , со скоростью проведения возбуждения 1—2 м/сек. Соответственно различной скорости распространения болевых импульсов, а значит и

различному времени поступления их в центральную нервную систему, болевые раздражения вызывают как бы двойное ощущение — вначале мимолетное, точно локализованное, но не очень сильное, которое сменяется разлитым «тупым», субъективно весьма неприятным, сильным болевым ощущением.

Существует предположение, что чувство боли возникает в тех случаях, когда появляются синхронные нервные разряды одновременно в очень большом числе афферентных волокон. Это предположение помогает понять тот факт, что при регенерации нервных волокон, когда миелиновая оболочка еще не сформировалась, любое раздражение кожных рецепторов воспринимается как болевое. Отсутствие миелиновой оболочки облегчает вовлечение в процесс возбуждения одновременно большого количества нервных волокон.

Адаптация болевых рецепторов

Адаптация **болевых рецепторов** может быть обнаружена следующим опытом: если в кожу вколоть иглу и не смещать ее, то возникающие от укола нервные импульсы и ощущение боли прекращаются. Они появляются вновь при всяком движении, так как при этом происходит смещение или раздражение новых неадаптировавшихся болевых рецепторов.

Болевые рефлексy

Болевые раздражения вызывают многообразные рефлекторные реакции. Характерной их особенностью является то, что в осуществление рефлекторного акта вовлекаются многие органы тела.

При болевых рефлексax наблюдаются: повышение мышечного тонуса, учащение сердечной деятельности и дыхания, сужение сосудов, повышение артериального давления, уменьшение мочеотделения и секреции пищеварительных соков, увеличение потоотделения, торможение моторной деятельности кишечника, повышение содержания сахара в крови и увеличенный распад гликогена, сужение зрачков и ряд других явлений. Многие из перечисленных реакций являются следствием возбуждения симпатической нервной системы и усиленной секреции адреналина

и гормонов задней доли гипофиза. Увеличена также секреция кортикостероидов. Все перечисленные вегетативные компоненты болевых рефлексов имеют значение в мобилизации сил организма, что необходимо в жизнеопасных ситуациях, когда происходит повреждение тканей, вызывающее болевые ощущения.

Определение локализации болевых раздражений и отраженные боли

Человек хорошо определяет болезненные участки на поверхности кожи. Вместе с тем способность локализовать место болевого раздражения при болях во внутренних органах часто недостаточно отчетливо выражена. При заболеваниях внутренних органов боль может ощущаться не в месте заболевания, а в других частях тела, например на поверхности кожи. Такие боли называются отраженными.

Примером могут служить боли во время приступа грудной жабы, т. е. при спазме венечных сосудов сердца, когда возникают болевые ощущения не только в области сердца, но нередко в левой руке и лопатке, в левой половине шеи и головы. Эти отражённые болевые ощущения могут быть гораздо сильнее, чем боли в области сердца. При заболеваниях других внутренних органов также наблюдаются отраженные в определенных участках кожи. Тот кожный участок, в котором возникают боли при поражении определенного внутреннего органа, называют зоной Захарьина—Геда.

Ощущения боли, возникающие при раздражении кожи, характеризуются более совершенной локализацией, по-видимому, оттого, что одновременно с болевыми точками кожи раздражаются и тактильные рецепторы, раздражение которых человек точно локализует.

Зуд

Своеобразным неприятным ощущением, возникающим при раздражении рецепторов кожи, является зуд, который вызывает рефлекторную реакцию почесывания кожи. Ощущение зуда связывают с болевыми рецепторами, расположенными под эпидермисом. О роли именно болевых рецепторов свидетельствует тот факт, что потери тактильной чувствительности не

сопровождается исчезновением зуда, а потеря болевой чувствительности под влиянием местных обезболивающих (например, кокаина) прекращает зуд.

Рецепторами, при раздражении которых возникает зуд, являются свободные нервные окончания, расположенные под эпидермисом, и связанные с тонкими безмякотными нервными волокнами.

В происхождении зуда имеет значение образование в коже некоторых химических соединений, раздражающих рецепторы. К числу таких веществ некоторые исследователи относят гистамин, подкожное введение которого в очень малой дозе вызывает резкий зуд, сопровождающийся расширением капилляров и образованием волдыря. Еще более активны, чем гистамин, некоторые пептидазы—ферменты, расщепляющие полипептиды. При внутрикожном их введении в ничтожных количествах они вызывают нестерпимый зуд. Действие этих веществ считается специфичным, так как под их влиянием появляется зуд и нет никаких признаков расширения капилляров, воспаления волдыря.

1.7. Висцерорецепторы

Рефлекторная регуляция внутренних органов и сосудов осуществляется при участии находящихся в них рецепторов, воспринимающих тончайшие изменения внутренней среды и являющихся источником афферентных импульсов, ведущих к возникновению рефлекторных реакций.

На возможное значение этих рецепторов указывал еще И. М. Сеченов, который подчеркивал роль чувствительности внутренних органов в регуляции поведения и психического состояния человека.

Рецепторы, расположенные во внутренних органах и в кровеносных судах, принадлежащие к интерорецепторам, называются **висцерорецепторами**. Они очень широко представлены в организме.

Для исследования **висцерорецепторов** в опытах на животных

изучают рефлекторные реакции, возникающие при их раздражении, и регистрируют биоэлектрические потенциалы в афферентных нервных волокнах и в центральной нервной системе.

Важное значение имеет для изучения рецепторов внутренних органов использованная В. Н. Черниговским с сотрудниками методика изолированной перфузии органов, сохранивших неповрежденные афферентные и эфферентные нервные связи с центральной нервной системой. Введение в изолированное сосудистое русло некоторых веществ, изменение температуры или давления раствора Рингера-Локка, пропускаемого через сосуды органа, вызывают рефлекторные изменения дыхания, кровообращения и других функций. В этих опытах принимаются меры к тому, чтобы перфузирующий раствор не попадал в общий кровоток и, таким образом, исключают гуморальное его действие на организм. О рефлекторной природе исследуемых реакций судят в том случае, если они исчезают после перерезки нервов, подходящих к перфузируемому органу.

Для исследования интерорецепции К. М. Быков с сотрудниками применил метод выработки условных рефлексов на раздражение внутренних ганглиев. В его опытах висцерорецептивное раздражение сопровождалось каким-либо безусловным раздражителем и становилось сигналом условного рефлекса. Подобные опыты доказали связь внутренних органов с корой больших полушарий мозга, как с высшим центром регуляции функций организма.

Всеми этими методами показано, что рецепторы внутренних органов обладают сложной и тонкой чувствительностью и специфически реагируют очень многие воздействия.

Адекватными раздражителями одних **висцерорецепторов** являются изменения давления, других - механические раздражения, третьих — химические агенты, циркулирующие в крови или образующиеся в результате обмена веществ в органах, четвертых - изменения температуры. Это означает, что во внутренних органах и сосудах имеются **прессо-, механо, хемо- и терморепторы**.

Физиологическая роль висцерорецепторов в основном заключается в регуляции работы внутренних органов; благодаря висцерорецептивным импульсам осуществляется рефлекторная

связь между органами. Типичными висцерорецептивными рефлексами являются: рефлекс Геринга и Брейера, осуществляющий саморегуляцию дыхательного акта; рефлексы с прессо- и хеморецепторов, расположенных в каротидном синусе и каротидном тельце, рефлекторное выделение желудочного сока, рефлекторные акты мочеиспускания и дефекации, рефлекторный кашель, рефлекторная рвота и др.

Раздражения некоторых висцерорецепторов могут вызывать те или иные осознаваемые ощущения. Например, при раздражении висцерорецепторов мочевого пузыря и прямой кишки при растяжении их стенок возникают характерные ощущения позыва к мочеиспусканию и дефекации. Висцерорецептивные импульсы имеют значение в возникновении некоторых ощущений, отражающих состояние организма как целого; таковы ощущения голода и жажды.

Раздражения висцерорецепторов многих внутренних органов (сердца, почек, селезенки, матки и др.), а также сосудов обычно не вызывают осознаваемых ощущений. Однако при некоторых патологических процессах импульсы, поступающие от интерорецепторов, могут широко иррадиировать в центральной нервной и вызывать неопределенные «смутные» ощущения, часто сопровождаемые болями.

Резко выраженной чувствительностью отличаются серозные оболочки полостей тела. Раздражение их (при операции, ранении или воспалительном процессе) весьма болезненно.

На основании экспериментов с образованием условных рефлексов можно полагать, что висцерорецептивные импульсы имеют значение в сложных актах поведения. Влиянием этих импульсов объясняется то, что изменения состояния внутренних органов при их заболеваниях сопровождаются нередко переменной настроенности, самочувствия и поведения больного.

1.8. Терморецепторы

Информация о температуре окружающей среды необходима для процессов регулирования температуры тела. Она воспринимается **терморецепторами**, расположенными в коже, а также на роговой оболочке глаза и в слизистых оболочках.

Терморецепторы делятся на 2 группы:

1) *воспринимающие холод* и 2) *воспринимающие тепло*. Вопрос о том, какие именно рецепторы принимают температурные раздражения, недостаточно ясен. На основании гистологических исследований участков кожи, особо чувствительных к холоду или теплу, считают, что тепловыми рецепторами являются тельца Руффини, а холодowymi — колбочки Краузе (рис.3). Однако в некоторых участках кожи, воспринимающих холод или тепло, отсутствуют и колбочки Краузе и тельца Руффини. Поэтому полагают, что холодowymi и тепловыми рецепторами могут быть также голые окончания афферентных нервных волокон.

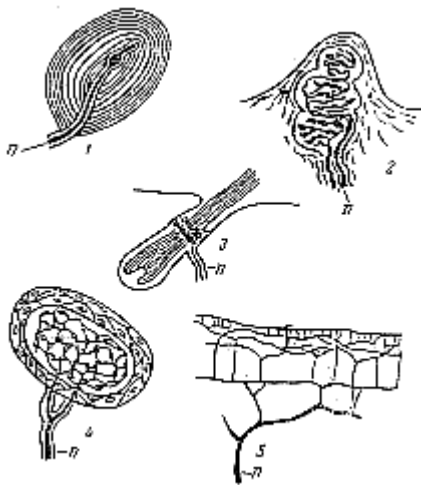


Рис.3. Различные виды рецепторов. 1 — пачиниево тельце; 2 — мейснерово тельце; 3 — нервное сплетение в волосяном мешочке; 4 — колбочка Краузе; 5 — нервное сплетение в роговой оболочке; n — нервное волокно.

Холодовые и тепловые рецепторы залегают на разной глубине: холодные - на глубине 0,17 мм, а тепловые - 0,3 мм от поверхности кожи. Этим объясняют то, что время реакции на холодные раздражения менее длительно, чем на тепловые.

Температурные рецепторы сосредоточены в определенных точках кожи. Локализацию соответствующих точек определяют путем прикосновения к разным участкам кожи холодным или нагретым острием.

Общее число точек холода на всей поверхности тела человека доходит приблизительно до 250 000, точек же тепла - только 30 000.

Температурные рецепторы могут быть возбуждены и неадекватными раздражителями. Так, холодные рецепторы могут быть возбуждены теплом. Этим, а также разной глубиной залегания холодных и тепловых рецепторов объясняют возникновение парадоксального ощущения холода при воздействии теплом. Например, если приложить к коже нагретую тонкую серебряную пластинку, то возникает ощущение холода. Вследствие незначительной теплоемкости пластинка повышает температуру только поверхностных слоев кожи, в связи с чем раздражаются исключительно рецепторы холода. Благодаря поверхностному расположению рецепторов холода раздражитель может отсутствовать только на них, не действуя на тепловые рецепторы. Парадоксальное ощущение холода возникает нередко у человека в первый момент погружения в горячую ванну.

Электрофизиологические исследования И.Цоттермана показали, что проводниками импульсов от температурных рецепторов являются тонкие миелиновые волокна. В определенном диапазоне температур и холодные и тепловые рецепторы дают постоянный разряд импульсов. Например, в опыте с регистрацией потенциалов действия в афферентном нервном волокне, идущем от холодного рецептора языка, обнаружено, что при 38° частота импульсов равна 5 в секунду. При температуре 30° частота импульсов равна 10—12 в секунду. При более низкой температуре частота импульсов уменьшается и при 10° поток афферентных импульсов от холодных рецепторов прекращается. В волокнах, идущих от тепловых рецепторов, частота импульсов равна 1,5-3,5 в секунду при температуре 37,5-40°.

По-видимому, постоянные разряды импульсов в температурных рецепторах имеют значение в терморегуляции. При быстром охлаждении кожи или поверхности языка на 2° (при переходе от 40 до 38°) частота импульсов в нервном волокне, идущем от холодного рецептора, может достигать $50\text{—}140$ имп/сек, затем она урежается (рис.4).

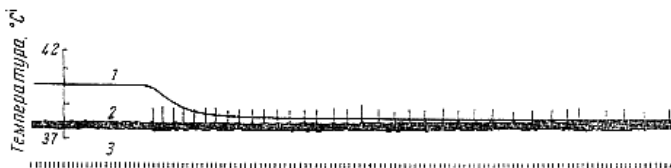


Рис.4. Импульсация в одиночных волокнах, идущих от холодных рецепторов языка при понижении температуры от 40 до 38° (по Г. Хензелу и И. Цоттерману).

1 — кривая температуры; 2 — запись потенциалов; 3 — отметка времени $0,02$ секунды.

При резком согревании в волокне, несущем импульсы от теплового рецептора, также возникают частые разряды импульсов, быстро вследствие адаптации урежающиеся и становящиеся нерегулярными. При прекращении согревания вновь появляются в тепловом рецепторе кратковременные частые разряды (эффект выключения).

Интенсивность температурных ощущений зависит от ряда условий, в частности, от места раздражения, от величины раздражаемой поверхности и от окружающей температуры.

Так, если рука была погружена в воду, нагретую до 27° , то ощущение холода возникает при переносе руки в воду, температура которой равна $24\text{—}25^{\circ}$. Если же рука находилась в воде, нагретой до 34° , то кажется холодной вода, нагретая до 31° (температурный контраст).

1.9. Характеристика кожного анализатора

Он обеспечивает восприятие прикосновения (слабого давления), боли, тепла, холода и вибрации. Для каждого из этих ощущений (кроме вибрации) в коже имеются специфические рецепторы либо их роль выполняют свободные нервные окончания. Каждый микроучасток кожи обладает наибольшей чувствительностью к тем раздражителям (сигналам), для которых на этом участке имеется наибольшая концентрация соответствующих рецепторов: болевых, температурных и тактильных. Так, плотность их размещения составляет: на тыльной части кисти - 188 болевых, 14 осязательных, 7 Холодовых и 0,5 тепловых на квадратный сантиметр поверхности; на грудной клетке соответственно - 196, 29,9 и 0,3. Воздействие в этих точках даже не специфическим, но достаточно сильным раздражителем независимо от его характера вызывает специфическое ощущение, обусловленное типом рецептора. Например, интенсивный тепловой луч, попадая в точку боли, вызывает ощущение боли.

Чувствительность к прикосновению. Это - ощущение, возникающее при действии на кожную поверхность различных механических раздражителей (прикосновение, давление), вызывающих деформацию кожи. Ощущение возникает только в момент деформации. Абсолютный порог тактильной чувствительности определяется по тому минимальному давлению предмета на кожную поверхность, которое производит едва заметное ощущение прикосновения. Наиболее высоко развита чувствительность на дистальных частях тела. Примерные пороги ощущений: для копчиков пальцев руки - 3 г/мм ; на тыльной стороне пальца - 5 г/мм , на тыльной стороне кисти - 12 г/мм ; на животе - 26 г/мм²; на пятке - 250 г/мм². Порог различения в среднем равен примерно 0,07 исходной величины давления.

Тактильный анализатор обладает высокой способностью к пространственной локализации. При последовательном воздействии одиночных раздражителей ошибка в локализации колеблется в пределах 2-8 мм. Характерной особенностью тактильного анализатора является быстрое развитие адаптации, т.е. исчезновение чувства прикосновения или давления. Время адаптации зависит от силы раздражителя и для различных участков

тела может изменяться в пределах 2-20 с.

При ритмичных последовательных прикосновениях к коже каждое из них воспринимается как отдельное, пока не будет достигнута критическая частота при которой ощущение последовательности прикосновений переходит в специфическое ощущение вибрации. В зависимости от условий и места раздражения $\Delta K) = 5 \cdot 10^2$ Гц.

При $F >$ от анализа собственно тактильной переходят к анализу вибрационной чувствительности.

Вибрационная чувствительность. Она обусловлена теми же рецепторами, что и тактильная чувствительность, поэтому топография распределения вибрационной чувствительности по поверхности тела аналогична тактильной.

Диапазон ощущения вибрации высок: 5-12 000 Гц. Наиболее высока чувствительность к частотам 200-250 Гц. При их увеличении и уменьшении вибрационная чувствительность снижается. В этом случае пороговая амплитуда вибрации минимальна и равна 1 мкм. Пороги вибрационной чувствительности различны для разных участков тела. Наибольшей чувствительностью обладают дистальные участки тела человека, те, которые наиболее удалены от его медиальной плоскости (например, кисти рук).

Кожная чувствительность к боли. Этот вид чувствительности обусловлен воздействием на поверхность кожи механических, тепловых, химических, электрических и других раздражителей. В эпителиальном слое кожи имеются свободные нервные окончания, которые являются специализированными нервными рецепторами. Между тактильными и болевыми рецепторами существуют противоречивые отношения. Проявляются они в том, что наименьшая плотность болевых рецепторов приходится на те участки кожи, которые наиболее богаты тактильными рецепторами, и наоборот. Противоречие обусловлено различием функций рецепторов в жизни организма. Болевые ощущения вызывают оборонительные рефлексы, в частности рефлекс удаления от раздражителя. Тактильная чувствительность связана с ориентировочными рефлексами, в частности, это вызывает рефлекс

сближения с раздражителем.

Биологический смысл боли состоит в том, что она, являясь сигналом опасности, мобилизует организм на борьбу за самосохранение. Под влиянием болевого сигнала перестраивается работа всех систем организма и повышается его реактивность.

Болевой порог при механическом давлении на кожу измеряется в единицах давления и зависит от места измерений. Например, порог болевой чувствительности кожи живота составляет 15-20 г/мм², кончиков пальцев - 300 г/мм². Латентный период - около 370 мс. Критическая частота слияния дискретных болевых раздражителей - 3 Гц.

Пороговая плотность потока тепла, вызывающего болевое ощущение, составляет 88 Дж/(м·с).

Температурная чувствительность. Она свойственна организмам, обладающим постоянной температурой тела, обеспечиваемой терморегуляцией. Температура кожи несколько ниже температуры тела и различна для отдельных участков: на лбу - 34-35 °С, на лице - 20-25 °С, на животе - 34 °С, на стопах ног - 25-27 °С. Средняя температура свободных от одежды участков кожи 30-32 °С. Коже присущи два вида рецепторов. Одни реагируют только на холод, другие только на тепло.

Пространственные пороги зависят от стимулирующих факторов: при контактном воздействии, например, ощущение возникает уже на площади в 1 мм², при лучевом - начиная с 700 мм². Латентный период температурного ощущения равен примерно 0,20 с. Абсолютный порог температурной чувствительности определяется по минимально ощущаемому изменению температуры участков кожи относительно физиологического нуля, т.е. собственной температуры дайной области кожи, адаптировавшейся к внешней температуре. Физиологический нуль для различных областей кожи достигается при температурах среды между 12-18 и 41-42 °С. Для тепловых рецепторов абсолютный порог температурной чувствительности составляет примерно 0,2 °С, для холодных - 0,4 °С. Порог различительной чувствительности составляет примерно 1 °С.

1.10. Тактильные рецепторы

Рецепция прикосновения и давления

Тактильные рецепторы, или рецепторы прикосновения и давления расположены на поверхности кожи.

Рецепторами прикосновения являются мейснеровы тельца, находящиеся в кожных сосочках, и меркелевы диски, расположенные особенно в большом количестве на кончиках пальцев и губах. На коже, покрытой волосами, высокочувствительны к прикосновению волосы. Это объясняется тем, что корень волоса обвивается нервным сплетением и всякое прикосновение к волосу передается этому сплетению, вызывая его возбуждение. Сбривание волос сильно понижает чувствительность кожи к прикосновению. Рецепторами давления являются пачиниевы тельца.

Проводниками тактильной рецепции служат толстые миелиновые волокна. Электрофизиологическая регистрация потенциалов действия показала, что даже при очень коротком раздражении **тактильных рецепторов** в них возникает не один импульс, а целая серия разрядов.

Адаптация тактильных рецепторов. **Тактильные рецепторы** способе к быстрой адаптации, поэтому ощущается только изменение давления, а не само давление. Если на подошвенную подушечку лапы кошки положить груз, то в рецепторе возникают нервные импульсы, частота которых может достигать 250—350 имп/сек. Эта импульсация длится несколько секунд и прекращается вследствие наступления адаптации. У человека уменьшение частоты импульсов сопровождается уменьшением силы ощущения.

Скорость адаптации разных кожных рецепторов неодинакова.

Наиболее быстро адаптируются рецепторы, расположенные у корней волос, и пачиниевы тельца.

Вследствие адаптации человек ощущает давление одежды только в тот момент, когда ее надевает или когда при движении одежда трется о кожу.

Локализация тактильных ощущений. Все ощущения прикосновения и давления человек очень точно относит к определенному месту кожи.

Локализация осязательных ощущений вырабатывается посредством опыта под контролем других органов чувств, главным образом зрения и мышечного чувства. Для доказательства можно привести знаменитый опыт Аристотеля: прикосновение перекрещенными указательным и средним пальцами к маленькому шарикю дает ощущение прикосновения к двум шарикам, так как обыденный опыт учит, что внутренней стороны указательного пальца и наружной стороны среднего одновременно могут касаться только два отдельных шарика.

Измерение тактильной чувствительности. Тактильная чувствительность развита весьма различно на разных местах кожи. Тактильную чувствительность измеряют эстеziометром Фрея, с помощью которого определяют силу давления, необходимую для раздражения рецепторов и возникновения ощущения.

Порог раздражения самых чувствительных участков кожи равен 50 мг, наименее чувствительных — 10 г. Чувствительность губ, носа, языка наиболее высока, чувствительность спины, подошвы стопы, живота наименьшая.

Пороги пространства. При одновременном прикосновении к двум точкам кожи не всегда ощущаются два прикосновения: если эти две точки лежат близко друг к другу, то может возникнуть ощущение только одного прикосновения. То наименьшее расстояние между двумя точками кожи, при раздражении которых возникает ощущение двух прикосновений, называется порогом пространства.

Пороги пространства измеряют с помощью циркуля, или эстеziометра Вебера, представляющего собой циркуль со шкалой, обозначающей расстояние между его ножками в миллиметрах.

Пороги пространства весьма различны на разных местах кожи, т. е. ощущение двух прикосновений возникает при разном расстоянии ножек циркуля (*рис. 5*).

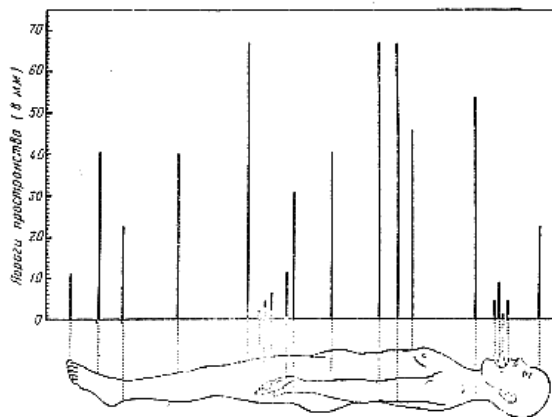


Рис.5. Величины порогов пространства на разных участках тела человека.

Пороги пространства минимальны на кончиках пальцев, губах и языке, где они равны 1—2,5 мм, и максимальны на бедре, плече и спине (свыше 70 мм).

Пороги пространства отчасти зависят от того, насколько афферентные нервные волокна ветвятся на периферии и от какого числа рецепторов передает импульсы одно нервное волокно. Согласно электрофизиологическим наблюдениям, площадь кожной поверхности, иннервируемой одним афферентным волокном, в разных участках тела различна и составляет от нескольких квадратных миллиметров до 2—3 см² и более.

1.11. Проприорецепторы

Мышечно-суставные рецепторы

Необходимым условием нормальной мышечной деятельности является получение информации о положении тела в пространстве и о степени сокращения каждой из мышц. Эта информация поступает в центральную нервную систему от рецепторов вестибулярного аппарата, глаз, кожи, а также от **проприорецепторов** (мышечно-суставных рецепторов). К

проприорецепторам относятся:

- мышечные веретена, находящиеся среди мышечных волокон,
- тельца Гольджи, расположенные в сухожилиях,
- пачиниевы тельца, находящиеся в фасциях, покрывающих мышцы, в сухожилиях, связках и периосте.

Все эти **проприорецепторы** относятся к группе механорецепторов. Мышечные веретена и тельца Гольджи возбуждаются при растяжении, а пачиниевы тельца — при давлении.

О важности афферентной иннервации мышц свидетельствует и тот факт, что 30-50% волокон в любом нерве, подходящем к мышце, являются афферентными, несущими импульсацию от проприорецепторов. К уже отмечалось, при выключении афферентной иннервации мышц, например при перерезке задних корешков спинного мозга, координированная мышечная деятельность нарушается, несмотря на сохранение двигательной иннервации мышц.

Мышечные веретена представляют собой высокодифференцированные рецепторные образования, снабженные афферентными и эфферентными нервными волокнами. Каждое веретено состоит из нескольких тонких так называемых интрафузальных поперечно-полосатых мышечных волокон (*рис.6*).

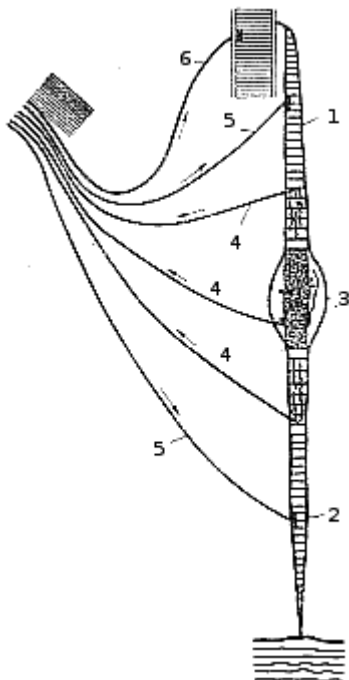


Рис.6. Схематическое изображение мышечного веретена кролика. 1 — проксимальный конец интрафузального мышечного волокна, прикрепленный к волокну скелетной мышцы; 2 — дистальный конец интрафузального волокна, прикрепленный к фасции; 3 — ядерная сумка; 4 — афферентные волокна, идущие от рецепторов интрафузального волокна; 5 — гамма-эфферентные волокна; 6 — моторное волокно, идущее к скелетной мышце.

Одиночное волокно состоит из центральной части — ядерной сумки и двух способных к сокращению участков. В ядерной сумке расположены рецепторы, представляющие собой спиралевидные окончания толстых афферентных покрытых миелиновой оболочкой нервных волокон. Сокращающиеся участки интрафузального волокна иннервированы тонкими моторными, так называемыми гамма-эфферентными, волокнами, образующими мелкие концевые пластинки.

Один конец интрафузального волокна прикрепляется к обычному

мышечному волокну, а другой — к сухожилию. Таким образом, интрафузальные волокна расположены параллельно массе мышечных волокон, среди которых они находятся. Если мышца растянута или расслаблена, то мышечные веретена тоже растянуты и в рецепторах ядерной сумки возникают импульсы, идущие в центральную нервную систему. Если же мышца сокращена, то натяжение мышечных веретен ослабевает и импульсация прекращается.

Второй вид проприорецепторов — *тельца Гольджи* — находится в сухожилиях. При мышечном сокращении тельца Гольджи растягиваются и в них возникают нервные импульсы, поступающие к нервным центрам. Сухожильные рецепторы менее возбудимы, чем мышечные веретена.

Таким образом, в двигательном аппарате имеются рецепторы — мышечные веретена, — возбуждающиеся при удлинении (расслаблении и растяжении), и рецепторы — тельца Гольджи, — возбуждающиеся при сокращении мышечных волокон.

Импульсы, поступающие в центральную нервную систему от мышечных веретен, облегчают возникновение рефлекторной реакции данной мышцы и тормозят сокращение мышцы-антагониста. Импульсы, приходящие от сухожильных рецепторов — тельца Гольджи, вызывают противоположные рефлекторные реакции.

Импульсация из мышечных веретен, как показал Р. Гранит, может изменяться с помощью специального регуляторного механизма. Такой механизм образован сократительными элементами, расположенными по обе стороны от ядерной сумки интрафузального волокна. Их сокращение вызывает растяжение ядерной сумки и раздражение рецепторов веретена. Таким образом, эти рецепторы могут посылать в центральную нервную систему интенсивную импульсацию даже при небольшом сокращении или расслаблении поперечнополосатой мышцы.

Степень сокращения сократительных элементов веретена регулируется гамма-эфферентными нервными волокнами, которые являются отростками, гамма-мотонейронов спинного мозга. Импульсы, приходящие по гамма-эфферентным волокнам,

вызывают сокращения интрафузальных мышечных волокон, что приводит к усилению потока афферентных импульсов от растягиваемых рецепторов ядерной сумки. Активность гамма-мотонейронов регулируется ретикулярной формацией среднего мозга .

Сократительные элементы мышечных веретен всегда находятся в состоянии некоторого тонуса, так как по гамма-эфферентам непрерывно поступают к ним импульсы из центральной нервной системы. Это влечет собой афферентную импульсацию от мышечных веретен, которая в свою очередь тонизирует мотонейроны спинного мозга, что является одной из причин рефлекторного тонуса скелетной мускулатуры. Отличительная особенность проприорецепторов — их малая способность к адаптации, благодаря чему центральная нервная система получает непрерывные сигналы о состоянии скелетной мускулатуры и может осуществлять непрерывную регуляцию двигательных актов.

Кинестетические сигналы, т. е. сигналы о движении отдельной части тела, играют чрезвычайно важную роль в развитии восприятий организма. Они являются главным контролем других органов чувств, например, зрения. Так, оценка зрением расстояния до какого-нибудь предмета вырабатывается при помощи мышечного чувства. Возбуждения, связанные с работой мышц, возникающие при хватании предмета руками или приближении к нему, сочетаются со зрительными ощущениями и служат важнейшим критерием для выработки суждения о том, насколько отдален предмет.

Необходимым условием нормальной мышечной деятельности является получение информации о положении тела в пространстве и о степени сокращения каждой из мышц. Эта информация поступает в центральную нервную систему от рецепторов вестибулярного аппарата, глаз, кожи, а также от **проприорецепторов** (мышечно-суставных рецепторов). К **проприорецепторам** относятся:

- мышечные веретена, находящиеся среди мышечных волокон,
- тельца Гольджи, расположенные в сухожилиях,
- пачиниевы тельца, находящиеся в фасциях, покрывающих

мышцы, в сухожилиях, связках и периосте.

Все эти **проприорецепторы** относятся к группе механорецепторов. Мышечные веретена и тельца Гольджи возбуждаются при растяжении, а пачиниевы тельца — при давлении.

О важности афферентной иннервации мышц свидетельствует и тот факт, что 30-50% волокон в любом нерве, подходящем к мышце, являются афферентными, несущими импульсацию от проприорецепторов. К уже отмечалось, при выключении афферентной иннервации мышц, например при перерезке задних корешков спинного мозга, координированная мышечная деятельность нарушается, несмотря на сохранение двигательной иннервации мышц.

Мышечные веретена представляют собой высокодифференцированные рецепторные образования, снабженные афферентными и эфферентными нервными волокнами. Каждое веретено состоит из нескольких тонких так называемых интрафузальных поперечно-полосатых мышечных волокон.

Одиночное волокно состоит из центральной части — ядерной сумки и двух способных к сокращению участков. В ядерной сумке расположены рецепторы, представляющие собой спиралевидные окончания толстых афферентных покрытых миелиновой оболочкой нервных волокон. Сокращающиеся участки интрафузального волокна иннервированы тонкими моторными, так называемыми гамма-эфферентными, волокнами, образующими мелкие концевые пластинки.

Один конец интрафузального волокна прикрепляется к обычному мышечному волокну, а другой — к сухожилию. Таким образом, интрафузальные волокна расположены параллельно массе мышечных волокон, среди которых они находятся. Если мышца растянута или расслаблена, то мышечные веретена тоже растянуты и в рецепторах ядерной сумки возникают импульсы, идущие в центральную нервную систему. Если же мышца сокращена, то натяжение мышечных веретен ослабевает и импульсация

прекращается.

Второй вид проприорецепторов — *тельца Гольджи* — находится в сухожилиях. При мышечном сокращении тельца Гольджи растягиваются и в них возникают нервные импульсы, поступающие к нервным центрам. Сухожильные рецепторы менее возбудимы, чем мышечные веретена.

Таким образом, в двигательном аппарате имеются рецепторы — мышечные веретена, — возбуждающиеся при удлинении (расслаблении и растяжении), и рецепторы — тельца Гольджи, — возбуждающиеся при сокращении мышечных волокон.

Импульсы, поступающие в центральную нервную систему от мышечных веретен, облегчают возникновение рефлекторной реакции данной мышцы и тормозят сокращение мышцы-антагониста. Импульсы, приходящие от сухожильных рецепторов — тельца Гольджи, вызывают противоположные рефлекторные реакции.

Импульсация из мышечных веретен, как показал Р. Гранит, может изменяться с помощью специального регуляторного механизма. Такой механизм образован сократительными элементами, расположенными по обе стороны от ядерной сумки интрафузального волокна. Их сокращение вызывает растяжение ядерной сумки и раздражение рецепторов веретена. Таким образом, эти рецепторы могут посылать в центральную нервную систему интенсивную импульсацию даже при небольшом сокращении или расслаблении поперечнополосатой мышцы.

Степень сокращения сократительных элементов веретена регулируется гамма-эфферентными нервными волокнами, которые являются отростками, гамма-мотонейронов спинного мозга. Импульсы, приходящие по гамма-эфферентным волокнам, вызывают сокращения интрафузальных мышечных волокон, что приводит к усилению потока афферентных импульсов от растягиваемых рецепторов ядерной сумки. Активность гамма-мотонейронов регулируется ретикулярной формацией среднего мозга .

Сократительные элементы мышечных веретен всегда находятся в

состоянии некоторого тонуса, так как по гамма-эфферентам непрерывно поступают к ним импульсы из центральной нервной системы. Это влечет собой афферентную импульсацию от мышечных веретен, которая в свою очередь тонизирует мотонейроны спинного мозга, что является одной из причин рефлекторного тонуса скелетной мускулатуры. Отличительная особенность проприорецепторов — их малая способность к адаптации, благодаря чему центральная нервная система получает непрерывные сигналы о состоянии скелетной мускулатуры и может осуществлять непрерывную регуляцию двигательных актов.

Кинестетические сигналы, т. е. сигналы о движении отдельной части тела, играют чрезвычайно важную роль в развитии восприятий организма. Они являются главным контролем других органов чувств, например, зрения. Так, оценка зрением расстояния до какого-нибудь предмета вырабатывается при помощи мышечного чувства. Возбуждения, связанные с работой мышц, возникающие при хватании предмета руками или приближении к нему, сочетаются со зрительными ощущениями и служат важнейшим критерием для выработки суждения о том, насколько отдален предмет.

1.12. Рецепторы вестибулярного аппарата

Вестибулярный аппарат и рецепция положения и движения тела

Рецепторы вестибулярного аппарата доставляют информацию о положении и движении тела в пространстве. Поступающие в центральную нервную систему импульсы от **рецепторов вестибулярного аппарата** обуславливают возникновение рефлексов, необходимых для сохранения равновесия тела. В результате этих рефлексов происходят сложнокоординированные тонические сокращения скелетной мускулатуры, с помощью которых положение тела выравнивается и сохраняется равновесие.

В пирамиде височной кости находится внутреннее ухо, или лабиринт, который состоит из улитки и вестибулярного аппарата. Последний включает в себя преддверие (vestibulum) и три полукружных канала (canales semicirculares). Полукружные каналы, представляющие собой узкие ходы правильной формы,

расположены не совсем точно в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Верхний, или передний, канал лежит во фронтальной, задний — в сагиттальной, а наружный — в горизонтальной плоскости. Один конец каждого канала колобообразно расширен и называется ампулой.

В костном лабиринте имеется почти точно повторяющий его форму перепончатый лабиринт. Последний в области преддверия делится на два мешочка: один - *sacculus* — помещается в сферическом вдавлении кости и лежит ближе к улитке, другой—*utricleus* — лежит в имеющем эллиптическую форму вдавлении кости и расположен ближе к полукружным каналам (*рис. 7*).

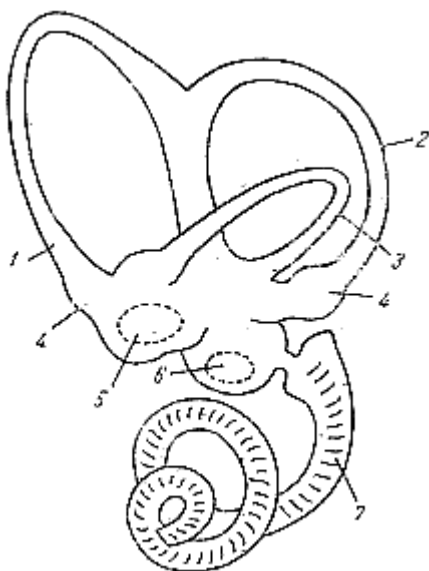


Рис.7. Схема левого лабиринта млекопитающего. 1, 2 и 3 — полукружные каналы; 4 — ампулы каналов; 5, 6 — преддверие (vestibulum), которое разделяется на два мешочка: utricleus (3) и

sacculus (б); пунктиром отмечены «слуховые» пятка — *macula utricularae* и *macula saccularis*; 7 — улитка.

Между костью и перепончатым лабиринтом имеется небольшое пространство, заполненное жидкостью, — перилимфой. Жидкость внутри перепончатого лабиринта называется эндолимфой; вязкость в 2—3 раза больше, чем воды.

В мешочках преддверия — *sacculus utriculus* — находится так называемый отолитовый аппарат, имеющий сложную структуру.

В каждой мешочке имеются возвышения, называемые пятнами — *macula sacc* и *macula utriculi*, представляющие собой скопления рецепторных клеток. Одна половина каждой такой клетки имеет цилиндрическую форму, другая — сужена и снабжена одним подвижным волоском и 60-80 склеенными неподвижными волосками (рис.8).

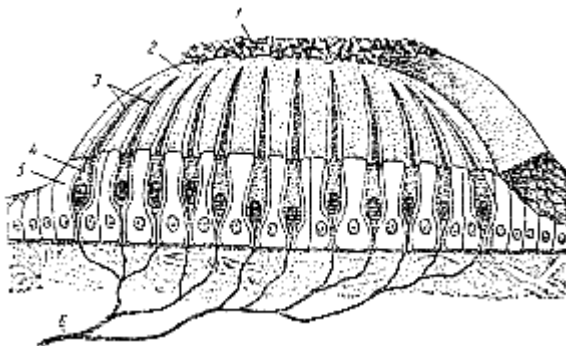


Рис.8. Схема строения отолитового аппарата (из Кольба). 1 — отолиты; а — отолитовая мембрана; 3 — полосы рецепторных клеток; 4 — рецепторные клетки; 5 — опорные клетки; б — нервные волокна.

Волоски рецепторных клеток проникают в сетчатую, похожую на войлок ткань, имеющую студенистую консистенцию и

покрывающую *maculae*.

В петлях этой студенистой массы находится большое количество микроскопических образований, состоящие из органического соединения фосфорно-углекислого кальция и имеющих форму продолговатых шестиугольников. Эти образования называются отолитами. Отолитовый слой, или отолитовая мембрана, тяжелее остальной ткани и может оказывать механическое давление на волоски рецепторных клеток.

В перепончатых полукружных каналах рецепторные клетки имеются только в ампулах, где они образуют скопления, получившие название *cristae ampularis*. Эти рецепторные клетки имеют длинные волоски. При движении эндолимфы каналов, происходящем при вращении тела; может происходить изгиб волосков рецепторных клеток.

К рецепторным клеткам вестибулярного аппарата подходят нервные волокна, являющиеся отростками биполярных клеток, образующих *ganglion sacrae*. Между рецепторной клеткой в дендритом биполярного нейрона имеется синапс, передача возбуждения в котором осуществляется посредством медиатора — ацетилхолина. Вторые отростки биполярных нейронов по выходе из *ganglion sacrae* образуют вестибулярную ветвь VIII пары черепно-мозговых нервов.

Адекватными раздражителями вестибулярного аппарата является ускоренное или замедленное вращательное или прямолинейное движение тела. Раздражение рецепторов вестибулярного аппарата происходит лишь под влиянием изменения скорости движения. Равномерное движение без ускорения или замедления не вызывает раздражения.

Электрофизиологические исследования подтвердили эти давно установленные факты. По афферентным нервным волокнам, отходящим от вестибулярного аппарата, постоянно поступают в центральную нервную систему редкие импульсы, даже в условиях покоя. Резкое возрастание частоты импульсов наблюдается в начале и в конце вращательного движения. Частые залпы импульсов длятся при этом около 25 секунд. Если вращательное движение равномерно, то импульсация в афферентных нервных

волокнах, отходящих от полукружных каналов, отсутствует. В зависимости от характера движения может возникнуть преимущественное раздражение отолитовых рецепторов или же рецепторов полукружных каналов.

Раздражителями отолитового аппарата являются ускоряющееся или замедляющееся прямолинейное движение тела, а также тряска, качка и наклон тела или головы в сторону, вызывающие изменения давления отолитовой мембраны на волоски рецепторных клеток.

Раздражение рецепторов отолитового аппарата, согласно одной теории— теории Брейера, происходит, когда отолитовая мембрана в силу собственной тяжести или под влиянием движения головы отодвигается внутрь преддверия и натягивает волоски рецепторных клеток. Согласно этой теории, рецепторные клетки подвергаются раздражению в том случае, когда отолитовая мембрана под влиянием тех же причин надавливает на их волоски.

Рецепторы отолитового аппарата при прямолинейном движении дают возможность воспринять ускорение, равное $2—20 \text{ см/сек}^2$ (порог различения ускорения). Порог различения наклона головы в сторону составляет около 1° , вперед и назад — около $1,5—2^\circ$.

При сопутствующих раздражениях можно наблюдать значительное повышение этого порога, т. е. ухудшение различения наклона, например, вибрации, имеющиеся в самолетах, повышают этот порог до 5° при наклонах вперед и назад и до 10° при наклонах в сторону.

Раздражителем рецепторов полукружных каналов является ускоренное или замедленное вращательное движение в какой-либо плоскости. В зависимости от характера вращательного центробежного ускорения или замедления происходит неодинаковое раздражение рецепторов разных полукружных каналов: рецепторы канала, расположенного в одной плоскости с направлением вращения, раздражаются с большей силой, чем другие.

Порог различения вращения равен в среднем $2—3^\circ/\text{сек}^2$ углового ускорения.

Раздражителем рецепторов полукружных каналов является движение эндолимфы. Это доказано опытами Эвальда: посредством тонкой операции он вводил животному в один из полукружных каналов «пневматический молоточек», который мог производить перемещение эндолимфы, когда его приводили в движение. Эксперименты показали, что при этом возникают такие же рефлекторные движения животного, как и при вращении в соответствующую сторону.

1.13. Обонятельные рецепторы

Обонятельные рецепторы находятся в верхней части носовой полости, под lamina perforata решетчатой кости.

Обонятельный эпителий находится в стороне от главного дыхательного пути. Вдыхаемый воздух может попадать туда путем диффузии, т. е. относительно медленно, или путем вихревых движений — более быстро. Такие вихревые движения получаются при «нюхании», т. е. при быстрых коротких вдохах через нос, при которых ноздри расширяются и облегчается проникновение вдыхаемого воздуха в верхнюю часть носовой полости — к обонятельным рецепторам.

Обонятельные рецепторы, или *обонятельные клетки*, представляют собой биполярные нейроны диаметром около 5—10 мк, расположенные вокруг цилиндрических опорных клеток. У собаки насчитывают 125 млн., а человека 60 млн. обонятельных клеток. Электронная микроскопия выявила на поверхности каждой обонятельной клетки большое количество тонких ресничек или выростов. Диаметр каждой такой реснички 0,1 мк, а высота 1—2 мк. Благодаря этим ресничкам резко возрастает возможность соприкосновения пахучего вещества с раздражаемой им рецепторной клеткой. Так, площадь обонятельной зоны у человека составляет около 5 см²; суммарная же поверхность ресничек обонятельных клеток в 100—150 раз больше.

Чувствительность органов обоняния поразительно велика. Для иллюстрации приводим в *таблице* пороговые для человека

концентрации в воздухе различных пахучих веществ.

Чувствительность животных с особенно развитым чувством обоняния, например собак, еще выше.

Название вещества	Пороговая концентрации вещества в воздухе (мг/м ³)
Этил-меркаптан	0,00004
Йодоформ	0,06
Ванилин	0,0005
Хлорфенол	0,004
Скатол	0,0004
Тринитробутилтолуол	0.000005

Приведенные в *таблице* цифры недостаточно характеризуют чувствительность обонятельных клеток, так как их достигают только 2% молекул пахучего вещества, находящегося в воздухе, поступающем в нос. Согласно расчетам Стюйвера, для порогового раздражения одной обонятельной клетки человека достаточно 8 молекул меркаптана. Согласно другим расчетам, для получения ощущения запаха необходимо, чтобы было возбуждено не менее 40 рецепторных клеток, на каждую из которых действует всего одна молекула пахучего вещества.

Механизм, посредством которого различные вещества раздражают обонятельные клетки, пока неясен. Высказывается предположение, что раздражение обонятельных клеток связано с химическим действием некоторых атомных групп. Однако химическим гипотезам противоречит тот факт, что некоторые близкие по структуре и химическим свойствам вещества могут иметь совершенно различные запахи.

Интенсивность обонятельного ощущения зависит от химической структуры и от концентрации пахучего вещества в воздухе и от скорости его тока через нос, а также от физиологического состояния обонятельного рецептора. Чем больше скорость поступления в нос воздуха с пахучим веществом, тем сильнее

обонятельное ощущение.

Максимальная интенсивность обонятельного ощущения при одной той же концентрации пахучего вещества в воздухе наблюдается лишь первый момент его действия на обонятельные клетки. В дальнейшем ощущение запаха ослабевает. Последнее связано с тем, что быстро развивается адаптация рецепторов, вследствие которой понижается их чувствительность. Поэтому человек перестает ощущать запах, находясь некоторое время в помещении, в воздухе которого высока концентрация пахучего вещества. Адаптация обонятельного аппарата возникает быстрее, пахучее вещество действует непрерывно; адаптация возникает медленнее, если оно ритмически вдыхается и выдыхается, т. е. действует обонятельные рецепторы прерывисто.

Это обусловлено тем, что импульсы в обонятельном рецепторе возникают только в момент движения уха через нос в фазу вдоха. Обратное движение воздуха в фазу выдоха сопровождается появлением импульсации в обонятельных рецепторах потому, что при выдохе воздух движется через нос коротким путем и не заходит в обонятельную область. В том случае, когда воздух с пахучим веществом попадает в нос и не движется, если следующие вдохи производятся через рот, то импульсация в обонятельных клетках возникает только в первый момент, а затем быстро прекращается вследствие адаптации. Последняя развивается в течение нескольких секунд или минут.

Степень чувствительности **обонятельных рецепторов** и быстрота адаптации регулируется симпатической нервной системой: раздражение симпатических нервных волокон резко увеличивает импульсацию в обонятельном нерве при действии запаха, что находится в соответствии с теорией Л. А. Орбели об адаптационной функции симпатической нервной системы.

Возможна быстрая адаптация к одному запаху, в то время как другие запахи продолжают восприниматься. Это обстоятельство легло в основу одной из существующих теорий обоняния. Предполагается, что вещества, вызывающие разные запахи, действуют на разные рецепторы. Так объясняется возможность адаптации к одному запаху при сохранении высокой чувствительности по отношению к другим пахучим веществам. Эта

теория объясняет выпадение восприятия одних видов запахов сохранении чувствительности к другим (подобные явления, называемые частичной аносмией, наблюдаются при действии некоторых лекарственных веществ и при некоторых заболеваниях слизистой оболочки носа). Согласно излагаемой теории, имеется большое количество разных видов обонятельных рецепторов.

Другая теория предполагает, что существует сравнительно немного разных видов обонятельных рецепторов; все богатство обонятельных ощущений достигается тем, что пахучие вещества раздражают разные группы рецепторов в разных комбинациях.

Многочисленные попытки классифицировать запахи оказались мало удачны. Для примера приведем классификацию Хенинга, который различает следующие запахи: пряный, цветочный, фруктовый, смолистый, горелый и гнилостный. Цваардемакер различает 9 основных запахов; из них семь действуют только на окончания обонятельного нерва, а два также и на окончания п. trigeminus и п. Glossopharungeus.

Электрофизиологические исследования свидетельствуют о непрерывной импульсации в волокнах обонятельного тракта. Действие запахов изменяет характер этой импульсации (частоту и группировку импульсов в серии), и именно таким путем передается обонятельная информация.

Обонятельный анализатор предназначен для восприятия человеком различных запахов, имеющих до 400 наименований. Рецепторы расположены на участке площадью около 2,5 см слизистой оболочки в носовой полости.

Условиями восприятия запахов являются летучесть пахучего вещества (выделение его молекул в свободном виде); растворимость веществ в жирах; движение воздуха, содержащего молекулы пахучего вещества в области обонятельного анализатора. Абсолютный порог обоняния измеряется долями миллиграмма вещества на литр воздуха (мг/л). Запахи могут сигнализировать человеку о нарушениях в ходе технологических процессов и об опасностях.

1.14. Вкусовые рецепторы

Вкусовые рецепторы дают информацию о характере веществ, поступающих в рот с пищей. Раздражение вкусовых рецепторов является возбудителем многочисленных безусловных рефлексов, вызывающих деятельность органов пищеварения.

Рецепторы вкуса — так называемые вкусовые почки — расположены на сосочках языка, а также на задней стенке глотки, мягком небе, миндалинах и надгортаннике. Больше всего **вкусовых рецепторов** на кончике, краях и задней части языка; на середине языка и нижней его поверхности вкусовых рецепторов нет.

Вкусовые почки имеют форму луковиц; образованы веретеновидными вкусовыми клетками, отделенными друг друга опорными клетками. Вкусовые почки не достигают поверхности слизистой оболочки и отделены от нее небольшими углублениями — вкусовыми порами. На конце вкусовой рецепторной клетки, обращенной к поверхности поры, имеются видные под микроскопом штифтики — микроворсинки. Общее количество вкусовых почек составляет около 2000. К каждой почке подходят 2—3 афферентных нервных волокна, оканчивающихся на вкусовых клетках.

Передние две трети языка иннервированы волокнами n. lingualis задняя треть — волокнами n. glossopharyngeus. Небольшой участок у надгортанника получает чувствительную иннервацию от n. vagus. Перерезка этих нервов приводит к потере вкуса. Вкусовое ощущение у человека может быть вызвано раздражением веточек n. lingualis электрическим током.

То, что в общежитии называют вкусом какого-либо вещества, определяется раздражением не только **вкусовых**, но и ряда других **рецепторов**, находящихся в полости рта и носа. Для возникновения вкусового ощущения имеют значение раздражения не только вкусовых, но и *обонятельных рецепторов*, а также *тактильных, болевых и температурных рецепторов* полости рта; они обуславливают возникновение «едкого», «вяжущего» или «терпкого» вкуса.

Существует четыре основных вкусовых ощущения: горькое, сладкое, кислое и соленое.

При точечном нанесении различных веществ на отдельные сосочки языка выяснилось, что раздражение одних сосочков вызывает ощущение только сладкого, других — только горького вкуса и т. д. Однако есть точки, раздражение которых вызывают по два или по три различных вкусовых ощущения. Ощущение сладкого воспринимается главным образом при раздражении передней части языка, горького — при раздражении основания. При различных химических воздействиях часто страдает вкусовое ощущение только определенного рода. Так, при смазывании языка раствором гимнемовой кислоты пропадает ощущение горького и сладкого, ощущение кислого и соленого остается.

Показано, что кислый вкус обусловлен наличием свободных водородных ионов. Соленый вкус дают некоторые соли. Горький же и сладкий вкус дают вещества самого разнообразного строения. Так, ощущение сладкого может быть получено не только при действии сахаров, но и сахарина. Таким образом, не всегда удается установить закономерную между химическим строением вещества и вызываемым им вкусовым ощущением.

Объективное исследование вкусовой рецепции проводится путем регистрации импульсов в афферентных нервах, отходящих от языка. Записи таких импульсов в тонком пучке волокон *chorda tympani* обезьяны показаны на *рис. 9*.

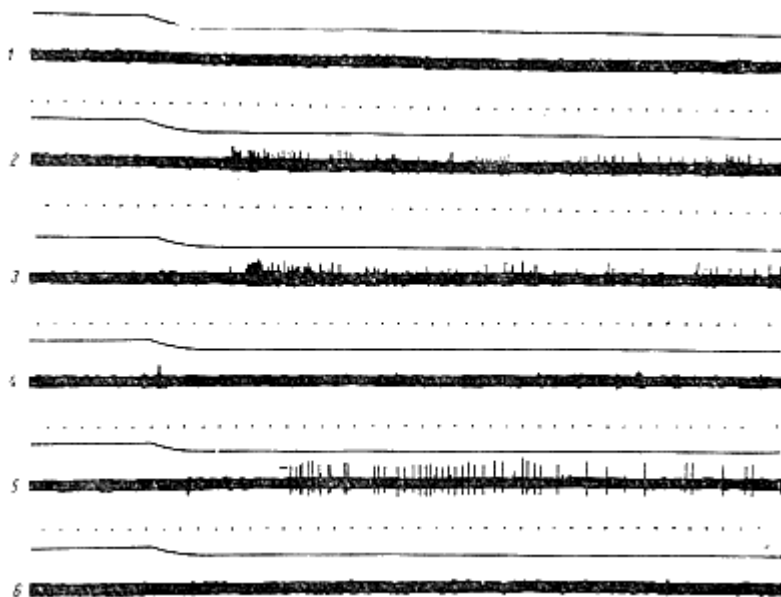


Рис.9. Импульсы в тонком пучке волокон из *chorda tympani* обезьяны-макаки при нанесении на язык различных растворов (по И. Цоттерману). 1 — вода; 2 — сахар; 3 — сахарин; 4 — хлористый натрий; 5 — уксусная кислота; 6 — хинин. Точки — отметка времени 10 секунд.

При исследовании вкусовых ощущений наблюдается резко выраженная адаптация к одному определенному вкусу; возможна адаптация по отношению к раздражителям, вызывающим только горький и сладкий вкус. Адаптация вкусовых рецепторов отмечена и при электрической регистрации потенциалов действия в афферентных нервах языка. Через 0,1 секунды после приложения раствора хинина или соли к поверхности языка наблюдаются частые импульсы, постепенно урежающиеся и почти полностью прекращающиеся.

При применении нескольких вкусовых раздражений одновременно или последовательно установлены феномены вкусового контраста и смешения вкуса. Вкусовой контраст заключается в обострении восприятия какого-либо одного вкуса под влиянием другого вкусового раздражения: например, обострение восприятия кислого вкуса под влиянием раздражителя, вызвавшего ощущение сладкого. Смешением

вкусов называется возникновение в некоторых случаях нового вкусового ощущения при одновременном действии двух или трех вкусовых раздражителей; новое вкусовое ощущение не похоже на свои компоненты.

Вкусовой анализатор

Абсолютные пороги вкусового анализатора выражаются в величинах концентраций раствора, и они примерно в 10 000 раз выше обонятельного. Различительная чувствительность вкусового анализатора довольно груба, в среднем она составляет 20%. Восстановление вкусовой чувствительности после воздействия различных раздражителей заканчивается через 10-15 мин.

1.15. Зрительная рецепция

Орган **зрительной рецепции** — *глаз* — включает в себя рецепторный аппарат, находящийся в сетчатке, и оптическую систему, которая фокусирует световые лучи и обеспечивает четкое изображение предметов на сетчатке в уменьшенном и обратном виде.

Оптическая система глаза. Поступающие в глаз световые лучи, прежде чем они попадают на сетчатку, проходят через несколько преломляющих поверхностей — переднюю и заднюю поверхности роговой оболочки, хрусталика и стекловидного тела. Ход лучей зависит от показателей преломления и радиуса кривизны поверхности роговой оболочки, хрусталика и стекловидного тела.

Аккомодация глаза. Для ясного видения предмета необходимо, чтобы лучи от каждой его точки были сфокусированы на сетчатке. Если смотреть вдаль, то близкие предметы видны не ясно и расплывчато. Это зависит от того, что лучи от ближних точек собираются за сетчаткой, а на сетчатке получаются круги светорассеяния. Видеть одновременно одинаково ясно предметы, разное удаленные от глаза, невозможно.

Аномалии рефракции глаза. Существуют две главные аномалии преломления лучей (рефракции) в глазу: близорукость, иначе говоря

миопия, и дальнозоркость — гиперметропия. Эти аномалии обусловлены, как правило, не недостаточностью преломляющих сред, а ненормальной длиной глазного яблока.

Зрачок и зрачковый рефлекс. Зрачком называется отверстие в центре радужной оболочки, через которое проходят все лучи света, попадающие внутрь глаза. Зрачок способствует четкости изображения предметов на сетчатке, пропуская только центральные лучи и устраняя так называемую сферическую аберрацию.

Офтальмоскоп. Для рассматривания внутренней поверхности глаза Гельмгольц предложил глазное зеркало, или офтальмоскоп, ход лучей в котором представлен на рис. 211. Исследуемый глаз (К) освещается отраженными от зеркала (S1-S2) лучами яркого источника света (L). Эти лучи, идя обратно из глаза, отражаются вновь от зеркала и направляются обратно к источнику света (L).

Сетчатка представляет собой внутреннюю оболочку глаза, в которой расположены фоторецепторы — палочки и колбочки, воспринимающие световые лучи, и нервные клетки с их многочисленными отростками, составляющие собственный нервный аппарат глаза.

Роль движений глаз в зрении. При рассматривании как неподвижных, так и движущихся, как близких, так и далеких предметов важную роль выполняют движения глаза. Глаз человека может вращаться вокруг любой оси, проходящей через центр вращения глаза, который находится в среднем на 1,3 мм позади центра глаза. Глаз из первичного положения, когда он смотрит прямо вперед, может повернуться кнаружи на 42° , внутрь — на 45° , вверх на 54° и вниз на 57° .

Световая чувствительность. Для того чтобы возникло зрительное ощущение, источник света должен обладать некоторой определенной энергией. То минимальное количество энергии, которое необходимо для возникновения зрительного ощущения, служит показателем абсолютной чувствительности глаза. Величина пороговой энергии, измеряемая в эргах в секунду, при наиболее благоприятных обстоятельствах крайне мала, составляя $1 \cdot 10^{-10}$ — $1 \cdot 10^{-11}$ эрг/сек.

Цветовое зрение. Существует ряд различных теорий цветового зрения. Небольшим признанием пользуется трехкомпонентная теория. Она

допускает существование в сетчатке трех типов различных цветовоспринимающих фоторецепторов — колбочек. О существовании трехкомпонентного механизма восприятия цветов говорил еще М. В. Ломоносов. В дальнейшем эта теория была сформулирована Т. Юнгом и Г. Гельмгольцем. Согласно этой теории колбочки содержат различные светочувствительные вещества.

Восприятие пространства. Остроту зрения определяет то наименьшее расстояние между двумя точками, которое глаз может различить. Способность различать расстояние между точками зависит от угла, под которым видны эти точки. Нормальный глаз различает две точки под углом в 60 секунд.

Защита и питание глазного яблока. Главной защитой глазного яблока являются верхнее и нижнее веки. Закрывание век служит защитным рефлекторным актом, возникающим при ярком свете, при раздражении роговой оболочки или конъюнктивы, или ресниц. Центростремительной частью рефлекторной дуги является п. trigeminus; центр этого рефлекса расположен в продолговатом мозгу.

Характеристики анализаторов человека

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Анализа́тор челове́ка — подсистема [центральной нервной системы](#), обеспечивающая приём и первичный анализ информации. Периферийная часть анализатора — [рецептор](#), центральная часть анализатора — [мозг](#).

Основными характеристиками анализатора являются:

- пороговая чувствительность;
- воспринимаемый диапазон;
- временные характеристики.

Зрительный анализатор

энергетические

- диапазон воспринимаемых яркостей
 - порог световой чувствительности

- абсолютный порог (достигается в ходе теневой адаптации)
- яркость адаптации 10—1000 кд/м²
- рабочие яркости 50—180 кд/м²
- слепящая яркость (225 000 Кд/м²)
- контрастность (диф. порог, то есть минимально различимая величина между двумя значениями яркости, воспринимаемыми как разные)
 - прямой $K = (L_{\text{фона}} - L_{\text{об}}) / L_{\text{фона}} * 100 \%$
 - обратный $K = (L_{\text{об}} - L_{\text{фона}}) / L_{\text{об}} * 100 \%$
- [Спектральная световая эффективность монохроматического излучения](#) (чувствительность к свету с различным спектральным составом)

информационные

- пропускная способность
 - на уровне ощущения ($5,6 * 10^9$ ед/сек)
 - на уровне идентификации (20—70 ед/сек)
 - на уровне восприятия (2—4 ед/сек)

пространственные

- острота зрения (зависит от освещённости, контрастности, времени экспозиции, положения поля зрения, формы)
- поля зрения
 - зона центрального зрения (2° — 4°)
 - ясного зрения (30° — 35°)
 - периферийного (180°)
- объём восприятия (7 ± 2)

временные

- латентный период реакции (от ощущения до идентификации ~200 мс)
- длительность инерции ощущения (меньше, если объект в зоне центра зрения)
- время зрительной фиксации (0,2—0,65 с, зависит от сложности фигуры)

- критическая частота мелькания (серия световых импульсов, воспринимаемая как непрерывный сигнал)
 - $f=a*\log L+b$ (то есть зависит от яркости) $\sim 14—70$ Гц
- время адаптации
 - темновая ($\sim 2—10$ мин)
 - световая ($\sim 0,1—0,8$ мин)
- длительность инфопоиска ($0,8—1,5$ сек)

Слуховой анализатор

Особенности анализатора:

- способность к приему информации в любой момент времени
- способность воспринимать звуки в широком диапазоне и выделять необходимые
- способность устанавливать местонахождение источника

Характеристики анализатора:

- абсолютный порог слышимости (зависит от тона, метода предъявления, субъективных особенностей)
- дифференциальный порог слышимости
 - по интенсивности $K=dL/L$ ($L=20\lg P/P_0$, $P_0=0,00002$ Па — мин порог) наилуч от $0,02—0,065$
 - по частоте $K=df/f$ ($500-5000$ Гц, $0,002-0,003$)
- временные характеристики
 - различие интервалов между монотонными сигналами ($0,5—2$ мс)
 - время полного восприятия чистых тонов ($200—300$ мс)
 - пороговое время восприятия прерывистых тональных сигналов ($80—150$ мс)

2. Сенсоры как искусственные органы чувств

2.1. Введение

Весь опыт развития человеческой цивилизации свидетельствует о том, что чем правильнее и лучше люди понимают мир, чем точнее, больше и глубже знают о нем, и чем в большей степени согласны с законами природы действуют, тем успешнее и лучше обустроивают они свою жизнь. В свою очередь, уровень, достоверность и глубина наших знаний о мире во многом определяются тем, с помощью каких средств воспринимаем мы этот мир, наблюдаем за ним, следим за происходящими в нем изменениями и явлениями.

В период становления человечества наши пращуры использовали для этого только свои органы чувств, возможности которых ограничены. Но по мере развития технологий, техники, науки люди стали все шире применять также и разнообразные технические устройства, которые **дополняют или заменяют наши органы чувств**. Такие устройства принято называть **сенсорами** (от латинских слов *sensus* — чувство и *sensorium* — орган чувств).

Можно смело утверждать, что уровень развития цивилизации (наряду с другими важнейшими факторами) характеризуется уровнем развития сенсоров. Их роль в обеспечении нашей правильной ориентации, в более объективном, точном и глубоком восприятии действительности, в повышении качества и эффективности нашей деятельности трудно переоценить. Особенно это касается биологии, медицины, социальной сферы, высокотехнологических отраслей, где мы имеем дело с очень сложными объектами, оценивать состояние которых и процессы, в них происходящие, только "на глаз", по внешним признакам уже недостаточно.

Сенсоры к тому же — это именно те устройства, в которых происходит загадочный процесс "рождения информации" и в которых физико-химические изменения, происходящие в реальной действительности, превращаются в информационные сигналы, служащие основой для разумного поведения, для формирования и уточнения моделей этой действительности, наших представлений о ней. По большому счету,

именно от сенсоров фактически и начинается любое разумное поведение, всякий интеллект, вся информатика. Любая разумная система, возникшая естественным путем или созданная другой разумной системой, успешно функционирует и выживает в реальном мире лишь тогда и до тех пор, когда и пока она получает объективную и качественную информацию о нем.

Каким образом может происходить "превращение" физико-химических воздействий в информацию, каковы возможные механизмы этого "превращения", принципы действия сенсоров, от чего зависит точность получаемой информации, - об этом и рассказывается в предлагаемой работе.

Поразительно быстрое, можно сказать, "революционное", развитие кибернетики, микроэлектронной и оптоэлектронной элементной базы информатики, да, собственно, и самих прикладных областей знаний, сделало возможным построение нового поколения "разумных" сенсоров. Такие сенсоры стали называть "интеллектуальными" — от латинского слова *intellectualis*, которое кроме значения "умственный" имеет также значение "рассудительный, соображающий, разумный". Создание и все более широкое применение интеллектуальных сенсоров — это один из признаков информационной стадии в развитии общества.

Каковы отличительные особенности таких сенсоров, какие они бывают, от чего зависит и как достигается их интеллектуальность, как их проектировать и строить, обеспечивать удобство и надежность их работы, — эти и много других вопросов относительно интеллектуальных сенсоров тоже раскрываются в данной работе.

Еще одна задача этой работы: наглядно показать, что интеллектуальные сенсоры — это уже не мечта, не отдельные разрозненные достижения современной техники, что они уже уверенно вошли в нашу повседневную жизнь. Их разработка и производство стали самостоятельной важной инновационной подотраслью приборостроения. Пока этот факт не всегда осознают даже специалисты — разработчики отдельных интеллектуальных сенсоров.

В связи с этим напомним, как на севере, на берегу Ледовитого океана летнее солнце, волны и дожди размыли со временем крутой берег, и на его обрыве открылись какие-то кости. Учув добычу, к этим костям

приползли насекомые, пришли дикие звери, начали грызть их, даже и не подозревая, что это за кости. Только образованный человек, оказавшийся на том берегу, сумел разглядеть и понять, что это не просто отдельные кости, а остатки скелета огромного животного. Люди старательно выбрали и рассортировали эти кости, осторожно перевезли, а потом собрали их в музей, где все теперь могут увидеть впечатляющий цельный скелет огромного мамонта.

Вот и мы решили в данной работе собрать вместе разрозненные примеры различных интеллектуальных сенсоров, рассортировать и описать их, чтобы каждый смог увидеть, что все они вместе – это и в самом деле уже не просто отдельные научно-технические достижения, а новое поколение сенсоров, очередной значительный шаг в развитии сенсорики и вообще в технологическом прогрессе человечества.

2.2. Уточнение понятия "сенсор"

Разные авторы по-разному трактуют понятие "сенсор". У одних – это "чувствительный прибор", искусно созданный человеком "бдительный сторож", у других – "анализатор", распознающий, узнающий нужный объект ("аналит"), у третьих – "датчик" какой-то физической величины (температуры, давления, угла поворота), у четвертых – орган чувств животного или растения и т.д. Выше и мы, желая дать начальное объяснение этому понятию, сказали, что сенсоры – это "устройства, которые дополняют или заменяют наши органы чувств". И всё это частично правильно. Действительно, все сенсоры что-то "чувствуют" (например, изменение температуры, наличие магнитного поля, изменение кислотности раствора и т.п.); за чем-то "бдительно наблюдают"; что-то "распознают" (напр., отклонение от вертикали, появление в воздухе избытка углекислого газа, наличие в воде возбудителя холеры, ...); "измеряют" какую-нибудь физическую величину (напр., освещенность, ускорение, давление, ...). **Все они, действительно, заменяют или дополняют наши органы чувств.** В понятии "датчик" акцент делается на другой важной способности сенсора – на том, что он *выдает* во внешний мир сигналы о том, что он "чувствует", "распознаёт", "измеряет".

Чтобы точнее определить понятие "сенсор", надо отвлечься от деталей, от того, что именно "чувствует", "распознаёт", "измеряет" сенсор, с какой конкретной целью и как именно он это "делает", каким

конкретно образом выдает он сигналы во внешний мир. Главное, общее, что тогда остаётся, – это то, что

1. у сенсора есть "объект наблюдения" ;
2. взаимодействуя с объектом наблюдения, под его влиянием сенсор меняет свое состояние ("чувствует", "распознает", "измеряет") и
3. каким-то образом выдает сигналы об этом ("сигнализирует") "пользователю".

Объектом наблюдения является тот материальный объект, процесс, та среда, с которыми взаимодействует сенсор, информацию о которых он "приставлен" собирать. Объектом наблюдения может быть, в частности, и вся окружающая сенсор среда. Для уровня (ватерпаса), например, объектом наблюдения является плоская поверхность, на которой он установлен; для радиоприемника объектом наблюдения является окружающее его антенну электромагнитное поле; для медицинского градусника – тело, находящееся в тепловом контакте с его концом, в котором находится капля ртути.

"Пользователем", получающим, понимающим и использующим сигналы от сенсора *может быть человек, другое живое существо, автоматическая система управления, регулирования или регистрации, для которых сигналы от сенсора являются "информацией" об объекте наблюдения. Таким образом, отвлекаясь от частных случаев, мы приходим к следующему определению понятия "сенсор".*

Сенсор – это устройство (прибор, орган, узел), преобразующее физическое (физико-химическое) изменение в объекте наблюдения, его физическое воздействие в информационный сигнал для пользователя .

Сенсор – это связующее звено между реальным "физическим" миром и миром информационных моделей, между материей и информацией.

Сенсоры поставляют "пользователю" важнейшую объективную исходную информацию, на основе которой только и можно предвидеть события, разумно вести себя в мире, судить о том, насколько созданные и применяемые пользователем информационные модели адекватны реальным процессам и объектам, с которыми он имеет дело.

2.3. Простые сенсоры

Еще относительно недавно люди использовали в основном простые сенсоры, дающие только "сырую", первичную, необработанную информацию об объектах и процессах, за которыми ведется наблюдение. Расшифровку, обработку этой информации, сопоставление её с другими данными выполняли сами люди, они же оценивали её значимость и степень важности.

Одними из первых простых сенсоров, наверное, были отвесы – для выявления отклонений от вертикали; упомянутые уже выше уровни – сенсоры малых отклонений от горизонтального положения плоской поверхности; флюгеры, отслеживающие и показывающие направление ветра; поплавки в удочках для ловли рыбы; компасы – для более точного ориентирования на местности и т. д.

Функциональная схема простого сенсора представлена на рис. 1.1. Главными его составными частями являются чувствительный элемент и сигнализатор. Реагируя на то или иное воздействие со стороны объекта наблюдения, чувствительный элемент меняет своё состояние, а сигнализатор выдает об этом какой-то понятный пользователю сигнал. Этот сигнал и является носителем информации об объекте наблюдения.

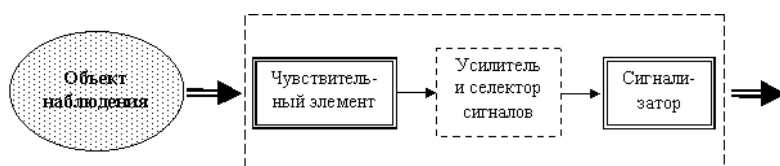


Рис. 2.1. Функциональная схема простого сенсора

Если изменения в состоянии чувствительного элемента очень незначительны и выходные сигналы получаются весьма слабыми или "зашумлены" какими-то посторонними влияниями, то в сенсоре используют также узлы усиления и/или селекторы полезных сигналов. Однако они не являются обязательной составной частью сенсора и поэтому на рис. 2.1 изображены штриховой линией.

Рассмотрим несколько примеров. В простейшем сенсоре магнитного поля – в компасе – чувствительным элементом является намагниченная

тонкая стрелка (полоска из железа или из другого ферромагнетика либо из их сплава), установленная и уравновешенная на вертикальной оси, вокруг которой она может свободно вращаться. Магнит всегда стремится повернуться своим северным полюсом в направлении магнитных силовых линий. Роль сигнализатора совместно выполняют тут остриё стрелки и шкала с угловыми делениями, облегчающая отсчет угла между направлением магнитной стрелки и заданным направлением (напр., направлением движения). Если магнитная стрелка достаточно длинная, то в усилении сигналов нет необходимости. А вот механические вибрации, особенно во время движения, вызывают значительные колебания, "рыскания" стрелки, что затрудняет отсчет направления. Для того чтобы уменьшить "рыскания", внутреннюю полость компаса заполняют жидкостью с оптимально подобранной вязкостью, которая, с одной стороны, эффективно гасит быстрые хаотические рыскания стрелки, а с другой, – не вызывает значительного запаздывания поворота стрелки при изменении направления движения. Эта жидкость и выполняет в компасе роль селектора полезных сигналов или, если хотите, частотного фильтра, "отрезающего" колебания с частотами выше примерно 1 Гц.

В привычных медицинских ртутных термометрах – сенсорах температуры тела – роль чувствительного элемента играет небольшая капля ртути, залитая внутрь стеклянной колбочки. Будучи приведена в тепловой контакт с нашим телом, она нагревается до его температуры. Чем выше температура тела, тем больше тепловое расширение ртути. Роль усилителя сигнала играет присоединенный к колбочке стеклянный капилляр, в котором небольшие изменения объема капли ртути трансформируются в заметное удлинение ртутного столбика. Последний вместе с приставленной к капилляру температурной шкалой и выполняют роль сигнализатора.

В простейшем электрокардиографе – сенсоре изменений электрических потенциалов в разных точках на поверхности грудной клетки – чувствительными элементами являются электроды с присосками, смоченные электролитом для обеспечения электрического контакта с телом. Поскольку первичные сигналы от них – небольшие электрические потенциалы – весьма слабы, то обязательно используют электронные усилители. Как правило, чтобы заглушить электромагнитные помехи, применяют также электрический фильтр частот выше примерно 10 Гц. Роль сигнализатора выполняет то или иное устройство для визуализации электрокардиограммы.

Зададимся вопросом: может ли быть сенсор без чувствительного элемента? Конечно же, – нет. Снимем, например, магнитную стрелку с оси компаса, а всё остальное оставим. Безусловно, такой "компас" уже перестанет быть сенсором магнитного поля Земли.

А может ли быть сенсором сам чувствительный элемент без сигнализатора? Конечно же, – тоже нет. Положим, например, магнитную стрелку компаса на тетрадь или книгу. Магнитная стрелка продолжает "чувствовать" магнитное поле Земли. Но из-за значительных сил трения она уже не может повернуться своим острием в направлении силовых линий магнитного поля. Если отсутствует сигнализатор, то прибор тоже перестает быть сенсором.

Поэтому **только вместе, только в совокупности и во взаимодействии** чувствительный элемент и сигнализатор **могут служить** сенсором. Они являются **обязательными, неотъемлемыми функциональными узлами** сенсора.

С развитием техники и возрастанием требований со стороны прикладных областей (промышленности, научных исследований, медицины, технологии) в сенсорах также начали выполнять сначала простую, а со временем все более сложную обработку информации. Функциональная схема такого сенсора приведена на рис. 1.2.

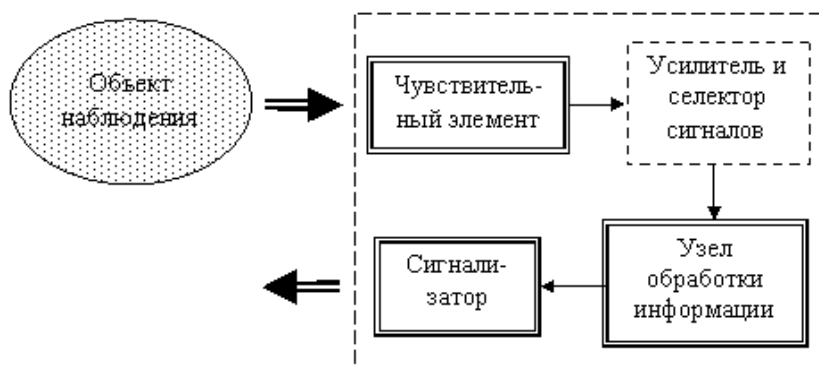


Рис. 1.2. Структура простого сенсора с обработкой информации

Когда специалистам по физиологии растений стало необходимо определять общее количество света, получаемого растениями за световой день, был создан соответствующий сенсор, в котором чувствительным элементом является фотоприемник. Под влиянием внешнего освещения он генерирует фототок, пропорциональный падающему световому потоку. Фототок после усиления поступает в конденсатор, который и играет роль узла обработки информации, в данном случае – роль интегратора. Накопленный в нём за световой день электрический заряд как раз и пропорционален количеству света, полученному растениями ("светосумме").

В психрометре – сенсоре температуры и относительной влажности воздуха – роль узла простейшей обработки информации играет встроенная в него психрометрическая таблица. В ней пользователь, определив показания "сухого" и "влажного" термометров, может найти соответствующее значение относительной влажности. В некоторых психрометрах имеется также таблица зависимости давления или плотности насыщенного водяного пара от температуры. Тогда пользователь получает возможность, определить не только относительную, но и абсолютную влажность воздуха. На примере психрометра мы видим, что у сенсора могут быть несколько чувствительных элементов. В данном случае налицо 3 чувствительных элемента: 2 колбочки с ртутью, спиртом или другой жидкостью, увеличивающей свой объём с повышением температуры, и влажная ткань, которой обмотана колбочка "влажного" термометра. Она как раз и является чувствительным элементом, "чувствующим" изменения влажности воздуха.

В древних песочных часах – сенсоре времени – никакой обработки информации не было. А вот в механических часах появились зубчатые передачи, которые и являются в данном сенсоре времени узлом обработки информации. Они пересчитывают периоды колебаний маятника в заданные интервалы времени – минуты и часы.

На примере стрелочных механических часов мы видим, что сенсор может иметь и несколько сигнализаторов. В данном случае есть 2 обязательных сигнализатора – минутная и часовая стрелки с циферблатом, и может быть даже 3-й – секундная стрелка.

2.4. Активные и пассивные сенсоры

До сих пор мы рассматривали примеры простых сенсоров, которые только реагируют на влияние со стороны объекта наблюдения. Такие сенсоры называют "пассивными". В отличие от них "активные" сенсоры сами каким-то **специальным образом воздействуют на объект наблюдения (предмет или процесс) и воспринимают вызванные этим изменения.**

Функциональная схема таких сенсоров показана на рис. 1.3. Одним из примеров может быть тонометр – сенсор артериального давления крови. Узлом воздействия на объект является в нем манжета, которая накладывается на плечо или на предплечье пациента и создает всестороннее давление на биоткань и кровеносные сосуды. Задатчиком воздействия является надувная резиновая "груша" или миниатюрный компрессор. Чувствительным элементом и одновременно усилителем сигналов служит стетоскоп, который приставляют к артерии, расположенной по направлению тока крови за манжетой.

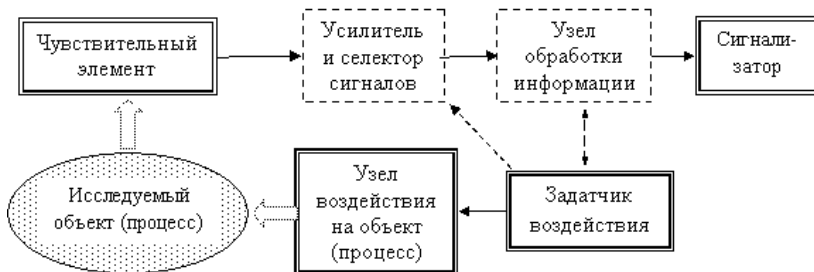


Рис. 1.3. Функциональная схема "активного" сенсора

Когда манжета сдута, кровь свободно циркулирует по артериям, и в стетоскопе можно услышать глухие удары пульса. Если же закачать в манжету воздух так, чтобы давление стало выше систолического, то артерии перекрываются в результате внешнего давления на них, и пульсирование крови за манжетой прекращается. Постепенно стравливая воздух и уменьшая тем самым внешнее давление на артерии, врач должен уловить тот момент, когда пульсирование крови возобновляется. В этот момент давление воздуха в манжете и её давление извне на артерии приблизительно равны систолическому артериальному давлению крови внутри артерий. При дальнейшем

снижении давления в манжете пульсовые волны сначала усиливаются, а потом начинают ослабевать. Когда давление в манжете сравнивается с диастолическим артериальным давлением и опускается ниже, то пульсовые удары значительно ослабляются. Сигнализатором в этом сенсоре является соединенный с манжетой манометр, на котором врач считывает значения систолического (в момент возобновления пульсаций крови) и диастолического давления (в момент значительного ослабления пульсаций). Узла обработки информации в простых тонометрах нет. Эту обработку выполняет человек – врач.

В тонометре одновременно присутствуют и используются 2 чувствительных элемента – приставляемая к артерии мембрана стетоскопа и манометр, реагирующий на изменения давления в манжете. Одновременно используются и 2 сигнализатора – слуховые выходы стетоскопа, которые врач вставляет в уши, чтобы прослушивать биения пульса, и стрелка манометра с соответствующей шкалой.

Другой пример "активного" сенсора приведем опять из области физиологии растений. Там в своё время появилась необходимость определять объёмный поток жидкости сквозь стебель или по веткам растения и изменения этого потока со временем. Решена эта задача была так. На стебель (ветку) в одном из мест устанавливают тонкий нагреватель, например, вольфрамовую проволоку, сквозь которую пропускается электрический ток. Нагревая ветку в месте своего расположения, нагреватель вместе с ней нагревает и жидкость, текущую по ветке, до физиологически допустимой температуры,

например, до 39-40 °С. Нагреватель и является в данном случае узлом воздействия на объект. Задатчиком воздействия служит регулируемый источник тока через нагреватель. Дальше по ходу движения жидкости вдоль стебля на расстоянии порядка сантиметра устанавливают второй термочувствительный элемент (термистор, термопару). Сигнал от него усиливают, фильтруют по частоте и подают в электронный узел обработки информации. Там определяется разность температур ветки в местах нагревания и контроля. Чем сильнее поток жидкости, тем больше тепла переносит с собой жидкость, и тем меньше разность температур. Таким образом, по изменению разности температур определяют изменения объёмного потока жидкости внутри стебля (ветки).

2.5. Сенсорно-компьютерные системы

С появлением во второй половине прошлого века электронных вычислительных машин появилась и возможность выполнять достаточно сложную обработку первичной информации, получаемой от сенсора. В связи с этим инженеры и ученые начали создавать "умные" сенсорно-компьютерные системы (рис. 1.4). Сенсоры тут играют роль внешних "органов чувств" компьютера, поставляя ему первичную информацию. Сложную её обработку, подготовку к выдаче полученных результатов в наиболее удобной для пользователя форме, её документирование, систематизацию, упаковку и длительное хранение выполняет компьютер.

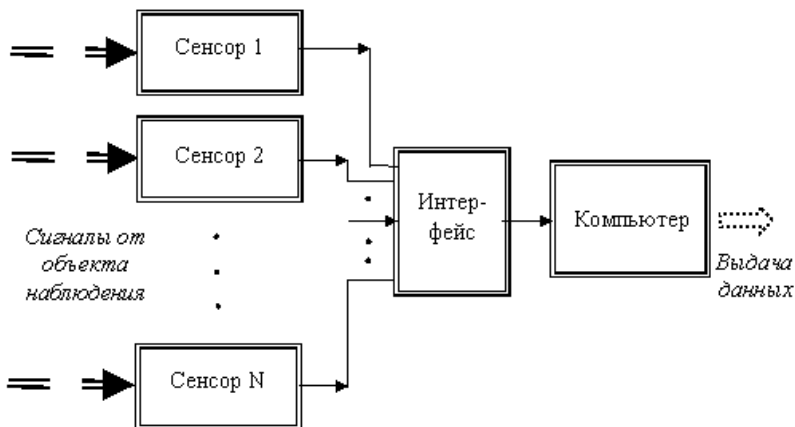


Рис. 1.4. Структура "пассивной" сенсорно-компьютерной системы

Вспомним, например, современные компьютеризированные электрокардиографы и электроэнцефалографы. В них от многих, установленных в определенных позициях, электродов собираются, усиливаются и обрабатываются слабые переменные электрические сигналы, обусловленные работой соответственно сердца или головного мозга. А компьютер анализирует их и выдает в наиболее удобной форме врачам.

В компьютерных электрокардиографах, например, не только вычисляются интервалы времени между "зубцами" кардиограммы, соответствующими сокращениям мышц сердца, и диапазон их

варьирования, средняя частота пульса и другие количественные показатели. Путем сопоставления электрокардиограмм, полученных от разных точек грудной клетки, устанавливается ориентация электрической оси сердца, фиксируются экстрасистолы и другие нарушения координации сокращений разных мышц сердца.

В компьютеризированной системе магнитокардиографии чувствительными элементами являются определенным образом расположенные в пространстве сверхпроводящие квантовые интерферометры, которые способны с высокой частотой и точностью воспринимать минимальные изменения магнитного потока, связанные с работой сердца. Кроме квантовых интерферометров, используют также до десятка чувствительных электродов, которые позволяют параллельно снимать также электрокардиограмму. Интерфейс состоит из электронных схем усиления и предварительной аналоговой обработки сигналов и из аналого-цифровых преобразователей. С выхода последних информация поступает в компьютер, который обрабатывает полученные данные в соответствии с достаточно сложными алгоритмами, выдаёт результаты анализа на экран монитора в виде понятных врачу условных изображений, цифровых и текстовых данных и предлагает некоторые диагностические выводы.

Еще одним примером являются пассивные компьютерные системы охраны и видеонаблюдения. Чувствительными элементами в них служат видеокамеры и датчики приближения, присутствия, изменения обстановки. Сигналы от датчиков и полученные изображения передаются в компьютер, где они маркируются указанием места обнаружения и текущего времени. Далее они обрабатываются, сопоставляются между собой и со стандартными сигналами, зафиксированными в памяти. В случае выявления тревожных изменений компьютер фиксирует их в своей долговременной памяти и вырабатывает сигналы привлечения внимания служащих, а на монитор выводится полиэкранная информация.

Структура "активных" сенсорно-компьютерных систем приведена на рис. 1.5. Здесь в состав системы входят также средства воздействия на исследуемый объект или процесс. Этими средствами управляет компьютер, который может автоматически изменять динамику, интенсивность и состав воздействий в зависимости от поступающих от сенсоров данных. Одним из примеров такой системы являются компьютерные томографы. Объектом исследования для них является

головной мозг или иная часть человеческого тела. В качестве узлов воздействия используются точечные источники рентгеновского излучения, местоположение которых можно менять относительно исследуемой части тела. В качестве сенсоров используют детекторы рентгеновского излучения, расположенные в одной плоскости в разных направлениях и под разными углами.

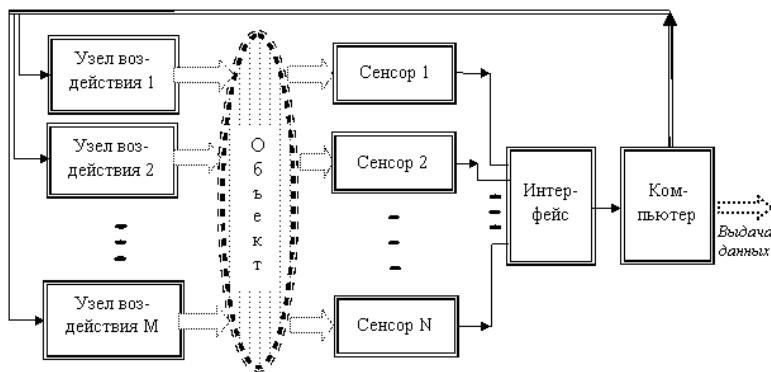


Рис. 1.5. Структура "активной" сенсорно-компьютерной системы

В современных томографах, которые стали могучим средством диагностики заболеваний, применяют уже сотни таких детекторов одновременно. Высокопроизводительный компьютер на основе большого массива данных, полученных многими детекторами под разными углами, выполняет сложные вычисления, определяя по этим данным распределение плотности живых тканей в соответствующем сечении тела. Полученные изображения и вычисленные показатели выдаются врачам. С помощью компьютера врач, который проводит исследование, в зависимости от цели может изменять режимы работы, перемещать узлы воздействия и массивы сенсоров относительно человеческого тела, получая изображения его внутренней структуры также и в других сечениях, и т.д. Таким образом ("сечение за сечением") может быть получена 3-мерная картина внутреннего строения исследуемого органа. Одним из средств воздействия может быть также введение в организм человека контрастных веществ, существенно повышающих контрастность изображений и позволяющих исследовать также и динамику физиологических процессов.

В магниторезонансной томографии средствами воздействия на исследуемый орган человека являются постоянное однородное магнитное поле, последовательности радиочастотных электромагнитных импульсов и дополнительные слабые градиентные магнитные поля. Магнитные моменты атомных ядер с некомпенсированным полуцелым спином ориентируются вдоль постоянного магнитного поля. А высокочастотное электромагнитное поле возбуждает их прецессию вокруг соответствующего направления. При выключении электромагнитного поля прецессия еще некоторое время продолжается. Возбужденные ядра излучают при этом электромагнитные сигналы характерной частоты. Это называют "спиновым эхом". Сенсорами являются чувствительные радиоприёмники, настроенные на частоту ядерного магнитного резонанса, а селекторами – синхронные детекторы соответствующих импульсных последовательностей. Амплитуда принятых сигналов пропорциональна концентрации соответствующих ядер в живых тканях тела. Управление излучением электромагнитных импульсов и наложением слабого градиентного магнитного поля, а также математическую обработку совокупности получаемых сигналов выполняет компьютер. В отличие от рентгеновской компьютерной томографии магниторезонансное исследование не сопровождается вредным облучением организма, которое в больших дозах может быть опасным.

Применение компьютеров предоставило пользователям не только возможность получать значительно возросшие объемы намного лучше обработанной и более достоверной информации об исследуемых объектах. Оно подняло сенсорiku на принципиально более высокий уровень – на уровень диагностики. Древнегреческое слово "*diagnostikos*" означает "способный распознать".

При отсутствии компьютера интерпретацию получаемых от сенсоров данных, выводы из них способны были выполнять только специалисты. Физики на основе получаемых данных делали выводы о внутренней структуре, функционировании, текущем состоянии и свойствах исследуемых физических объектов, инженеры – о состоянии соответствующих машин, технических систем, о ходе технологических процессов. Врачи определяли состояние внутренних органов человека, причины, сущность заболеваний, оценивали ход лечения.

В сенсорно-компьютерных системах значительную часть сложной умственной работы, накопления баз данных, ценного опыта, необходимых для высококачественной диагностики, удалось уже переложить на компьютер!

2.6. Интеллектуальные сенсоры

Совсем новые возможности появились в 80-х годах XX века, когда началось серийное производство микропроцессоров и микрокомпьютеров, умещающихся уже на одном кристаллике кремния ("чипе"). Каждый из них – это маленький универсальный искусственный электронный "мозг", который можно встроить в сенсор и выполнять в нём достаточно сложную обработку первичной информации. Тем самым сложились предпосылки для рождения принципиально нового класса современных "интеллектуальных" сенсоров.

Такие сенсоры, как правило, являются "активными", т.е. не просто пассивно воспринимают влияние, свойства, характеристики объекта наблюдения, но и сами специальным образом воздействуют на объект, воспринимая и анализируя вызванные этим изменения. Для них не является проблемой учесть нелинейность характеристик чувствительных элементов, различные поправки и влияние сторонних воздействий (напр., изменения температуры). Если требуется, они сами автоматически могут повторить измерения, усреднить результаты, пересчитать в иные единицы измерения и т.п.

Функциональная схема "интеллектуального" сенсора показана на рис. 1.6. Его "интеллект" сосредоточен в микрокомпьютере МК (другие названия – микропроцессор, микроконтроллер, микроконвертор). МК не только обрабатывает информацию, но и организывает всю работу сенсора и его информационную связь с внешним миром – с пользователем, с внешним компьютером, с каналом связи или с компьютерной сетью. Микрокомпьютер при наличии соответствующих заложенных в его память микропрограмм может выполнять также самоконтроль, контроль всех узлов сенсора и выдавать пользователю предупреждения и диагностические сообщения. Пользователь имеет возможность влиять на работу сенсора через клавиатуру Кл, в частности, выбирать и изменять режимы работы, задавать или изменять какие-то уставки и параметры и т.д.

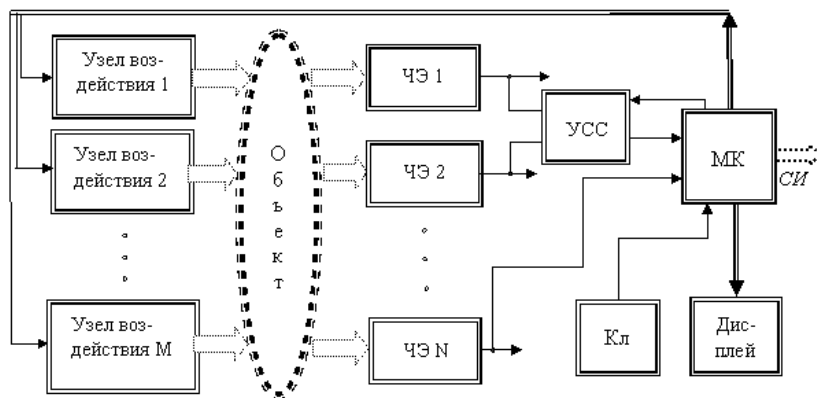


Рис. 1.6. Функциональная схема "интеллектуального" сенсора: ЧЭ – чувствительные элементы; УСС – усилители-селекторы сигналов; МК – микрокомпьютер; Кл – клавиатура

Получив команду о начале работы, микрокомпьютер в предусмотренном программой порядке включает узлы воздействия на объект наблюдения и начинает отслеживать сигналы, поступающие от чувствительных элементов (ЧЭ). Слабые или "зашумленные" сигналы предварительно усиливаются и выделяются в усилителе-селекторе сигналов (УСС). Сигналы, не требующие усиления или селекции, могут поступать непосредственно в микрокомпьютер. Отслеживая данные от чувствительных элементов, микрокомпьютер может автоматически изменять интенсивность или характер воздействия на объект наблюдения, величину усиления или характер селекции сигналов в узле УСС.

В соответствии с заданной микропрограммой микрокомпьютер обрабатывает совокупность сигналов, поступающих от чувствительных элементов, а полученные результаты перекодирует в наиболее удобную для пользователя форму и выводит на дисплей. Полученные результаты могут быть также помечены, рассортированы, "упакованы", занесены в долговременную память микрокомпьютера и храниться в ней, а когда потребуется, то через стандартный интерфейс (СИ) переданы во внешний компьютер или в компьютерную сеть. Благодаря этому новые "интеллектуальные" сенсоры органически вписываются в новейшие высокопродуктивные технологии промышленного и сельскохозяйственного производства, медицинской практики, научных исследований.

В некоторых интеллектуальных сенсорах клавиатуру и дисплей объединяют в виде сенсорного экрана.

Наличие встроенного микрокомпьютера придаёт "интеллектуальным" сенсорам невиданную ранее гибкость, возможность автоматической адаптации к изменяющимся условиям работы. Становится возможной многофункциональность, когда, меняя какую-нибудь насадку и переходя в другой режим работы, сенсор сравнительно легко может выполнять совсем иную функцию. Вы, несомненно, знаете, например, что многие мобильные телефоны могут служить и в качестве записной книжки, карманного компьютера, цифрового фотоаппарата.

И, наконец, интеллектуальный сенсор может быть способен не только собирать, обрабатывать и поставлять те или иные данные о контролируемом объекте, но и интерпретировать их, помогая пользователю в диагностике и принятии решения.

Можно смело утверждать, что без интеллектуальных сенсоров не может функционировать и настоящий искусственный интеллект. Ведь глубокая предварительная обработка первичных данных уже в сенсорах – это предпосылка создания информационных моделей всё более высокого уровня.

Подводя итог, понятие "интеллектуальный сенсор" можно определить следующим образом.

Интеллектуальный сенсор – это сенсор, имеющий в своем составе микрокомпьютер и благодаря этому способный выполнять достаточно сложную обработку первичной информации; учитывать все нелинейности и необходимые поправки; выдавать данные в наиболее удобной для пользователя форме; активно воздействовать на объект наблюдения, воспринимая и анализируя вызванные этим изменения; производить самоконтроль и самодиагностику; накапливать и систематизировать данные; поддерживать информационную связь с внешним миром; изменять режимы своей работы, адаптируясь к изменяющимся условиям; переходить к выполнению других функций и т.д.

2.7. Классификация интеллектуальных сенсоров

Интеллектуальные сенсоры можно классифицировать, как и простые сенсоры, по назначению, по классу точности или по быстродействию, по габаритам и массе, по диапазону допустимых условий применения, по принципам их действия и т.д.

По назначению, например, сенсоры часто классифицируют на предназначенные для применения

- в тех или иных отраслях промышленности (в автомобилестроении, авиакосмической, кораблестроительной, пищевой промышленности, ...);
- в сельском хозяйстве (в животноводстве, растениеводстве, при разведении и ловле рыбы);
- в различных видах техники, медицинских приборах, в научных исследованиях, в экологии;
- в обслуживании населения;
- в спорте, в военном деле;
- для контроля за качеством продуктов, воды;
- для техники безопасности и охраны объектов и т.д.

Сенсоры, используемые в качестве измерительных приборов, классифицируют по назначению в зависимости от того, какие физические величины они измеряют. Их принято называть "**датчиками**" (вязкости, давления, магнитного поля, потока, силы, скорости, температуры, угла поворота, электрических величин и т.п.).

По точности сенсоры классифицируют на стандартные классы точности, принятые в технике измерений. Иногда их разделяют только качественно: на высокоточные, средней точности и грубые, обычно называемые "индикаторами".

По габаритам и массе различают крупные стационарные сенсоры (например, радиотелескопы), переносные сенсоры, портативные ("карманные") сенсоры и микросенсоры.

По диапазону допустимых условий применения различают сенсоры, пригодные для использования

- только в лабораторных условиях,
- в полевых условиях или
- в особых условиях (при очень низких либо при очень высоких температурах, в морских условиях или под водой, в условиях повышенной радиации, в вакууме) и т.д.

Намного сложнее обстоит дело при попытках классификации сенсоров *по принципу действия*. Ведь сенсоры, как мы уже отмечали, могут состоять из многих узлов, каждый из которых может действовать по своим принципам. Принципу действия которого из узлов сенсора отдать предпочтение, – это уже дело вкуса.

Выбирая принцип классификации сенсоров в данном цикле лекций, мы учли то, что любой сенсор, и особенно интеллектуальный сенсор, – это, в первую очередь, информационный прибор, который наблюдает с некоторой стороны окружающий мир и добывает из него полезную информацию, необходимую для успешной деятельности всякой саморегулируемой жизнеспособной системы. Информационная сторона сенсоров не менее важна и необходима, как и их физическая, физико-химическая или биохимическая сторона. А по большому счету, она даже является главной, определяющей. Ибо сенсоры, собственно говоря, *и существуют для того, чтобы добывать полезную информацию*.

Поэтому мы и пришли к выводу о **целесообразности классификации сенсоров именно по информационно-физическому признаку, в частности, по физической природе возникающих в них первичных информационных сигналов**.

Такой принцип классификации пока является непривычным и, насколько нам известно, никем еще не применялся. Однако он является естественным и понятным, если рассматривать сенсоры как информационные приборы.

Пример классификации сенсоров по физической природе первичных информационных сигналов, приведен на рис. 1.7. Он отображает одновременно также и порядок рассмотрения различных видов интеллектуальных сенсоров в данном цикле лекций.



Рис. 1.7. Пример классификации сенсоров по физической природе первичных информационных сигналов

К классу " **комбинированных** " мы относим сенсоры, в которых формируются и используются одновременно несколько различных первичных информационных сигналов, имеющих разную физическую природу. Например, в упомянутом уже выше тонометре первичные информационные сигналы, поступающие через стетоскоп в уши врача, являются акустическими. Но параллельно врач смотрит на манометр и считывает с него величину давления. Этот сигнал имеет вид механического перемещения стрелки, т.е. по физической природе является механическим.

Другой пример – описанные выше магнитокардиографы. В них первичными информационными сигналами являются обусловленные работой сердца небольшие изменения магнитных потоков, воспринимаемые сверхпроводящими интерферометрами, а также синхронные изменения электрических потенциалов на поверхности тела.

Изображенная на рис. 1.7 классификация, конечно же, не является полной. Спектр первичных информационных сигналов, безусловно, шире и со временем может еще более расшириться.

Чтобы Вы смогли практически применять предложенную классификацию, поупражняемся в её применении к классификации нескольких сенсоров, приведенных в качестве примеров в тексте данного раздела.

Начнем с простейшего отвеса – сенсора для выявления отклонений от вертикали. Чувствительным элементом в нём является груз, сигнализатором – длинная тонкая бечевка (нитка, леска), на которой висит груз. Из-за силы тяжести, действующей на груз, бечевка всегда вытягивается строго по вертикали. Первичным и конечным информационным сигналом является отклонение бечевки от возводимой стены (устанавливаемой колонны, вкапываемого столба, бокового края рамы навешиваемой на стену картины и т.п.). Т.е. первичный информационный сигнал является тут механическим. Поэтому и сенсор этот мы относим к классу механических сенсоров.

Чувствительным элементом уровня (ватерпаса) – сенсора малых отклонений от горизонтального положения плоской поверхности – является пузырек воздуха, плавающий под прозрачным окошечком на поверхности воды. Под действием выталкивающей силы (силы Архимеда) пузырек этот всегда занимает самое верхнее положение. И поэтому, если поверхность, на которой установлен уровень, наклоняется по отношению к горизонтальной плоскости, то пузырек воздуха перемещается. Сигнализатором является нанесенная на окошечко уровня шкала угловых наклонов, а первичным информационным сигналом – перемещение пузырька воздуха относительно шкалы. Поэтому и данный сенсор мы относим к классу механических.

Простейший компас – сенсор для точного ориентирования на местности – обычно относят к классу "магнитных" по той причине, что он реагирует на магнитное поле Земли, и его стрелка устанавливается вдоль силовых линий этого поля. Однако первичным информационным сигналом в нем является поворот магнитной стрелки, т.е. механическое угловое перемещение. Поэтому по нашей классификации компас относится тоже к классу механических сенсоров.

К классу механических следует отнести и медицинские ртутные термометры – сенсоры температуры тела. Ведь первичным информационным сигналом в них является удлинение ртутного столбика, т.е. механическое перемещение.

Электрокардиографы, безусловно, относятся к классу электрических сенсоров, поскольку первичными информационными сигналами в них являются изменения электрических потенциалов в разных точках на поверхности грудной клетки. При последующей визуализации

электрокардиограммы с помощью самописца или на экране электронно-лучевой трубки сигналы эти превращаются в механические отклонения пера самописца или электронного луча. Врач же воспринимает их глазами в виде оптических сигналов. Т.е. физическая природа сигналов потом может изменяться. Но для классификации важна физическая природа именно первичных информационных сигналов.

В тонометрах – сенсорах для определения артериального давления крови – первичным информационным сигналом являются акустические колебания, вызванные пульсациями давления артериальной крови. Поэтому тонометры можно отнести к классу акустических сенсоров. Однако, если учитывать то, что равноправным первичным информационным сигналом является в них еще и механическое перемещение стрелки манометра, то тонометры следует отнести к классу комбинированных сенсоров – акустомеханических.

В заключение разберем еще пример магниторезонансного томографа. Первичными информационными сигналами являются в нём электромагнитные сигналы характерных частот, вызванные "спиновым эхом" – продолжающейся еще некоторое время прецессией спинов ядер после выключения возбуждающего электромагнитного поля. Поэтому магниторезонансный томограф в нашей классификации относится к электромагнитным сенсорам.

Краткие итоги

Совершенствование известных и создание новых сенсоров, постепенный переход от простых, пассивных к более сложным, активным сенсорам, к сенсорам, осуществляющим еще и некоторую обработку информации, затем создание сенсорно-компьютерных систем, начало промышленного выпуска в 80-х г.г. XX века однокристалльных микрокомпьютеров закономерно привело к рождению качественно нового класса интеллектуальных сенсоров. Описанию таких сенсоров, принципов их работы и посвящена данная работа.

Сенсор – это устройство (прибор, орган, узел), преобразующее физическое (физико-химическое) изменение в объекте наблюдения, его воздействие на чувствительный элемент в информационный сигнал для пользователя. Сенсор – это связующее звено между реальным

"физическим" миром и миром информационных моделей, между материей и информацией.

Интеллектуальный сенсор – это сенсор, имеющий в своем составе микрокомпьютер и благодаря этому способный выполнять достаточно сложную обработку первичной информации; учитывать все необходимые поправки и нелинейности; выдавать данные в наиболее удобной для пользователя форме; активно воздействовать на объект наблюдения, воспринимая и анализируя вызванные этим изменения; производить самоконтроль и самодиагностику; накапливать и систематизировать данные; поддерживать информационную связь с внешним миром; изменять режимы своей работы, адаптируясь к изменяющимся условиям; легко переходить к выполнению других функций и т.д.

Существуют различные способы классификации интеллектуальных сенсоров. В нашей работе применяется классификация их, исходя из физической природы первичных информационных сигналов.

2.8. Виды механических сенсоров.

В **механических сенсорах** первичные сигналы о состоянии исследуемого объекта или процесса имеют механическую природу. Это могут быть: изменение формы и/или размеров тел; изменение их взаимного расположения, т.е. механическое перемещение; изменение скорости движения; возникновение ускорений; изменение амплитуды, фазы или частоты механических колебаний и т.п. Соответственно есть смысл подразделять механические сенсоры с учетом физической природы чувствительных элементов и первичных информационных сигналов, которые в них возникают, на следующие виды:

- деформационные сенсоры, первичными сигналами в которых являются изменения формы, объема или размеров чувствительного элемента;
- сенсоры *линейного перемещения*, первичным сигналом в которых является перемещение центра массы тела в пространстве;
- сенсоры *углового перемещения*, первичными сигналами в которых являются наклон тела, поворот, вращение;

- *акселерометры*, в которых первичным сигналом является возникновение механического ускорения;
- *вибрационные* сенсоры, в которых первичным сигналом является изменение состояния механических колебаний тела или системы тел;
- *хроматографические* сенсоры, первичные сигналы в которых появляются вследствие механического перемещения молекул (жидкости, газа) сквозь пористую среду.

Указанная систематизация графически показана на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Виды механических сенсоров

На первом этапе технологического развития человечества подавляющее большинство сенсоров были механическими. Отклонение от вертикали определяли с помощью отвесов, от горизонтали – с помощью ватерпаса или просто налитой в чашу жидкости, направление ветра – по повороту флюгера или по направлению распространения дыма из дымовых труб и т.п. Согласно нашей систематизации отвес и флюгер являются сенсорами углового, а ватерпас – сенсором линейного перемещения. Даже ход времени измеряли механическими сенсорами: по наблюдаемому движению солнца, луны или звезд на небосводе, по перемещению тени на солнечных часах (всё это – сенсоры углового перемещения), по истечению воды или высыпанию песка из сосуда через узкое отверстие (это – сенсоры линейного перемещения) и т.п. Позднее стали пользоваться механическими маятниковыми часами. Термометры тоже долго были только механическими, поскольку в них использовалось явление теплового расширения тел, и температуру определяли по

механическому перемещению столбика жидкости в узком капилляре. Механическим сенсором является, например, и компас.

Последние два примера наглядно демонстрируют разницу между возможными подходами к классификации сенсоров. Если их классифицировать по назначению или по измеряемой физической величине, то обычный ртутный или спиртовой термометры являются температурными сенсорами, а компас - магнитным сенсором. Если же классифицировать по физической природе первичных сигналов, которые возникают в сенсоре, то оба названные вида сенсоров являются механическими: в термометрах первичным сигналом является удлинение столбика жидкости (сенсор линейного перемещения), в компасе – механический поворот магнитной стрелки (сенсор углового перемещения).

Еще в XIX веке изобретатели и мастера конструировали в основном механические сенсоры. Даже приборы для измерения электрических и магнитных величин делали механическими. Для этого использовали поворот рамки или отклонение проводника с током в магнитном поле. В XX веке многообразие видов сенсоров значительно обогатилось, но и ныне механические сенсоры довольно распространены.

2.9. Представление о микросистемных технологиях

Новый этап в развитии механических сенсоров начался в 90-х годах XX века с разработкой и освоением микросистемных технологий (МСТ).

Микросистемные технологии – это технологии группового изготовления микромеханических деталей и устройств вместе с электрическими узлами для их питания, управления и электронными микросхемами для обработки информации.

С этой целью были использованы существовавшие и развиты новые групповые технологические операции и процессы микроэлектроники с интегрированием знаний и методов точной механики и измерительной техники. Созданы системы автоматизированного проектирования микроэлектромеханических интегральных изделий и целых систем на кристалле, которые позволяют существенно сократить сроки разработки изделий, оптимизировать их конструкцию и технологию изготовления.

Напомним коротко лишь названия групповых технологических операций, которые входят в состав МСТ:

- фотолитография (варианты – обычная с использованием видимого света, ультрафиолетовая, рентгеновская, электронная и ионная литографии);
- отмывание, очистка;
- травление (химическое, плазмохимическое, электрохимическое, ионное, анизотропное);
- напыление (вакуумное термическое, ионное, плазменное, магнетронное и т.п.);
- намазывание, пульверизация, наплавление;
- эпитаксия;
- гальваническое или химическое осаждение;
- окисление;
- легирование (диффузия, ионная имплантация и т.п.).

Микросистемные "высокие технологии" развивают ныне уже сотни лабораторий, университетов, научно-исследовательских институтов и промышленных фирм во всем мире. Некоторые из опубликованных в Интернете примеров разработок одной из них – американской лаборатории Sandia National Laboratories (<http://mems.sandia.gov/scripts/images.asp>) – показаны на рис. 2.2.

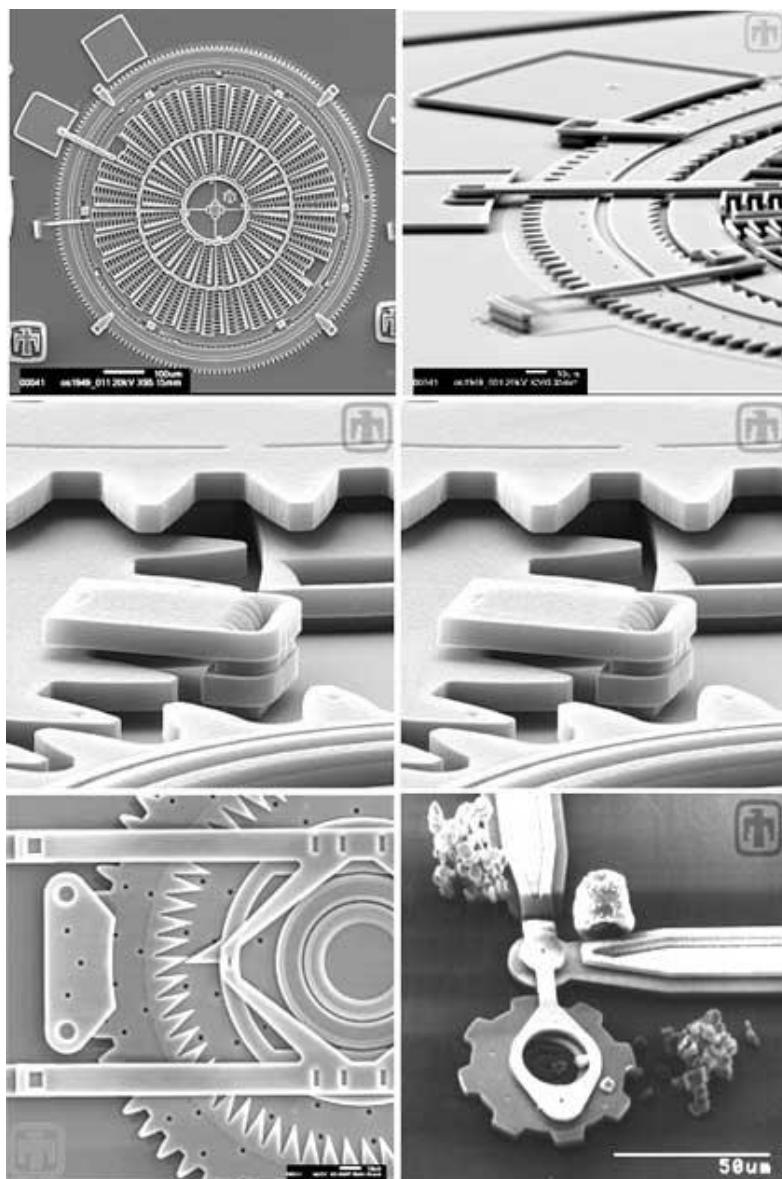


Рис. 2.2. Примеры механических устройств и элементов, изготовленных с помощью микросистемных технологий в Sandia National Laboratories

Слева сверху Вы видите общее изображение механизма храпового колеса диаметром всего лишь 0,8 мм, изготовленного с помощью МСТ. Слева внизу показан весь приводной механизм микродвигателя с зубцами высотой по 10 мкм, на других фотоснимках – разные детали таких конструкций при большем увеличении. Справа внизу на фоне таких деталей для сравнения сфотографированы эритроциты и другие клетки крови человека.

Соответствующие технологии называют "микросистемными" потому, что они позволяют формировать на одной подложке как микроэлектронные, так и оптические, оптоэлектронные, микромеханические, электрохимические и др. устройства, создавая довольно сложные системы, которые принято называть МЕМС (микроэлектромеханические системы, – Microelektromechanical Systems). В США, например, с помощью таких технологий создан прекрасно функционирующий миниатюрный самолет массой до 80 г (вместе с топливом), предназначенный для проведения дистанционных видеонаблюдений с высоты птичьего полета. Самолет этот имеет размах крыльев 15 см, развивает скорость до 70 км/ч, несет на себе 2 видеокамеры массой по 2 г каждая с электроникой, которая обеспечивает радиопередачу видеоизображений на расстояние до 2 км. Продолжительность автономного полета, обусловленная запасом топлива, может составить до 30 мин.

Микросистемные технологии являются "высокими технологиями", т.е. сложными, прецизионными, наукоёмкими, требуют для своего осуществления применения дорогого высокоточного оборудования, высококачественной производственной среды, высочайшей культуры производства. Но благодаря тому, что тысячи или даже миллионы компонентов изготавливают одновременно, в едином групповом технологическом процессе, – благодаря этому изделия имеют приемлемую стоимость при очень высоких технических характеристиках.

2.10. Деформационные чувствительные элементы

Наиболее известными деформационными чувствительными элементами являются **деформационные чувствительные элементы** для измерения температуры, силы и давления. В производственных условиях для слежения за температурой с целью её регулирования преимущество обычно отдают **биметаллическим чувствительным**

элементам. Они представляют собой биметаллические полоски, которые состоят из двух прочно соединенных между собой слоев металлов с существенно отличающимися температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР). При повышении температуры один из металлов удлиняется больше, другой – меньше. В результате биметаллическая полоска выгибается в сторону металла с меньшим ТКЛР. Появляется первичный сенсорный сигнал – изменение изгиба, означающий "изменение температуры". Так в данном случае "рождается" информация. Далее деформационный сигнал можно использовать разными способами.

В термостатах и автоматических регуляторах температуры с электронагревателями выгибание биметаллической пластины используют непосредственно для автоматического замыкания или размыкания электрической цепи, через которую электрическая мощность подается в нагреватель. При достижении заданной температуры величина изгиба достигает такой степени, что электрическая цепь нагревателя автоматически размыкается, и дальнейшее нагревание прекращается. Настройка на нужную температуру осуществляется регулировкой взаимного положения контактов. Когда температура снижается, то изгиб биметаллической пластины уменьшается, и контакт снова автоматически замыкается. Выделение тепла в нагревателе возобновляется, падение температуры прекращается, и она опять начинает повышаться. Биметаллическая пластина выполняет в данном случае функции не только чувствительного элемента, но и **актуатора**.

Актуатор – это устройство, которое активно реагирует на поданный сигнал, совершая какое-то действие.

В данном примере биметаллическая пластина–актуатор замыкает или размыкает электрическую цепь. Промышленно выпускаются относительно дешевые отрегулированные биметаллические термореле, которые могут пропускать и коммутировать электрический ток силой до 16А, обеспечивая высокую точность регулирования температуры . Один из таких регуляторов – термореле ТК-52 – показан на рис. 2.3, а.

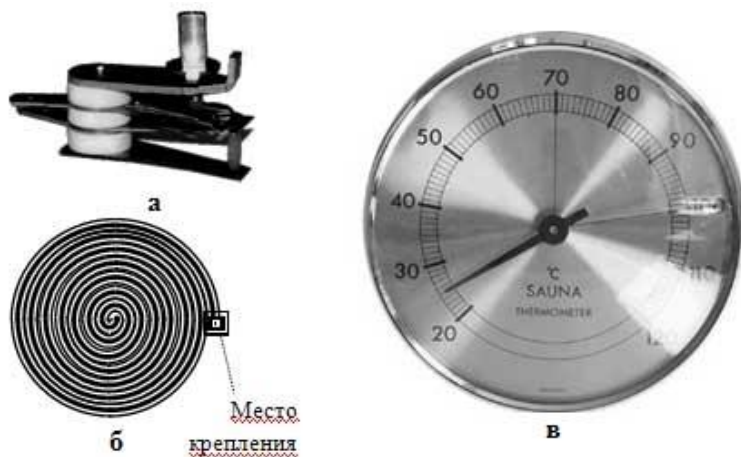


Рис. 2.3. а) Биметаллическое термореле ТК-52; б) к объяснению принципа действия биметаллической спирали; в) внешний вид спирального биметаллического термометра "Сауна"

Выгибание биметаллической пластины можно использовать не только для коммутации электрических цепей, но и средствами точной механики преобразовать далее, например, в отклонение стрелки на циферблате с температурной шкалой. Чтобы повысить чувствительность такого термометра и одновременно упростить и удешевить его конструкцию, применяют биметаллические спирали с большим количеством витков (рис. 2.3, б). Такая плоская спираль с повышением температуры раскручивается, а при снижении – скручивается гораздо больше, чем отдельная полоска. Внешний вид одного из промышленных термометров, использующих биметаллическую спираль, показан на рис. 2.3, в.

При измерениях давления жидкости или газа в качестве чувствительных элементов часто используют механические устройства, которые деформируются под действием давления. Наиболее употребительные из них – трубки Бурдона, сильфоны и упругие мембраны – показаны на рис. 2.4. Принципы их действия объясняют рис. 2.4 (а, б, в). Трубка Бурдона (рис. 2.4, а) – это пустая внутри упругая трубка с овальным или прямоугольным (но только не круговым) сечением, согнутая в кольцо. Свободный конец трубки герметически закрыт, а другой конец механически закреплен и

соединен с объемом, в котором измеряется давление. Когда давление внутри трубки превышает внешнее давление, то оно распиная трубку, она начинает раскручиваться – тем больше, чем больше измеряемая разность давлений. Этот принцип еще в 1848 г. изобрел французский ученый Э. Бурдон, в честь которого и названа трубка. Принцип этот используется и в известной детской игрушке – скрученном резиновом или бумажном "языке", который при надувании раскручивается, значительно удлиняясь. Движение свободного конца трубки через соответствующий механизм передается на стрелку (для оптического считывания) или на ползунок потенциометра либо конденсатора переменной емкости (для превращения в электрический сигнал). Одна из возможных конструкций манометра показана на рис. 2.4, г. Здесь 1 – свободный конец трубки Бурдона, 2 и 3 – передаточный механизм, 4 – стрелка, 5 – шкала давлений.

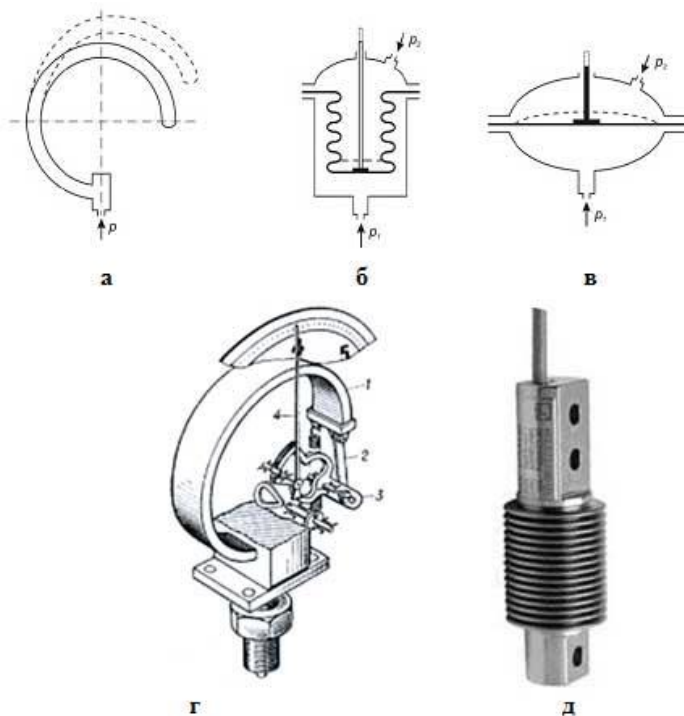


Рис. 2.4. Механические деформационные элементы, чувствительные к давлению: а и г – трубка Бурдона; б и д – сильфон; в – мембрана

Для расширения диапазона измеряемых давлений и повышения точности измерений часто используют не один виток трубки Бурдона, а 10-30 витков, свернутых в спираль. При этом удается перекрыть диапазон давлений от 1 Па до 10^5 Па и обеспечить точность измерений от 4% до 0,1%. В зависимости от примененных материалов трубки и механизма передачи такой сенсор давления может работать при температурах до 500 deg C и даже выше.

Интересным вариантом применения трубки Бурдона являются миниатюрные спиральные трубки из синтетического материала парилена. Спираль радиусом 1 мм из 10 витков такой трубки в экспериментах показала довольно высокую чувствительность к изменению давления среды, в которой она находится. В

изопропиловом спирте чувствительность спирали составила 0,22 deg /мм рт. ст. (спираль раскручивается на 0,22 deg при росте давления на 1 мм рт. ст.), в воде – 0,13 deg /мм рт. ст. Благодаря тому, что парилен является биологически совместимым материалом, такие мини-спиральки предлагается имплантировать в глаза людей, уже страдающих или рискующих заболеть глаукомой, – с целью постоянного мониторинга их внутриглазного давления. Величину давления легко определить с применением обычных оптических инструментов окулистов. Для этого достаточно посмотреть в глаз и оценить степень раскручивания имплантированной в глаз париленовой микротрубки Бурдона.

Сильфон (рис. 2.4, б, д) – это эластичная гофрированная трубка, внутри и извне которой создаются разные давления: одно из них – измеряемое, другое – опорное. Чем больше превышение давления внутри над давлением извне сильфона, тем больше он растягивается. Благодаря гофрированным складкам деформация сильфона не приводит к потере герметичности. К подвижному торцу сильфона прикрепляют шток, который превращает деформацию сильфона в линейное перемещение. Сильфоны чаще применяют в сенсорах дифференциального давления. Иногда их используют также и как деформационный чувствительный элемент, реагирующий на приложенную силу. Для этого в недорогих весах и динамометрах сильфон герметически закрывается с обеих сторон.

Для измерения веса и силы часто используют и другой деформационный чувствительный элемент – пружину. Поскольку она

хорошо всем известна, то на рис. 2.4 не показана. Пружины в качестве чувствительного элемента используют обычно лишь в пределах линейной упругой деформации, когда выполняется известный закон Гука:

$$\Delta l = kFl \quad (2.1)$$

где k – коэффициент упругости, F – приложенная сила, l – длина ненагруженной пружины, Δl – величина растяжения или сжатия пружины.

Мембрана (рис. 2.4, в) – тонкая упругая гибкая перегородка между двумя объемами с разным давлением. Мембрана выгибается в сторону объема с меньшим давлением, причем ее перемещение тем больше, чем больше разность давлений. Диапазон измеряемой разности давлений зависит от коэффициента упругости мембраны. К месту наибольшего прогиба крепят шток, который превращает деформационный сигнал в линейное перемещение и приводит в действие механизм отсчета дифференциального давления.

Спектр деформационных чувствительных элементов не исчерпывается лишь контролем и измерением температуры и давления. Их применяют, например, также для контроля и измерения крутильных моментов. В этом случае используется *упругая деформация кручения*. В качестве чувствительного элемента часто используют кварцевые нити. Возможно, еще со школы Вы помните замечательные опыты П.Н. Лебедева (Москва, 1900 г.) по измерению ничтожного давления света. Изобретенный им сенсор (рис. 2.5) состоял из легчайших "крылышек" 1, изготовленных из тонкой слюды и подвешенных на тонкой нити 2 из плавленого кварца.

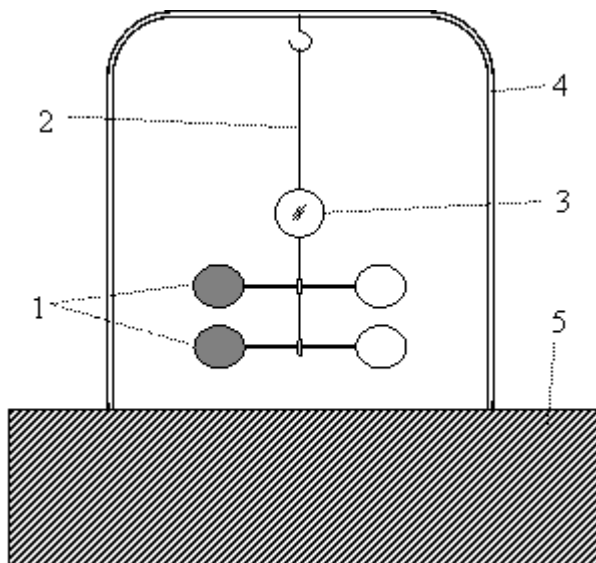


Рис. 2.5. Принцип действия сенсора светового давления П.Н. Лебедева: 1 – "крылышки"; 2 – кварцевая нить; 3 – зеркальце; 4 – стеклянный вакуумный колпак; 5 – защищенная от вибраций станина

Одна из слюдяных пластинок была прозрачной или зеркальной, вторая – зачернена. Когда на крылышки падал яркий свет, его давление на разные половинки крылышек было разным. В результате нить закручивалась на угол, при котором возникающий момент силы упругости точно компенсировал крутящий момент, создаваемый световым давлением. Для измерения весьма малых крутильных деформаций на нити укреплялось также легкое зеркальце 3. При его повороте отраженный световой "зайчик" перемещался. И на достаточно больших расстояниях от зеркальца перемещения "зайчика" можно было точно измерять. Чтобы исключить влияние движений воздуха, нить 2 подвешивалась под стеклянным колпаком 4, внутри которого создавался вакуум. А для исключения помех от вибраций колпак 4 устанавливался на тяжелой станине 5, хорошо защищенной от вибраций.

Объектом наблюдения в данном сенсоре является световой поток, падающий на крылышки 1. Первичный сигнал деформации скручивания нити 2 усиливается с помощью зеркальца 3 и

превращается в сигнал линейного перемещения отраженного от него светового "зайчика". Величина перемещения считывалась физиком-экспериментатором. Теперь эту работу может автоматически выполнять линейка фотоприемников, о которых мы расскажем в разделе "Электрические сенсоры".

На рис. 2.6 показан принцип действия деформационного чувствительного элемента для контроля и измерения еще одной величины – скорости течения. В потоке жидкости или газа 1 на шарообразную мишень 2 действует сила, пропорциональная квадрату скорости потока. Мишень крепится к гибкой упругой "ножке" 3, второй конец которой прикреплен к неподвижной опоре 5. Чем больше скорость потока, тем больше выгибается ножка. Этот первичный сигнал деформации превращается в электрический сигнал с помощью встроенных в ножку тензорезисторов 4. О них мы также расскажем в разделе "Электрические сенсоры". На один из тензорезисторов действует сжимающее, а на другой – растягивающее усилие. Электрические сигналы передаются наружу через проводники, пропущенные внутри тела "ножки".

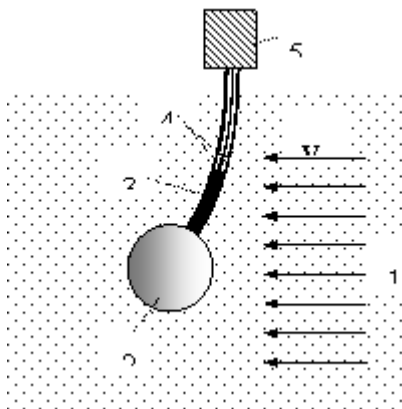


Рис. 2.6. Деформационный чувствительный элемент для контроля скорости течения

Подобный принцип использовали уже и наши предки, которые "на глаз" оценивали скорость ветра по величине изгиба упругих стволов деревьев.

Чувствительные элементы, использующие упругую деформацию кручения или изгиба, применяют тоже лишь в пределах их упругой деформации, обычно даже – в пределах линейной деформации, когда величина деформации пропорциональна приложенному усилию.

2.11. Деформационные интеллектуальные сенсоры

При применении микросистемных технологий из всех выше перечисленных деформационных элементов проще всего реализовать мембраны. Им обычно и отдают предпочтение. Непосредственно в кремниевой мембране формируют и кремниевые тензорезисторы, которые преобразуют механическую деформацию в электрические сигналы. Рядом с миниатюрной мембраной в том же кристалле кремния формируют также и микросхемы, требуемые для считывания и электронной обработки сигналов.

Таким образом создают, например, миниатюрные датчики давления воздуха в автомобильных шинах (рис. 2.7 слева). Их размещают внутри каждой шины возле её штуцера так, чтобы они не мешали эксплуатации шин, их вращению, монтажу, демонтажу, балансированию. Информация из сенсоров передается в центральный блок индикации и сигнализации (рис. 2.7 справа) бесконтактным способом с применением локальной микроволновой радиосвязи. О ней мы расскажем в разделе "Электромагнитные сенсоры".



Рис. 2.7. Система контроля давления и температуры в шинах автомобилей. Слева – микроэлектронный сенсор давления и температуры воздуха в автомобильных шинах. Масса 32 г. Срок службы батареи 5 лет. Справа – центральный блок индикации и сигнализации

Каждый датчик имеет свой индивидуальный код, поэтому от каждого из них независимо принимается своя информация. Центральный блок с микрокомпьютером размещается в кабине водителя и является интеллектуальной частью сенсора. На его индикаторе показан условный вид автомобиля сверху с расположением всех шин и отображаются измеренные значения температуры и давления в каждой шине.

Требуемая периодичность и порядок проверки, желательные единицы измерения температуры и давления (градусы Цельсия или Фаренгейта, единицы давления) и критические значения параметров задает пользователь. В случае выхода контролируемых параметров за заданные безопасные пределы выдается световая и звуковая сигнализация.

Использование таких интеллектуальных сенсоров оказалось настолько эффективным и важным для повышения безопасности движения грузового автотранспорта, что в США, например, принято решение о том, чтобы до конца 2008 г. все автомобили массой свыше 4,5 т обязательно были оборудованы системами мониторинга давления в шинах. Такие же правила, скорей всего, со временем будут введены и в других странах мира.

Следующим примером компактного портативного интеллектуального сенсора с деформационными чувствительными элементами, изготовленными с применением МСТ, может быть и *прецизионный цифровой манометр* давления DPI 740, показанный на рис. 2.8 и рассчитанный на применение как в лабораторных, так и в полевых условиях. С его помощью можно измерять атмосферное давление от 0,75 бар до 1,25 бар и абсолютное давление любого химически не агрессивного газа в диапазонах от 3 кПа до 130 кПа, до 250 кПа и до 360 кПа.



Рис. 2.8. Портативный прецизионный цифровой манометр давления DPI 740. Размер 190x90x36 мм, масса 0,5 кг. Диапазон рабочих температур от –10 С до +50 С. Класс точности 0,02%. Долговременная стабильность 0,01% за год

Высокая точность и стабильность показаний позволили применять его в качестве образцового барометра (вторичного эталона). Наличие микропроцессора сделало возможными автоматический учет влияния температуры, пересчет и высвечивание измеренного значения давления в любых единицах (Па, кПа, гПа, МПа, мм рт. ст., мм вод. ст., кгс/см², бар и т.п. – всего 24 возможности) и в соответствии с любым избранным пользователем шаблоном, пересчет измеренного атмосферного давления в высоту над уровнем моря и т.п.

Результаты измерений с фиксацией даты и времени запоминаются; могут быть вычислены максимальное и минимальное значения давления за любой указанный период. Через интерфейс RS232 сенсор можно соединить с компьютером или с сетью связи. Питание

возможно как от встроенных аккумуляторов, так и от обычной электросети.

Следующий пример – это *портативные цифровые калибраторы давления* РМ110, показанные на рис. 2.9. Они предназначены для поверки и калибровки средств измерения давления (визуальных и записывающих манометров, реле давления и т.п.). Для этого, кроме цифрового манометра, в состав калибратора входит также ручной насос с точным регулированием давления. Пневматический ручной насос позволяет создавать и регулировать давление до 2 МПа, гидравлический ручной насос – до 20 МПа. В состав сенсора входит также измеритель температуры, который нужен для точной термокомпенсации погрешностей измерения давления. Калибратор способен фиксировать не только статическое давление, но и кратковременные скачки давления длительностью от 50 мс. Имеются встроенная память и интерфейс RS232.



Рис. 2.9. Портативные цифровые калибраторы давления РМ110L и РМ110Н. Размер цифрового манометра 98х92х33 мм, масса 0,5 кг. Диапазон рабочих температур от –10 С до +50 С. Класс точности 0,05 %. Долговременная стабильность 0,01% за год

Сигнал деформации мембраны, в том числе и микроминиатюрной, можно превращать в электрический сигнал не только с помощью тензорезисторов, но преобразовывать и другими способами. На рис. 2.10 для примера показана конструкция чувствительного к изменениям давления деформационного элемента, который работает по принципу интерферометра Фабри-Перо.

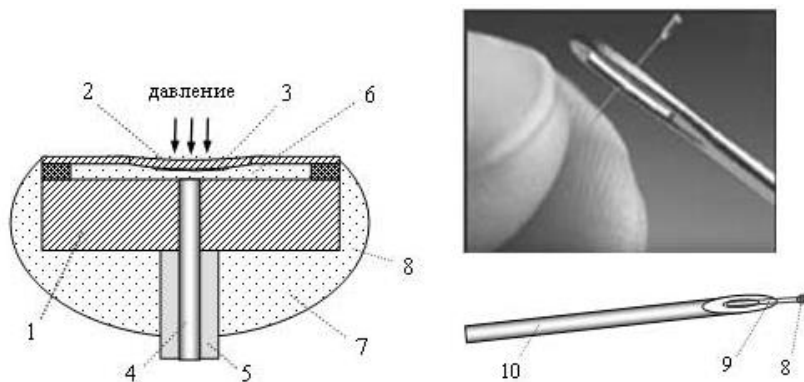


Рис. 2.10. Микроминиатюрный мембранный датчик давления. Слева – конструкция, справа – внешний вид и способ применения

Над подложкой 1 сформирована тонкая мембрана 2, на которую снизу нанесена зеркально отражающая свет пленка 3. Полупрозрачный зеркальный слой нанесен и на торец оптического волокна 4. Между ним и пленкой 3 образуется оптический резонатор, который находится внутри герметически закрытой полости 6, заполненной газом. Если давление извне мембраны превосходит давление в полости 6, то мембрана несколько прогибается внутрь, и расстояние между ней и волокном уменьшается. По оптическому волокну в резонатор вводится монохроматический свет, который, многократно отражаясь от зеркальных поверхностей, интерферирует сам с собой. Поэтому интенсивность отраженного обратно в оптическое волокно света существенно зависит от положения мембраны, и таким образом – от внешнего давления.

Фирма FISO Technologies (<http://www.fiso.com>), используя микросистемную технологию, выпускает такого рода чувствительные элементы с внешним диаметром всего лишь 0,55 мм. Внешний вид

чувствительного элемента показан на рис. 2.10 справа вверху на фоне пальцев, которые его держат за оптическое волокно, и ушка иглы, сквозь которое он пройдет.

С помощью иглы-катетера 10 диаметром меньше 1 мм, показанной справа внизу, этот миниатюрный датчик давления 8 и тонкое гибкое оптическое волокно 9 можно ввести в исследуемый объем и контролировать там изменения внутреннего давления. Для этого оптическое волокно связано с интеллектуальным сенсором, в котором под управлением микропроцессора включается источник монохроматического света, вводимого в волокно, измеряется интенсивность обратно отраженного светового потока, по калибровочным данным вычисляется внешнее давление на датчик и выводится на дисплей. В медицине, например, такие сенсоры применяют для контроля внутричерепного давления, для измерений давления крови в легочных артериях, куда иным способом невозможно добраться. Такие интеллектуальные сенсоры находят многочисленные применения также и в других областях науки и техники.

В описанном интеллектуальном сенсоре первичный деформационный сигнал мембраны многократно преобразуется. Сначала в резонаторе Фабри-Перо он преобразуется в оптический сигнал, затем в фотоприемнике – в аналоговый электрический. После аналого-цифрового преобразователя сигнал превращается в цифровой код, а затем на дисплее – в оптическое изображение. Такие многократные преобразования сигналов – не редкость. Они типичны для интеллектуальных сенсоров. Но для систематизации таких сенсоров важна природа именно первичного информационного сигнала.

Краткие итоги

Механические сенсоры по физической природе чувствительных элементов и возникающих в них первичных сигналов подразделяют на следующие виды: деформационные сенсоры, сенсоры линейного и углового перемещения, акселерометры, вибрационные и хроматографические сенсоры.

В последние десятилетия были развиты и промышленно освоены микросистемные технологии (МСТ) – технологии группового изготовления микромеханических деталей, узлов и целых устройств вместе с электрическими цепями для их питания, управления и с

электронными микросхемами для обработки информации. С этой целью использованы существовавшие и развиты новые групповые технологические операции и процессы микроэлектроники с интегрированием знаний и методов точной механики и измерительной техники. Созданы системы автоматизированного проектирования микроэлектромеханических интегральных изделий и комплектных систем на кристалле. МСТ открыли новый этап в развитии механических сенсоров. МСТ являются "высокими технологиями", для их осуществления требуются дорогое высокоточное оборудование, обученный персонал, высокочистая производственная среда. Но благодаря тому, что тысячи или даже миллионы компонентов изготавливаются одновременно, в едином групповом технологическом процессе, – благодаря этому изделия имеют приемлемую стоимость при очень высоких технических характеристиках.

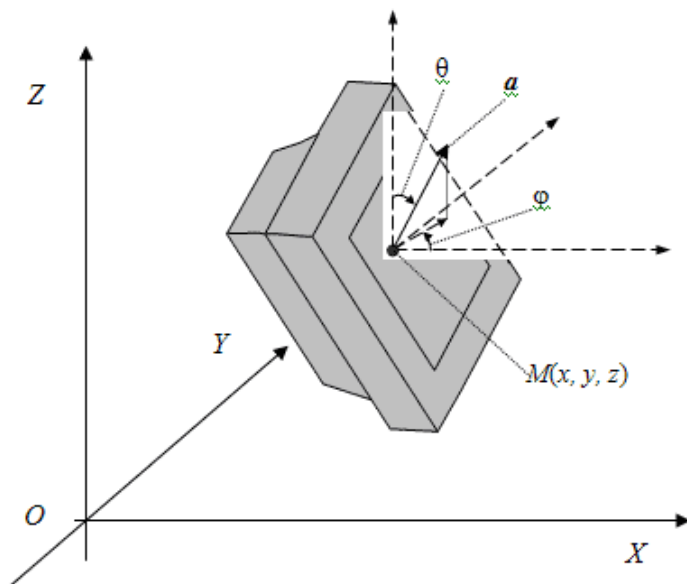
Наиболее популярными деформационными чувствительными элементами являются биметаллические пластины, спирали, мембраны, пружины, сильфоны, трубки Бурдона. Используются также элементы с упругими деформациями изгиба и кручения. Примерами уже хорошо зарекомендовавших себя деформационных интеллектуальных сенсоров являются: система автоматического контроля давления в шинах большегрузных автомобилей; прецизионные цифровые манометры и высокоточные калибраторы давления; сенсоры для измерения давления внутри труднодоступных полостей.

3. Механические сенсоры перемещения. Принципы работы глобальной системы ориентирования и сенсоры GPS

3.1. Механические сенсоры перемещения

Как известно из механики, положение тела в пространстве описывается тремя координатами (x , y , z), если его можно представить в виде материальной точки. Эти координаты характеризуют положение центра масс тела. Если же важна еще и ориентация тела в пространстве, то её можно охарактеризовать двумя углами (θ , φ), изображенными на рис. 3.1. Здесь α – единичный вектор ориентации тела, θ – угол между этим вектором и осью OZ , φ – азимутальный угол.

В механических сенсорах перемещения первичные сигналы о состоянии исследуемого объекта или процесса возникают в виде изменений координат центра масс тела (x, y, z) или углов поворота тела (θ, φ) относительно некоторой системы координат.



Координаты, характеризующие положение тела в пространстве: (x, y, z) – координаты центра масс; (θ, φ) – углы ориентации.

Рис. 3.1.

Такие сигналы возникают, в первую очередь, в системах, которые сами перемещаются (вращаются, наклоняются), или в системах, в которых одни узлы либо детали перемещаются относительно других. Например, перемещение свободно парящего в небе воздушного шара (без двигателя) является информационным сигналом о направлении и величине скорости ветра на соответствующей высоте. Перемещение предмета, плывущего с водой и неподвижного относительно неё, является сигналом о направлении и скорости течения на поверхности или на определенной глубине реки, озера, океана. Во многих сферах жизни очень важной сама по себе является информация о

местонахождении и перемещении людей, транспортных средств, грузов, животных, узлов машин и других объектов.

На сегодняшний день разработано уже довольно много разнообразных методов получения такой информации. Это – визуальное наблюдение, оптические измерения расстояний и углов, радиолокация, звуковая локация, прохождение мимо расставленных вех и т.п. Они будут рассмотрены в соответствующих разделах. В данной лекции мы ознакомим Вас сначала с одним из выдающихся достижений последних десятилетий в этой области – с глобальной системой ориентирования (Global Positioning System – **GPS**).

3.2. Принципы работы глобальной системы ориентирования

Основой этой системы, её "космической составляющей", является совокупность 28 искусственных спутников Земли, которые вращаются вокруг нашей планеты на высоте около 20 тыс. км в семи разных плоскостях по 4 спутника на каждой (рис. 3.2). Период их обращения составляет приблизительно 12 часов. Эти навигационные спутники несколько раз в секунду передают радиосигналы с информацией о своих точных координатах и текущем моменте времени. Параметры орбит рассчитаны так, что в любой момент времени из любой точки на поверхности Земли видны от 5 до 12 спутников. Для работы системы достаточно было бы видеть 4 спутника и иметь в целом 24 спутника. Дополнительные видимые спутники значительно повышают надежность работы системы и точность определения координат.

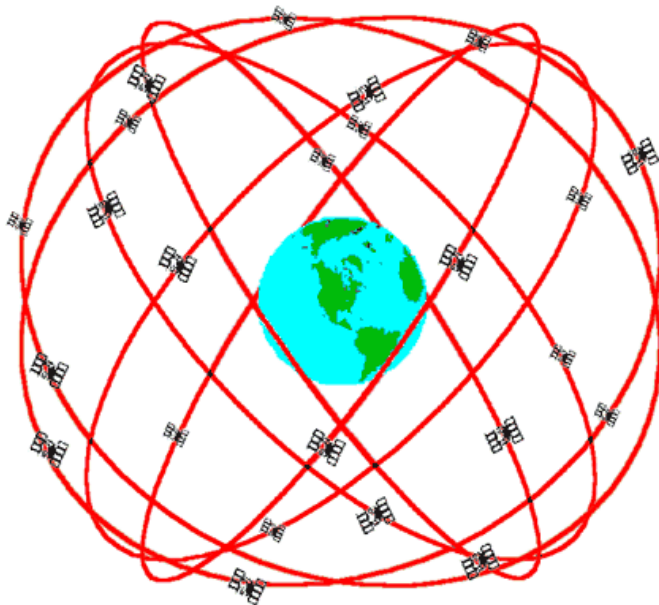


Рис. 3.2. Схема расположения орбит искусственных спутников Земли, которые входят в систему GPS. Каждый рассчитан на 10 лет работы

Совокупность навигационных спутников GPS образно называют "созвездием, искусственно созданным человеком". Система GPS была разработана по заказу Министерства обороны США сначала исключительно для военных применений. В целом на её создание затрачено около 12 млрд. долларов США и несколько десятилетий времени. Первый спутник этой системы был запущен в 1978 году. С 1989 года стали запускать навигационные спутники нового поколения. И лишь со середины 90-х годов XX в. система заработала в полную силу. Ныне космическая составляющая системы GPS по-прежнему поддерживается Министерством обороны США, хотя с 2000 г. она открыта и для гражданского использования.

На каждом навигационном спутнике установлены высокоточные эталонные часы (для надежности даже по двое часов разных типов). За синхронизацией и точностью хода всех часов на спутниках GPS и за стабильностью их орбит неустанно следит сеть контрольно-измерительных станций, расположенных по всему земному шару. На

каждом спутнике размещены также компьютер, рассчитывающий его точные координаты в момент посылки радиосигнала, и радиопередатчик, работающий в диапазоне частот выше 1 ГГц. В новых моделях навигационных спутников имеется также и двигатель для точной корректировки орбиты. Через достаточно короткие промежутки времени спутник передает в эфир в предусмотренном формате свой номер, показание своих часов и свои текущие координаты. В качестве системы отсчета GPS взяты общепринятые географические долгота и широта, высота над уровнем моря и так называемое "время GPS" – время по эталонным часам.

Благодаря наличию такой системы спутников задача точного определения географических координат объектов на земном шаре значительно упростилась. Для этого достаточно иметь при себе соответствующий интеллектуальный сенсор – так называемый "GPS-приемник" (или "**GPS-ресивер**"). В его состав входят многоканальный приемник радиосигналов от спутников GPS, микропроцессор и точные собственные часы, которые отсчитывают время GPS. Конечно, чтобы удовлетворить требования мобильности, портативности и приемлемой стоимости, часы эти проще и не так точны, как используемые на спутниках. Поэтому их небольшая временная поправка рассматривается тоже как одна из неизвестных величин. Получив сигналы от 4-х спутников GPS, микропроцессор определяет времена запаздывания каждого из сигналов, вычисляет соответствующее расстояние до каждого спутника и решает систему из 4-х алгебраических уравнений с четырьмя неизвестными: три пространственные координаты GPS-приемника и временная поправка его часов. Вычисленные координаты выдаются пользователю. Если принимаются сигналы более чем от 4-х спутников, то и число уравнений оказывается больше 4-х, что позволяет значительно уменьшить погрешность вычислений, используя алгоритмы минимизации среднеквадратического отклонения. GPS-приемники массового пользования обеспечивают погрешность определения своих географических координат в пределах $\pm 10-20$ м, а высокоточные GPS-приемники для геодезических измерений – не больше нескольких сантиметров!

Укажем, что в 2001 году Европейская комиссия и Европейское космическое агентство приняли решение о создании собственной системы спутниковой навигации Galileo. Ее космическая часть будет состоять из 30 спутников, которые для массовых потребителей обеспечат точность определения координат до 1 м.

Российская Федерация продолжает развивать свою независимую систему спутниковой навигации ГЛОНАСС, которая сначала тоже была предназначена лишь для военных целей, но теперь станет доступной и для гражданских лиц.

3.3. Сенсоры GPS

Описанные GPS-приемники – это интеллектуальные сенсоры, первичным сигналом для которых является пространственное положение самого приемника в системе координат GPS. Ведь именно оно определяет времена запаздывания радиосигналов от навигационных спутников. Т.е. по физической природе первичного сигнала GPS-приемники являются механическими сенсорами. А вот по принципу действия их часто относят к электромагнитным сенсорам.

Дальнейшим существенным их развитием являются " GPS навигаторы ". Это специализированный навигационный прибор, который обеспечивает ориентацию в незнакомой местности, помогает планировать наилучшие маршруты движения, выбирать ориентиры, запоминает важную для Вас информацию о маршруте и так далее. Наряду с GPS приемником, в его состав входят также цветной дисплей и память с картографической информацией.

Можно выделить такие 3 *группы* GPS навигаторов: портативные (*карманные*), *автомобильные* и *профессиональные*.

Слева на рис. 3.3 показан пример карманного GPS навигатора. Такие навигаторы обычно имеют небольшие габариты и массу, водонепроницаемый, стойкий против ударов корпус и рассчитаны на туристов, рыбаков, геологов, путешественников, охотников, грибников и других массовых пользователей. Цветной дисплей в таких навигаторах небольшой, но всё же достаточный для вывода на него GPS карты местности. Для хранения картографической информации применяют флэш-память с картографической информацией о нужном Вам регионе, которую надо приобретать отдельно. Если она имеется, то GPS навигатор после автоматического определения своих географических координат выведет на экран дисплея карту участка окружающей данный географический пункт местности в заданном Вами масштабе. На карте будет указано место Вашего пребывания и самые приметные ориентиры на местности, если таковые имеются. По Вашему указанию GPS навигатор может запомнить и показать на карте

весь Ваш маршрут с отметками времени, зафиксировать координаты мест, которые Вы намерены еще раз посетить в будущем. Если Вы зададите координаты или укажете на карте место, к которому Вы направляетесь, то навигатор рассчитает и покажет на карте оптимальный маршрут движения с учетом имеющихся на местности препятствий (реки, ручьи, болота, овраги, горы, запретные зоны и т.п.).



Рис. 3.3. Примеры GPS навигаторов: слева – портативный; справа – автомобильный

Некоторые портативные GPS навигаторы оснащены также электронными барометром и компасом, которые помогут Вам правильно оценить погоду и сориентироваться по сторонам света.

Автомобильные GPS навигаторы существенно крупнее, имеют больший размер экрана (рис. 3.3 справа), размещаются на панели управления автомобилем. Их картографические возможности значительно расширены: имеется богатый набор масштабов карты, указывается ценная для автомобилистов информация о размещении стоянок, автоинспекций, станций заправки горючим, ограничений скорости и т.п. Дисплей, как правило, сенсорный, имеются средства голосовых подсказок. Действуют программы прокладки

альтернативных и расчета оптимальных маршрутов. Измеряя доплеровские сдвиги частоты сигналов от спутников, автомобильный навигатор может вычислить направление и скорость движения автомобиля и вывести эти данные на дисплей, своевременно сигнализировать водителю об опасности превышения предельно допустимой скорости.

Профессиональные GPS навигаторы используются в авиации, на океанских, морских и речных судах, локомотивах, автобусах, на больших грузовых автомобилях дальнего следования. Кроме указанных уже выше функций, они также поддерживают постоянную радиосвязь со своими диспетчерскими пунктами, не загружая экипаж, собирают и автоматически передают диспетчерам информацию от некоторых важных сенсоров. Благодаря этому диспетчеры имеют оперативную и полную информацию о состоянии всей своей транспортной сети, могут своевременно реагировать на непредвиденные ситуации, изменять и оптимизировать маршруты, минимизировать риски, порожние пробеги и т.п.

Уже накоплен положительный опыт применения авиационных GPS навигаторов для *вынужденной "слепой" посадки самолетов*. В этом случае на экран авиационного навигатора крупным планом выводится карта местности с выделением нужной взлетно-посадочной полосы, и на этой карте по данным GPS непрерывно отображается траектория полёта, текущее положение и направление движения самолета. И при отсутствии видимости пилот выполняет посадку, ориентируясь именно на эту карту. Точность посадки зависит от точности GPS определения координат и от точности картографической информации, имеющейся в навигаторе. Точность определения координат в таком навигаторе должна составлять порядка 1 дм. В большинстве случаев отклонения от осевой линии посадочной полосы не превышают 30-50 см. Стоимость навигаторов и своевременного обновления картографических данных о взлетно-посадочных полосах на порядки меньше, чем стоимость современных специализированных систем "слепой" посадки, приобретение которых могут позволить себе только крупные аэропорты.

GPS приемники нашли эффективное применение и *в геодезии* – от общегосударственных и межгосударственных геодезических сетей до обычной инвентаризации земельных участков. Например, одна из французских фирм при составлении кадастра земель бывшей

французской колонии Майоте с помощью технологии GPS сумела выполнить все необходимые геодезические измерения на территории площадью 375 кв. км всего за 15 суток. При работе старыми методами на это ушло бы около 15 лет! В российской организации АО "ЗапУралГИСИЗ" с использованием такой технологии два специалиста-геодезиста за 5 дней выполнили триангуляцию из 15 пунктов всей геодезической сети в г. Уфа. По прежней технологии такую работу выполняла бригада из 5 специалистов не менее чем 2 недели.

GPS приемники позволили также по-новому решить задачу *передвижения слепых людей*. В составе портативного интеллектуального навигатора для слепых, который размещается в рюкзаке человека, GPS приемник вычисляет текущие координаты. На голове у слепого человека в специальном шлеме размещены миниатюрные электронные компас и гироскоп, определяющие направление поворота головы, 4 маленькие видеокамеры и звуковой сигнализатор с передачей звука на кости черепа. Уши остаются свободными, чтобы сохранить важную для ориентации слепых возможность хорошо слышать происходящее вокруг. Слепой человек голосом называет интересующий его пункт назначения. Языковая программа, настроенная на его голос и на множество из 30-40 возможных пунктов назначения, расшифровывает это звуковое сообщение. Далее микрокомпьютер навигатора планирует маршрут и начинает "вести" слепого. Он указывает слепому направление движения посредством имитации звука звонка, исходящего якобы с того направления, в котором следует двигаться. Если голова человека повернута в другом направлении, то он слышит звонок сбоку, поворачивается в сторону звонка и движется в указанном направлении. Портативные видеокамеры постоянно отслеживают окружающую обстановку и своевременно предупреждают слепого о появившихся преградах. На узких улицах и внутри зданий именно они становятся основным источником информации для электронного "поводыря".

Еще одним важным применением GPS приемников стало создание так называемых "трекеров" – интеллектуальных сенсоров для дистанционного определения GPS координат людей или предметов, на которых они установлены. Сфера их применения – это повышение безопасности и ускорение поиска детей, престарелых, больных на амнезию и других людей, теряющих ориентацию, а также животных, похищенных автомобилей, ценных грузов. Один из таких трекеров TR-102 показан на рис. 3.4. В нем применяется высокочувствительный

миниатюрный GPS приемник "SiRF Star III", который воспринимает даже слабые отраженные сигналы от навигационных спутников и способен определять GPS координаты даже при значительном экранировании прямых сигналов зданиями, горами и т.п. Трекер поддерживает прямую мобильную радиотелефонную связь с 10 предварительно запрограммированными телефонными номерами. Каждый из этих абонентов в любое время может связаться с трекером, отправив ему SMS запрос. И трекер в ответном SMS сообщении передаст свои текущие координаты.



Рис. 3.4. Трекер TR-102

Если у запрашивающего имеется компьютер с картографической программой, то она поможет увидеть на экране монитора карту участка местности, в которой находится отслеживаемый объект, и место нахождения трекера. На трекерах, предназначенных для ношения людьми, имеется кнопка экстренного вызова (SOS), при нажатии на которую трекер отправляет на указанные в его памяти 3 телефонные номера сигнал тревоги и SMS сообщение с указанием своих координат. Есть также 3 кнопки быстрого соединения с этими номерами. В память трекера можно занести значение временного интервала, по истечении которого трекер будет отправлять SMS сообщение своих координат автоматически.

3.4. Сенсоры линейного перемещения

Известным видом механических чувствительных элементов, в которых первичный сигнал появляется в форме линейного перемещения, являются *поршни*. Принцип действия поршня показан на рис. 3.5, а. На одной стороне подвижного поршня в герметически закрытой части цилиндра находится газ, а с другой стороны – среда, в которой измеряется давление. Это может быть тоже газ или жидкость. Когда измеряемое давление возрастает, подвижный поршень перемещается, сжимая газ в закрытой части цилиндра до тех пор, пока его давление не уравнивается с внешним. Когда измеряемое давление уменьшается, то поршень перемещается в противоположном направлении до достижения нового состояния равновесия. А движение поршня приводит в действие механизм отсчета давления. На рис. 3.5, б показан один из поршневых манометров, в котором движение поршня механически превращается в поворот стрелки. Связь поршня с узлом отсчета не обязательно должна быть механической, а может быть, например, магнитной или оптической. На рис. 3.5, в показан пример другого поршневого сенсора, предназначенного для контроля и регулирования потока жидкости. В нем подвижный поршень с одной стороны контактирует с жидкостью, поток которой измеряется, а с другой стороны прикреплен к пружине. Если жидкость течет, то по известному закону Бернулли давление в ней уменьшается, что вынуждает поршень несколько смещаться в сторону жидкости. Смещение это тем значительней, чем быстрее поток жидкости. Когда поток жидкости уменьшается, пружина оттягивает поршень назад. Линейные перемещения поршня фиксируются в данном случае с помощью небольшого магнита и датчиков Холла. Сенсор нечувствителен к загрязнениям и к вязкости жидкости. Он может измерять поток жидкости (воды, масла, керосина и т.п.) в диапазоне от 0,4 л/мин до 60 л/мин с точностью до 3%. Небольшая электронная схема, герметически отделенная от гидравлического узла, обеспечивает быструю реакцию на изменения скорости потока. Имеется возможность выдачи аналогового сигнала и сигналов выхода измеренных значений потока за установленные пользователем пределы, отображения величины потока на светодиодном индикаторе.

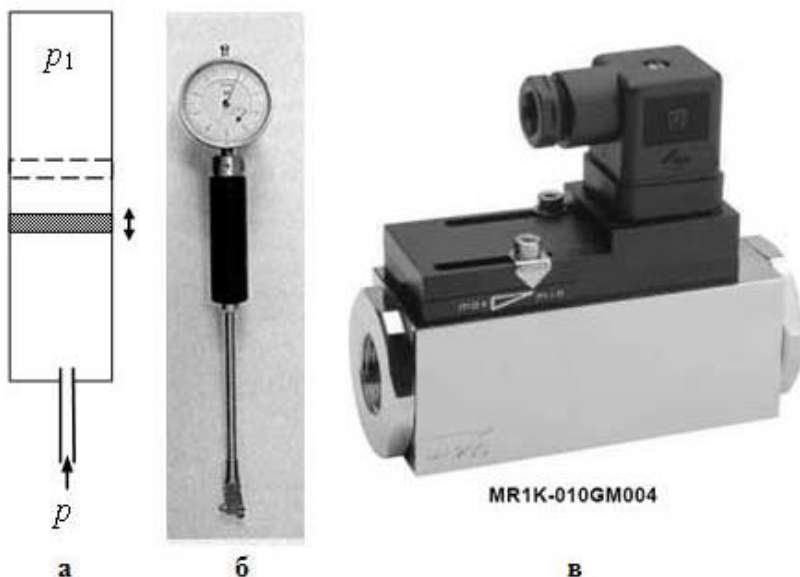


Рис. 3.5. Поршневые сенсоры

Следующим известным механическим чувствительным элементом с линейным перемещением является поплавок. Это один из древнейших видов сенсоров – такой же древний, как ловля рыбы на удочку, когда поплавок используют в качестве сенсора клёва рыбы. В датчиках уровня жидкости используют тот факт, что поплавок перемещается вместе с перемещением поверхности жидкости. А его перемещения могут быть разными способами преобразованы в электрические, визуальные или другие виды сигналов. На рис. 3.6, а например, показан поплавок 1, жестко связанный с подвижной трубкой. При поднятии уровня жидкости, поплавок всплывает, и вместе с ним поднимается трубка. Ее верхний конец виден сквозь прозрачное окошко 2 со шкалой, установленное над резервуаром. В сенсоре, показанном на рис. 3.6, б, поплавок 1 может свободно перемещаться вдоль трубки 3, отслеживая уровень жидкости в резервуаре. Принцип преобразования линейного перемещения поплавка в электрический сигнал раскрывается на рис. 3.6, в, г. Внутри трубки 3 размещена плата с резисторами, последовательно включенными в электрическую цепь, и микропереключателями, которые приводятся в действие магнитным полем.

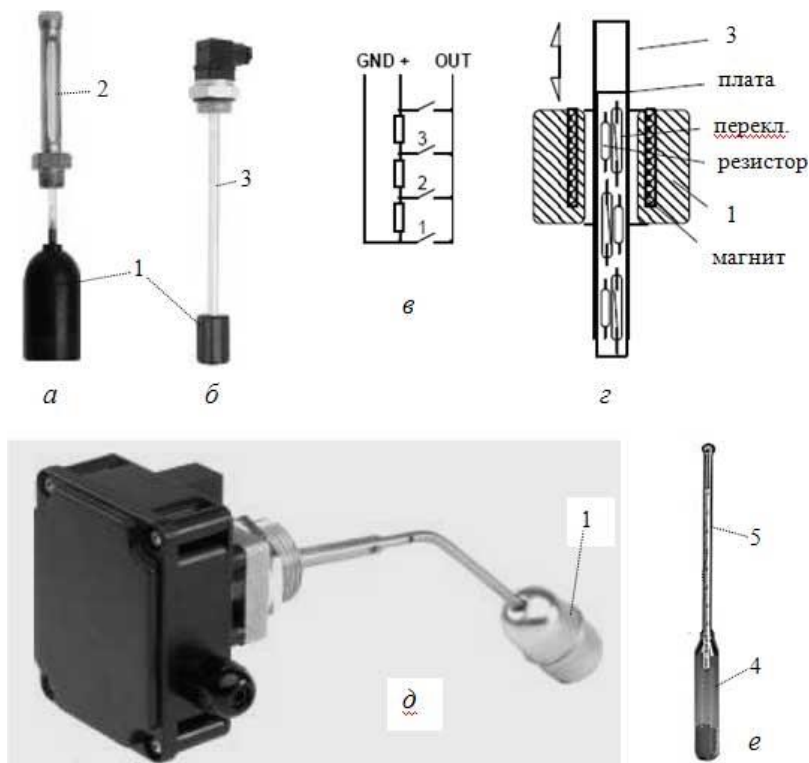


Рис. 3.6. Поплавковые сенсоры: а – с визуальным отображением; б – с электрическим считыванием; в – электрическая схема; г – внутренняя конструкция; д – с механическим замыканием; е – ареометр

Небольшие постоянные магниты размещены в теле поплавка. В каждый момент срабатывает лишь тот переключатель, который располагается внутри поплавка и поэтому подвержен действию магнитов. Сопротивление электрической цепи прямо зависит от местоположения поплавка и, следовательно, – от уровня жидкости.

Еще одна конструкция поплавкового сенсора показана на рис. 3.6, д. Здесь поплавок жестко прикреплен к одному концу трубки, противоположный конец которой закреплен на оси. При повышении уровня жидкости и всплывании поплавка, трубка поворачивается вокруг оси и при некотором уровне жидкости замыкает электрический контакт или перекрывает отверстие, через которое течет жидкость.

Для измерения плотности жидкостей часто применяют *ареометры*. Ареометр состоит из полой стеклянной, металлической или пластмассовой капсулы 4 (рис. 3.6, е), к которой прикреплена тонкая "шейка" со шкалой 5. Капсулу 4 заполняют дробью с таким расчетом, чтобы капсула была полностью погружена в контролируемую жидкость, но не тонула в ней, а плавала, и часть шейки со шкалой 5 выступала над поверхностью жидкости. Согласно закону Архимеда условие плавания ареометра имеет вид:

$$Mg = \rho g V \quad (3.1)$$

где m – масса ареометра, g – ускорение силы тяжести, ρ – плотность жидкости, V – объем части ареометра, погруженной в жидкость. Пусть при некоторой "стандартной" плотности жидкости ρ_0 ареометр плавает в ней, будучи погружен до соответствующей отметки на шкале. Если плотность жидкости будет больше, то объём части ареометра, погруженной в жидкость, уменьшится, и ареометр слегка всплывет – тем больше, чем больше плотность жидкости и чем меньше площадь поперечного сечения "шейки" 5. Если же плотность жидкости уменьшится, то ареометр погрузится в неё глубже. Таким образом, глубина погружения ареометра в жидкость однозначно зависит от её плотности. И вертикальное перемещение шейки ареометра относительно поверхности жидкости является сигналом изменения плотности жидкости. На этом принципе построены и широко применяются

- *спиртомеры* – ареометры для определения объёмного содержания спирта в воде или воды в спирте;
- *сахаромеры* – ареометры для определения содержания сахара в сиропе;
- *солемеры* – ареометры для определения содержания соли в рассоле;
- *кислотомеры* – ареометры для определения содержания кислот в растворе;
- ареометры для определения плотности *молока, морской воды, нефти* и нефтепродуктов, *электролитов* и т. д.

Для определения коэффициентов поверхностного натяжения жидкостей σ используют *капиллярные трубки*, в которых высота поднятия или опускания столбика жидкости h определяется величиной поверхностного натяжения и плотностью ρ жидкости:

$$H=4d\rho g \quad (3.2)$$

где d – диаметр капилляра, g – ускорение силы тяжести.

Примером чувствительных элементов, в которых первичные сигналы появляются в виде линейного перемещения, служат также *жидкости в сообщающихся сосудах*. Одним из примеров является широко известный *ртутный барометр* – сенсор атмосферного давления, устройство и принцип действия которого Вы, несомненно, проходили в школе. Еще один пример чувствительного элемента с линейным перемещением – *подвижная игла "звукоснимателей"*, которая до середины прошлого века широко применялась для "считывания" речи, пения, музыки, записанных на распространенных тогда граммофонных пластинках.

3.5. Сенсоры углового перемещения

Среди сенсоров углового перемещения выделяют 2 группы: сенсоры угла наклона (крена) и сенсоры угла поворота.

3.5.1. Инклинометры

Сенсоры угла наклона называют еще "инклинометрами" (от латинского *incline* – наклоняю). Чаще всего речь идет об угловом отклонении от вертикали или от горизонтальной плоскости. Уже самые древние строители использовали с этой целью *отвесы, ватерпасы* (рис. 3.7, *а, б, в*), позже – *уровни* (рис. 3.7, *в*). В начале XX века начали использовать ртутные выключатели, принцип действия которых показан на рис. 3.7, *г*.

В герметически закрытой капсуле свободно перемещается капля ртути. В капсулу из диэлектрика введены 2 металлических электрода. Когда капсула расположена вертикально, капля ртути находится в центре и электрически соединяет эти электроды. Если же капсула и плата, на которой она закреплена, наклоняются к горизонту на угол, который превышает критический, капля ртути под действием силы тяжести смещается, и электрический контакт разрывается, сигнализируя об опасном крене.

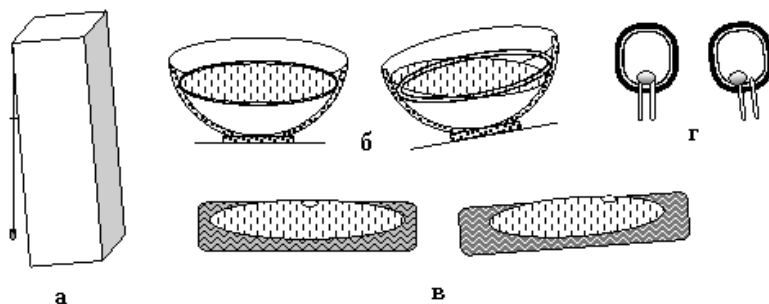


Рис. 3.7. Простейшие сенсоры наклона: а – отвес; б – ватерпас; в – уровень; г – ртутный выключатель

За последние десятилетия созданы и нашли широкое применение более точные инклинометры с электрическими выходными сигналами. На рис. 3.8 показан принцип действия *электролитических* инклинометров.

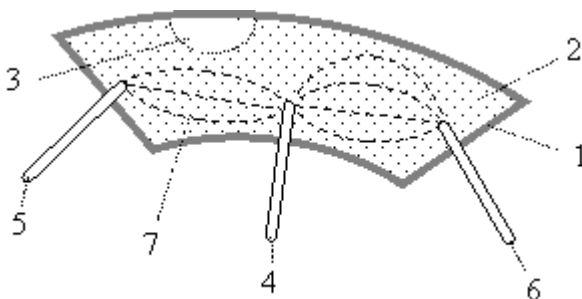


Рис. 3.8. Принцип действия электролитического инклинометра

В несколько выгнутый герметичный корпус 1, например, из керамики или стекла, залит жидкий электролит 2 так, чтобы в нем остался воздушный пузырек 3. В корпус введены три электрода: электрод 4 – в центре, электроды 5 и 6 – на концах корпуса. Когда корпус находится точно в горизонтальном положении, а воздушный пузырек – над центральным электродом, то электрические сопротивления электролита между электродами 5 и 4, 4 и 6 одинаковы. Эти электрические сопротивления включены в плечи мостовой схемы,

выход которой соединен с операционным усилителем. При равенстве сопротивлений мост сбалансирован, и сигнал на выходе равен нулю. Если сенсор слегка наклоняется, то воздушный пузырек смещается в сторону. Электрическое сопротивление между электродами изменяется. Баланс мостовой схемы нарушается, и на ее выходе появляется сигнал той или иной полярности, величина которого пропорциональна углу наклона. Чтобы исключить влияние поляризации электролита, для балансировки мостовой схемы и для ее питания используют переменный ток.

Другой вариант конструкции электролитического инклинометра показан на рис. 3.9. Electroды в виде проволоочек размещены здесь параллельно оси, перпендикулярной к плоскости рисунка, вокруг которой при наклонах вращается сенсор. Жидкий электролит 2 заполняет корпус 1 лишь частично. Когда наклона нет, электрические сопротивления между центральным электродом 3 и боковыми электродами 4, 5 одинаковы. Эти сопротивления включены в плечи мостовой схемы переменного тока. Мостовую схему балансируют так, чтобы напряжение на выходе равнялось нулю. При наклонах сенсора количество электролита с одной стороны возрастает, а с другой уменьшается. Соответственно изменяются и электрические сопротивления. Сигнал на выходе мостовой схемы и после усилителя становится тем большим, чем больше угол наклона. А его полярность указывает направление наклона.

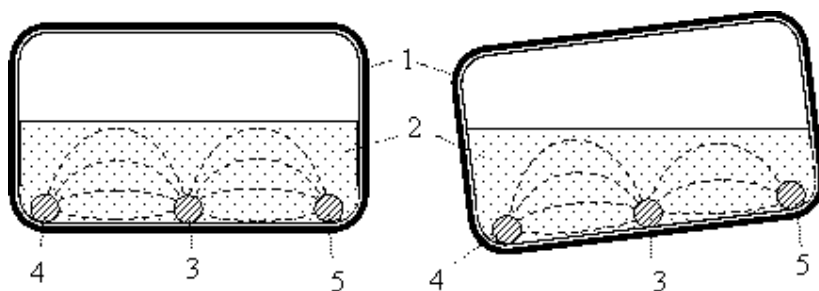


Рис. 3.9. Другая конструкция электролитического инклинометра: 1 - герметичный корпус; 2 - жидкий электролит; 3 - центральный электрод; 4, 5 - боковые электроды

Уже несколько известных в мире фирм выпускают подобные электролитические инклинометры: HL-Planartechnik Gmb, Seika

Mikrosystemtechnik Gmb, Fraba Posital Gmb, ООО "Микросенсорные технологии", НПП "Уралметаллургавтоматика", The Fredericks Company и прочие. Разные серии инклинометров охватывают диапазоны углов наклона от -5 deg до $+5 \text{ deg}$ (с точностью измерения

$0,001 \text{ deg}$), $\pm 10 \text{ deg}$ и $\pm 15 \text{ deg}$ (с точностью измерения $0,002 \text{ deg}$), $\pm 30 \text{ deg}$ (с точностью измерения $0,005 \text{ deg}$) и т.п.

Высокая точность, небольшие размеры, простота установки на объектах обусловили широкий диапазон их применения. Это и контроль за вертикальным положением высотных сооружений, точное определение направления бурения нефтяных, газовых и других буровых скважин, определение уклона автомобильных дорог, железнодорожных путей, штреков в шахтах, крена кораблей, автомобилей, строительных кранов и экскаваторов, измерение деформационного прогиба мостов, опорных балок и т.п.

Выпускаются не только простые, но и интеллектуальные инклинометры со встроенными микропроцессорами, которые выполняют довольно широкий набор функций. Это могут быть одно- и двухкоординатные инклинометры с цифровым интерфейсом, с возможностью автоматического управления предохранительными механизмами, с возможностью задания пользователем критических значений углов наклона, с выдачей предупредительных сигналов и т.п. Некоторые промышленные образцы таких инклинометров показаны на рис. 3.10. Двухкоординатность достигается путем использования двух отдельных одноосных инклинометров, сориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях.

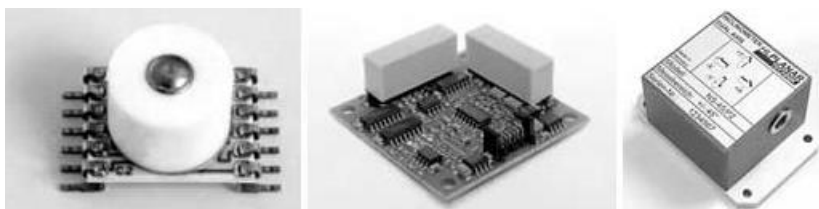


Рис. 3.10. Некоторые образцы двухкоординатных интеллектуальных инклинометров фирмы HL-Planartechnik Gmb

На рис. 3.11 показана другая, уже оптоэлектронная конструкция инклинометра, которая обеспечивает возможность измерения одновременно двух углов наклона во взаимно перпендикулярных плоскостях. В корпусе 1 размещены светодиод 2, кремниевый чип 3 со сформированными в нем фотодиодами или фототранзисторами 4 и усилителями, пластиковое полушарие с прозрачной жидкостью 5 и оставленным в ней воздушным пузырьком 6. Этот пузырек, преломляя свет от светодиода 2, создает область тени 7. Когда корпус 1 расположен горизонтально, тень от пузырька одинаково прикрывает все 4 фотодиода. Если корпус немного наклоняется, то воздушный пузырек смещается. Соответственно по поверхности фотодиодов смещается и тень от него (рис. 3.11 справа). И сигналы от фотодиодов становятся разными. Их измерение позволяет точно рассчитать углы наклона относительно двух ортогональных осей. Для этого сенсор еще в процессе производства точно калибруют при нормальной и при крайних рабочих значениях температуры. Данные калибровки заносят в память микропроцессора.

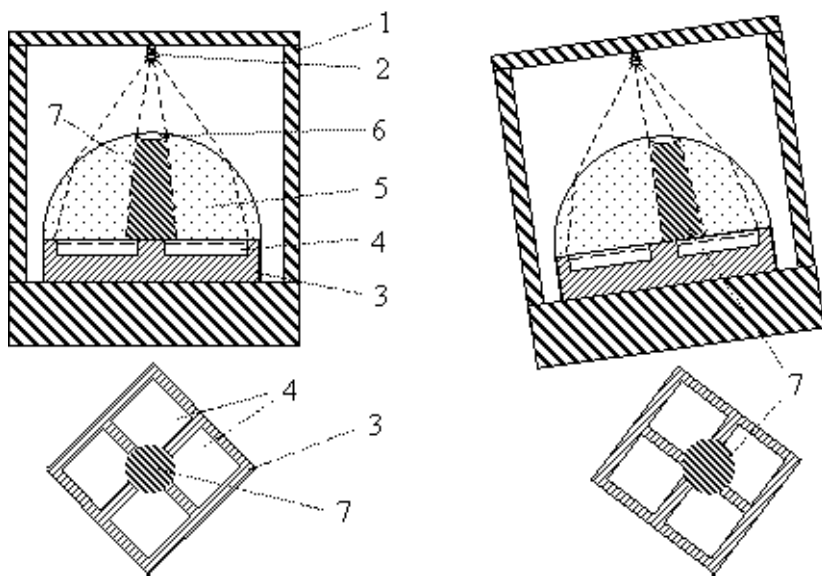


Рис. 3.11. Конструкция и принцип действия двухкоординатного оптоэлектронного инклинометра

Погрешность измерения углов наклона таким способом не превышает 0,01 deg. Это позволяет с большой точностью контролировать форму поверхности, например, зеркал больших телескопов, плоскостность и горизонтальность направляющих рельсов больших высокоточных координатных столов и т.п.

3.5.2. Абсолютные энкодеры

Сенсоры угла поворота прошли большой путь совершенствования. За много столетий развития техники создано немало разных методов и устройств. Сначала это были исключительно механические устройства. В них с помощью механических передач угол поворота или количество выполненных оборотов преобразовывались и отображались в виде перемещения стрелки вдоль шкалы с градусными делениями или в виде числа, формируемого в прозрачном окошке системой колесиков, на ободе которых нанесены цифры.

В середине XX века более популярными стали магнитные и электрические сенсоры угла поворота или количества оборотов. Принцип работы некоторых из них (электрических, магнитных) описан в других разделах книги. Ныне для измерения углов поворота и количества оборотов все чаще стали использовать оптоэлектронные энкодеры. По принципу действия принято различать так называемые "*абсолютные*" и "*инкрементные*" энкодеры.

Абсолютные энкодеры выдают на свой выход цифровые коды, которые отвечают абсолютному значению угла поворота относительно положения, принятого за нуль. Принцип действия абсолютного энкодера, рассчитанного на один оборот, объясняется на рис. 3.12. На вал, закрепленный на двух прецизионных подшипниках и кинематически соединенный с узлом, вращение которого

контролируется, насажен кодовый диск. На последнем выделены кольцевых дорожек с прозрачными и непрозрачными участками. Напротив дорожек с одной стороны диска установлены светодиоды с цилиндрической линзой, а с другой стороны – линейка фотодетекторов, по одному на каждую дорожку. Прозрачный и непрозрачный участки на дорожках подобраны так, чтобы каждому угловому положению кодового диска соответствовал свой уникальный двоичный код на выходах линейки фотодетекторов.

Один из возможных вариантов кодирования диска показан на [рис. 3.12](#) справа. Сфокусированный цилиндрической линзой в радиальную черточку свет от светодиодов проецируется на кодовый диск. Свет свободно проходит сквозь прозрачные участки дорожек и, попав на соответствующие фотодетекторы, вызывает появление сигнала "1" на выходах соответствующих усилителей. Сквозь непрозрачные участки дорожек свет не проходит, и на выходах соответствующих усилителей формируются сигналы "0".

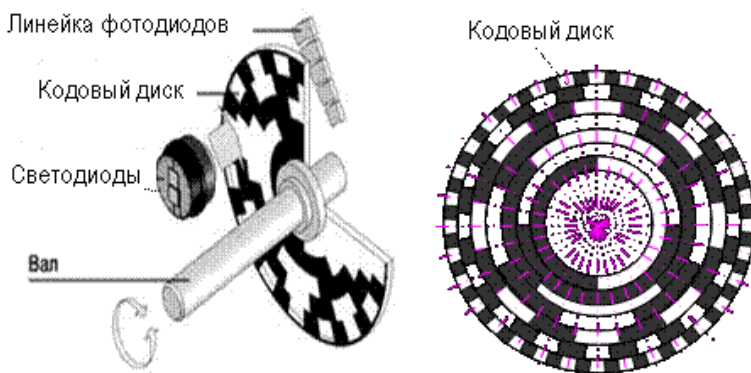


Рис. 3.12. Конструкция и принцип действия абсолютного энкодера

Общее число возможных p -разрядных двоичных кодов составляет 2^p . Поэтому точность определения углового положения диска равняется $(360 \text{ deg} : 2^{n+1})$. В случае использования 10 кольцевых дорожек и 10 фотодетекторов в линейке точность определения угла составляет $0,4 \text{ deg}$, а при использовании 20 дорожек и 20 фотодетекторов – уже $0,0004 \text{ deg}$. При современном состоянии технологии микроэлектроники это оказывается совсем недорогим. И поэтому такие энкодеры стали весьма популярными. Их широко применяют в антенных системах, в астрономии для определения небесных координат звезд, в геодезических приборах, в системах кругового наблюдения и т.д.

Тем не менее, имеется много практических задач, когда кроме знания углового положения в пределах одного оборота надо регистрировать также количество полных оборотов и их направление. Т.е. надо определять углы не в пределах от 0 deg до 360 deg , а в пределах от

- ∞ до +∞. Для этого ныне используют многооборотные энкодеры, принцип действия которых показан на рис. 3.13. С помощью зубчатых или других механических редукторов угол поворота уменьшается в нужное количество раз, и кодовые диски дополнительных степеней отсчитывают количество оборотов в нужных пользователям границах.

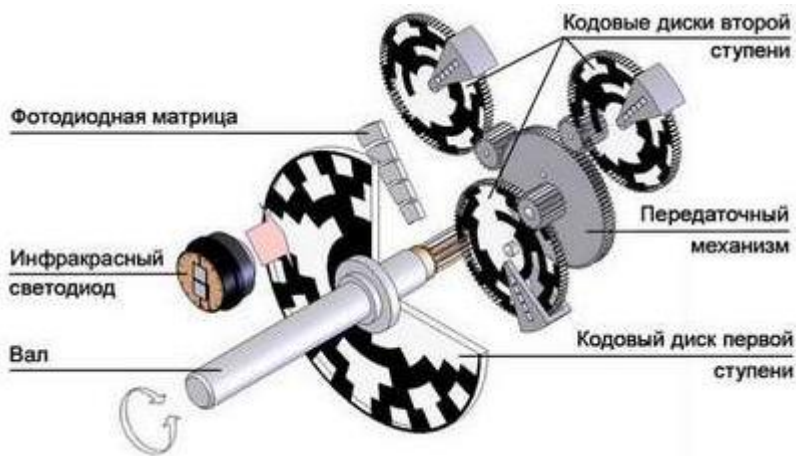


Рис. 3.13. Принцип действия многооборотного абсолютного энкодера

В абсолютных энкодерах информация об угловом положении вала сохраняется даже при отключении питания, поскольку фиксируется физически положением кодовых дисков. При использовании для кодирования положения вала обычного двоичного кода переход к соседнему положению может послужить причиной изменения нескольких бит одновременно. Например, при переходе от 0111 до 1000 изменяются одновременно 4 бита. Поэтому вблизи позиции перехода из-за некоторой несинхронности изменения разрядов могут кратковременно выдаваться неверные коды.

Избавиться этого позволяет кодирование известным *кодом Грея*. В таблице 3.1 приведены коды Грея для натуральных чисел от 0 до 15. Биты, которые изменяются при переходе от предыдущего натурального числа, в таблице 3.1 выделены. Легко видеть, что на каждом шаге изменяется лишь один бит. Для сравнения в правом столбце показаны обычные двоичные коды, которые такого свойства не имеют.

Таблица 3.1. Коды Грея и обычные двоичные коды для натуральных чисел от 0 до 15

Натуральные числа	Коды Грея	Обычные двоичные коды			
		2^3	2^2	2^1	2^0
0	0 0 0 0	0	0	0	0
1	0 0 0 1	0	0	0	1
2	0 0 1 1	0	0	1	0
3	0 0 1 0	0	0	1	1
4	0 1 1 0	0	1	0	0
5	0 1 1 1	0	1	0	1
6	0 1 0 1	0	1	1	0
7	0 1 0 0	0	1	1	1
8	1 1 0 0	1	0	0	0
9	1 1 0 1	1	0	0	1
10	1 1 1 1	1	0	1	0
11	1 1 1 0	1	0	1	1
12	1 0 1 0	1	1	0	0
13	1 0 1 1	1	1	0	1
14	1 0 0 1	1	1	1	0
15	1 0 0 0	1	1	1	1

3.5.3. Инкрементные энкодеры

В инкрементных энкодерах используют конструкцию, аналогичную показанной на рис. 3.14, однако счетный диск имеет, как правило, лишь одну дорожку, на которой прозрачные и непрозрачные участки чередуются. И соответственно вместо линейки фотодетекторов используют лишь 1 или 2 фотодетектора – в зависимости от того, возможно вращение диска лишь в одном или в обоих направлениях. На рис. 3.14, а показано взаимное расположение счетного диска 1, блока фотодетекторов 2 и светового зонда 3 от светодиода. Если диск 1 может вращаться лишь в одном направлении, то достаточно одного фотодетектора. На выходе сенсора будет формироваться последовательность импульсов с периодом, обратно пропорциональным скорости вращения диска. Появление следующего

импульса свидетельствует о повороте диска на угол $360 \text{ deg}/n$, где n – количество пар непрозрачных и прозрачных участков на диске.

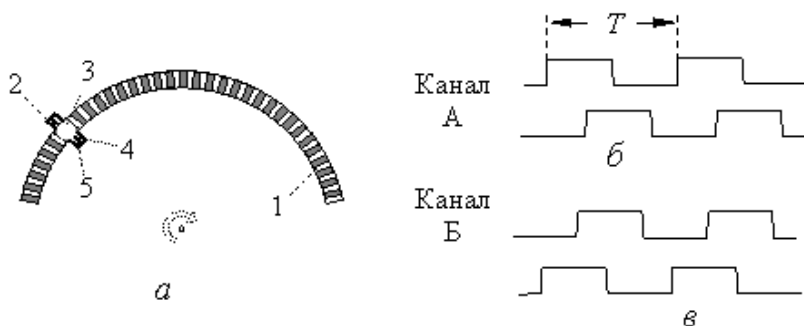


Рис. 3.14. К объяснению принципа действия инкрементного энкодера

Если диск может вращаться в обоих направлениях, и информация об этом важна, то блок 2 состоит из двух фотодетекторов 4 и 5, размещенных вдоль дорожки на расстоянии меньше, чем ширина прозрачного или непрозрачного участка. Выход сенсора в этом случае является двухканальным. На выходе А формируются импульсы от фотодетектора 4, а на выходе Б – от фотодетектора 5. Если диск 1 вращается против часовой стрелки, то импульсы на выходе А появляются чуть раньше, чем импульсы на выходе Б (рис. 3.14, б). При вращении диска по часовой стрелке порядок появления импульсов – обратный (рис. 3.14, в).

Иногда на счетном диске делают дополнительное прозрачное окошко на соседней дорожке (одно на всю дорожку) и ставят еще один фотодетектор, сигнал от которого выводят на дополнительный канал синхронизации. Этот канал используют для фиксации начала отсчета и для компенсации погрешностей, которые могут накапливаться при большом числе оборотов.

Для механического соединения вала углового энкодера с контролируемым механизмом используют специальные соединители, которые, с одной стороны, точно передают поворот практически без люфта, и вместе с тем, благодаря гибкости, гасят биения валов как поперек, так и вдоль оси вращения. Это требуется для защиты прецизионных подшипников и оптоэлектронных деталей.

На рис. 3.15 показаны примеры абсолютных и инкрементных энкодеров, которые выпускаются промышленностью.



Рис. 3.15. Некоторые промышленные абсолютные и инкрементные энкодеры

Их внешний диаметр составляет 50-60 мм, количество импульсов, которые выдаются за один полный оборот – от 2 до 32768, максимальная рабочая скорость вращения – от 3000 об./мин до 12000 об./мин.

3.5.4. Интеллектуальные тахометры

Угловые энкодеры ныне все чаще применяют совместно с интеллектуальными электронными модулями. Такие сенсоры называют *"интеллектуальными тахометрами"* (http://www.wachendorff.de/ie_pdf_files/imi.pdf). На входы такого небольшого устройства поступает от энкодера последовательность импульсов, которую в реальном времени быстро обрабатывает микропроцессор. Он подсчитывает общее число импульсов, пришедших от инкрементного энкодера, начиная от указанного момента времени. А зная угол поворота, который соответствует одному импульсу, тахометр мгновенно вычисляет угловое положение контролируемого объекта в любой момент времени, может запоминать всю динамику вращения с заданной дискретностью.

Получая импульсы от двухканальных инкрементных энкодеров, интеллектуальный тахометр при вычислении текущего углового положения может учитывать и смену направления вращения. По временным интервалам между поступлением импульсов микропроцессор может вычислить мгновенную угловую скорость. Он может также определять среднюю угловую скорость за определенный интервал времени, минимальные и максимальные значения величин и т.п., – всё, что нужно пользователю.

Во многих машинах, механизмах, транспортных средствах, станках, производственных системах вращательное движение кинематически жестко связано с линейными перемещениями. Это и не удивительно: ведь почти во всех двигателях исходным является именно вращательное движение. Поэтому сенсоры углового перемещения часто применяют для измерения и линейных перемещений. Интеллектуальные тахометры легко пересчитывают в таких случаях угловые координаты в линейные, скорости вращения – в линейные скорости, значение допустимых координат линейных перемещений в значение предельных углов поворота или в допустимое число оборотов.

3.5.5. Роторные и турбинные сенсоры

Еще одним примером сенсоров, в которых вращение является первичным механическим сигналом, служат роторные и турбинные измерители объемного потока жидкости. Чувствительными

элементами в них являются лопасти колеса или мини-турбины. В потоке жидкости они начинают вращаться, и угол их поворота, число оборотов прямо зависят от объема жидкости, которая протекает через поперечное сечение трубы, в которой они установлены. Угол поворота, число оборотов превращаются затем, как правило, в электрические сигналы с помощью интегрированных в конструкцию сенсора оптоэлектронных, индуктивных, емкостных или магниточувствительных элементов.

Некоторые промышленные сенсоры объемного потока жидкости показаны на [рис. 3.16](http://www.honsberg.com/index-n.htm) (<http://www.honsberg.com/index-n.htm>). В частности, на рис. 3.16 слева вверху показан простейший и наиболее дешевый турбинный сенсор, предназначенный для визуальной индикации потока. Для этого участок трубы, по которой течет жидкость, сделан прозрачным, а мини-турбина – ярко-красного цвета. При протекании жидкости хорошо видно, как турбина вращается. А по скорости вращения можно "на глаз" оценить поток жидкости. Турбинные сенсоры потока с электрическим выходом показаны внизу.



Рис. 3.16. Некоторые промышленные сенсоры для измерения объёмного потока жидкости, в том числе: а – турбинный сенсор; б – роторный сенсор; в – сенсор вместе с интеллектуальным счетчиком "Omni-RR"

На рис. 3.16 вверху справа показан роторный сенсор с прозрачной крышкой, – чтобы был виден принцип его действия. Жидкость, текущая сквозь сенсор, передает часть своего механического импульса лопастям, вследствие чего колесо вращается. А встроенная оптоэлектронная схема превращает вращение в последовательность электрических сигналов.

"Интеллектуальную" часть подобных сенсоров выпускают в виде автономных электронных модулей, которые могут быть размещены непосредственно возле сенсора (рис. 3.16, в). В зависимости от конструктивного исполнения и применяемых материалов такие сенсоры пригодны для измерения потоков воды, нефтепродуктов, масел и проч. с температурой до 100 deg C в диапазоне от 0,025 л/мин до 100 л/мин с точностью от 1% до 5%.

Краткие итоги

Одним из выдающихся достижений последних десятилетий стали глобальные системы ориентирования (Global Positioning System – GPS). Основой этих систем, её "космической составляющей", является совокупность искусственных спутников Земли, которые вращаются в разных плоскостях с таким расчетом, чтобы в любой момент времени из любой точки на поверхности Земли были видны от 5 до 12 спутников. Эти навигационные спутники периодически передают радиосигналы с информацией о своих точных координатах и текущем моменте времени. В качестве системы отсчета GPS взяты общепринятые географические долгота и широта, высота над уровнем моря и так называемое "время GPS" – время по эталонным часам. Для определения своих географических координат достаточно иметь при себе GPS приемник, в состав которого входят многоканальный приемник радиосигналов от спутников, микропроцессор и точные собственные часы. Получая сигналы от спутников GPS, микропроцессор определяет времена запаздывания и, решая систему алгебраических уравнений, находит свои пространственные координаты. GPS-приемники массового пользования обеспечивают погрешность определения географических координат в пределах $\pm 10-20$ м, а высокоточные GPS-приемники для геодезических измерений – не больше нескольких сантиметров.

Разработаны и уже широко применяются GPS навигаторы – специализированные интеллектуальные сенсоры, которые

обеспечивают ориентацию в незнакомой местности, помогают планировать наилучшие маршруты движения, выбирать ориентиры, запоминают информацию о маршруте и так далее. Можно выделить 3 группы GPS навигаторов: портативные, автомобильные и профессиональные. Для хранения картографической информации применяют флэш-память. GPS-приемники используют также для вынужденной слепой посадки самолетов на аэродромы, в электронных поводырях для слепых людей, в трекерах, в приборах для геодезии.

В механических сенсорах перемещения первичные сигналы о состоянии исследуемого объекта или процесса возникают в виде изменений координат центра масс тела (x, y, z) и/или углов поворота тела (θ, φ) относительно некоторой системы координат. Наиболее применяемыми чувствительными элементами в сенсорах линейного перемещения являются поршни, поплавки, ареометры, капиллярные трубки, сообщающиеся сосуды с жидкостью, подвижные иглы.

В сенсорах углов наклона (крена) применяют одно- и двухкоординатные инклинометры (чисто механические, электролитические, оптоэлектронные), в том числе интеллектуальные. В сенсорах угла поворота сейчас чаще всего используют оптоэлектронные энкодеры – одно- и многооборотные, инкрементные и абсолютные. Энкодеры и другие вращательные чувствительные элементы (роторы, турбины, ...) широко применяют также для построения тахометров, измерителей объемного потока жидкости и т.д.

4. Акселерометры и гироскопы.

4.1. Линейные акселерометры

Сенсоры, которые реагируют на ускорение и измеряют его, называют акселерометрами. Различают *сенсоры линейного и углового ускорения*.

Акселерометр, который измеряет *линейное ускорение*, т.е. ускорение поступательного движения тела, состоит из инертной массы M , упругого элемента U и демпфера D (рис. 4.1). Конструкция акселерометра должна быть такой, чтобы инертная масса M могла перемещаться лишь вдоль одной прямой, которую называют осью акселерометра. В контролируемом объекте, движущемся с ускорением a в направлении оси акселерометра, на массу M действует сила

инерции, которая согласно второму закону Ньютона равняется Ma . Под действием этой силы инертная масса M приходит в движение, деформируя упругий элемент $У$, который противодействует движению. Чтобы в этой механической системе не возникали продолжительные колебания, используется демпфер $Д$, который тоже оказывает сопротивление движению инертной массы M с силой, пропорциональной скорости ее движения, и превращает энергию колебательного движения в тепло.

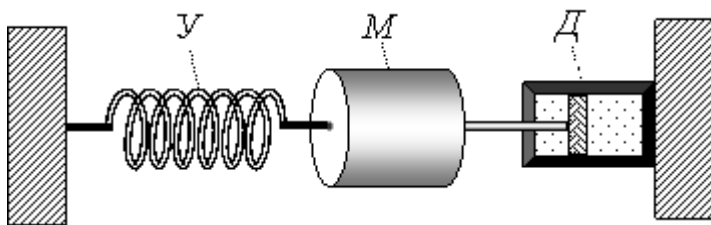


Рис. 4.1. Принципиальная механическая схема акселерометра

Движение инертной массы M описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = Ma \quad (4.1)$$

где x – отклонение инертной массы M от положения равновесия; b – коэффициент затухания, обусловленный демпфированием; k – коэффициент жесткости упругого элемента; a – текущее ускорение объекта, на котором установлен акселерометр.

Демпфер обычно регулируют так, чтобы коэффициент затухания достиг критического значения. В этом случае время реакции акселерометра на изменение ускорения оказывается наименьшим, и даже при скачкообразном изменении ускорения a колебания вокруг нового положения равновесия не возникают. Чтобы определить ускорение a , достаточно измерить отклонение x от положения равновесия или силу $F=kx$, которая действует на упругий элемент.

Таким образом, инертная масса M обеспечивает преобразование первичного информационного сигнала в виде линейного ускорения в механическое перемещение или в силу деформации упругого элемента. Упругий элемент обеспечивает линейность или, по крайней мере, взаимную однозначность преобразования. А демпфер предотвращает возникновение длительных колебательных процессов. Получается, что все они являются необходимыми составными элементами акселерометра.

На рис. 4.2 показана конструкция емкостного акселерометра, изготовленного с использованием МСТ. В кристалле кремния 1 вытравлены участки 2 так, что значительная инертная масса 3 механически отделена от других частей акселерометра. Она соединена с ними лишь тонкими перемычками 4, которые играют роль упругих элементов. На небольшом расстоянии (~ 10 мкм) от кристалла кремния сверху и снизу расположены металлические электроды 5 и 6. Роль демпфера играет вязкая непроводящая жидкость, которой заполняется пространство между электродами и кремнием.

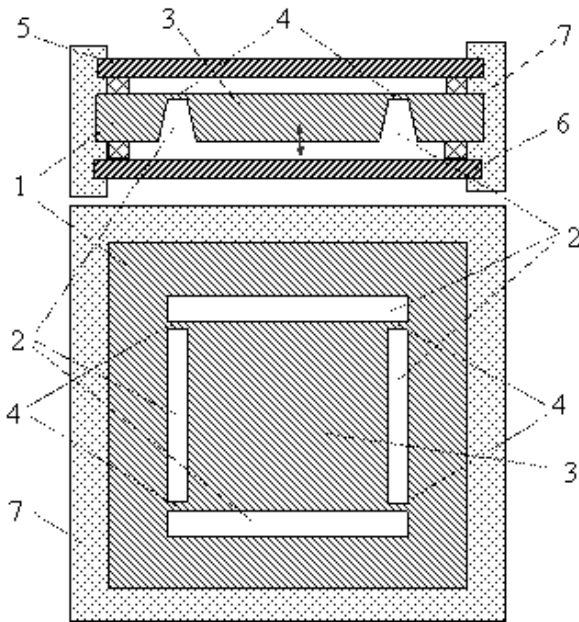


Рис. 4.2. Конструкция емкостного акселерометра

Инертная масса 3 в такой конструкции может перемещаться только по вертикали. Электрические ёмкости между ней и верхним (нижним) электродами включены в противоположные плечи электрической мостовой схемы переменного тока. Её балансируют так, чтобы при отсутствии ускорения сигнал на выходе равнялся нулю. Когда объект, на котором установлен акселерометр, движется с ускорением, направленным вдоль оси сенсора, инертная масса 3 смещается из положения равновесия, вследствие чего одна из емкостей возрастает, а другая уменьшается. Из-за нарушения баланса на выходе мостовой схемы появляется напряжение соответствующего знака и тем большее, чем больше ускорение. Мостовую электрическую схему, необходимые электронные ключи, усилители, элементы термокомпенсации, – все, что требуется для обработки сигналов и калибровки акселерометра, – формируют ныне методами МСТ на том же кристалле кремния.

В описанной конструкции акселерометра ускорение, которое и является здесь первичным информационным сигналом, сначала превращается в линейное перемещение инертной массы. Перемещение, в свою очередь, преобразуется в изменение емкости верхнего и нижнего конденсаторов, а последнее – в электрический сигнал. Емкостные акселерометры марки MMA62xx, в том числе и для спортивных применений, выпускает, например, фирма Freescale Semiconductor Inc..

В пьезорезистивных акселерометрах измеряется не линейное перемещение инертной массы, а сила, которая действует на упругий элемент. Для измерения этой силы в упругих элементах формируют кремниевые пьезорезисторы. Например, в конструкции, показанной на рис. 4.2, их формируют прямо в перемычках 4. Опорные пьезорезисторы, которые нужны для температурной компенсации, формируют на том же кристалле кремния в местах, где механическое напряжение не возникает, и включают в другое плечо мостовой электрической измерительной схемы.

4.2. Угловые акселерометры

Для измерения угловых ускорений требуется ротор 1 с достаточно большим моментом инерции (рис. 4.3) относительно оси вращения 2. Этому вращению должен противодействовать упругий элемент закручивания 3, который создает момент силы, пропорциональный углу закручивания. И также нужен демпфер, который гасит энергию

возникающих крутильных колебаний. Тогда в случае возникновения углового ускорения контролируемого объекта в направлении оси акселерометра, ротор 1 под действием момента инерции поворачивается на определенный угол.

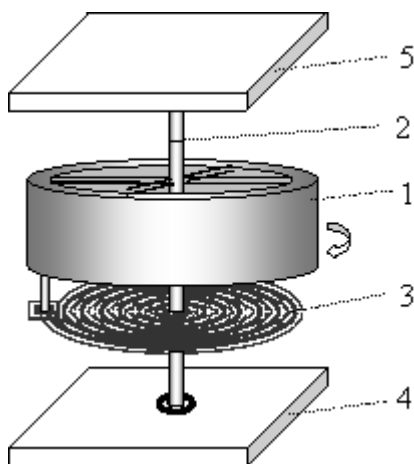


Рис. 4.3. Механическая схема углового акселерометра: 1 - ротор; 2 - ось вращения; 3 - упругий элемент; 4 - нижняя опора; 5 - верхняя опора

Вращение ротора описывается дифференциальным уравнением, аналогичным (4.1), в котором массу надо заменить на момент инерции ротора, линейное смещение x на угол поворота, а линейное ускорение – на угловое ускорение. Роль демпфера играет регулируемый момент сил трения между осью ротора и опорами. Измеряя угол закручивания или момент силы на упругом элементе, можно определить величину углового ускорения.

С использованием микросистемных технологий угловые акселерометры нынче тоже делают в микроминиатюрном исполнении.

4.3. Промышленные акселерометры и их "интеллектуальное расширение"

Первые промышленные акселерометры, производимые с применением МСТ, были преимущественно одноосными, потом стали выпускать и двухосные. Сравнительно недорогие микросхемы двухосных

акселерометров сейчас стали, например, применять в мобильных телефонах, цифровых фотоаппаратах, некоторых мониторах для автоматического поворота выводимого изображения при смене ориентации корпуса. Команду на смену ориентации изображения вырабатывает в них микросхема акселерометра, реагирующая на изменение направления ускорения земного притяжения.

А сейчас уже с десяток фирм (Analog Devices, Freescale Semiconductor, Hitachi Metals, Kionix, Oki Electric, STMicroelectronics и прочие) промышленно производят трехосные акселерометры. Как правило, их выпускают в стандартных корпусах микросхем. Например, трехосный акселерометр ADXL330 фирмы Analog Devices, который потребляет ток всего лишь 0,2 мА при напряжении питания от 2 В, выпускается в пластмассовом корпусе размером 4×4×1,45мм, предназначенном для поверхностного монтажа на плату. Выпускаются акселерометры как для диапазона малых значений ускорения (от ±1g до ±10g), так и для диапазона больших ускорений (от ±20g до ±300g) с точностью от 4% до 20% и с частотной полосой до нескольких килогерц. Они массово используются, например, в автомобилях в системах аварийного надувания подушек безопасности при угрозе столкновения.

Один из самых миниатюрных пьезорезистивных трехосных акселерометров НААМ-32 В, имеющий размеры 3×3×1мм, выпустила фирма HDK America Inc. В поле тяготения Земли этот сенсор дополнительно измеряет гравитационное ускорение и может определять углы наклона относительно горизонта. Он рассчитан на применение в портативных компьютерах, в MP3 плеерах, в мобильных телефонах, в контрольно-измерительных приборах, для защиты жестких компьютерных дисков от последствий.

В литературе сообщается о разработке пьезорезистивного акселерометра, измеряющего не только 3 компоненты линейного, но еще и 3 компоненты углового ускорения относительно трех ортогональных осей в полосе частот до 300 Гц. Этот сенсор очень хорошо показал себя даже в такой области, как распознавание человеческих жестов – по динамике изменения ускорений.

Промышленно выпускаются не только микросхемы акселерометров, но и их "*интеллектуальные расширения*" – с использованием микрокомпьютеров. Одна из типичных плат интеллектуального сенсора ускорений показана на рис. 4.4.

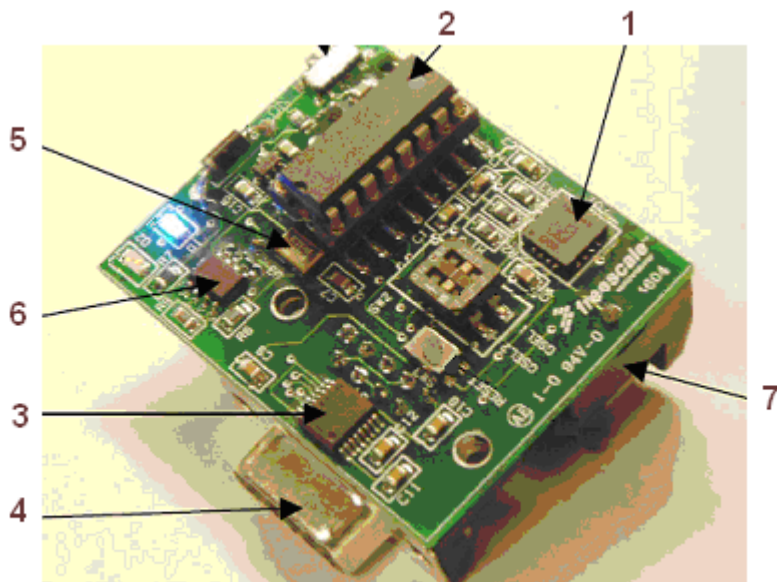


Рис. 4.4. Типичная плата интеллектуального сенсора ускорений: 1 – микросхема акселерометра; 2 – микропроцессор; 3 – микросхема интерфейса; 4 – информационный порт; 5 – кварцевый генератор; 6 – регулятор напряжения; 7 – батарея питания

Сигналы, получаемые от микросхемы акселерометра 1, обрабатываются микроконтроллером 2. С помощью интерфейсной схемы 3 через порт 4 результаты измерения могут быть выведены на индикатор или во внешний компьютер. Через информационный порт 4 сенсор может общаться с внешним компьютером, переходить в другой режим работы, изменять уставки, чувствительность и диапазон измерений акселерометра и т.п. В соответствии с записанной микропрограммой сенсор может запоминать всю динамику движения (ускорение, скорости) за определенный промежуток времени, передать ее через свой интерфейс во внешнюю память. Микропроцессор существенно облегчает калибровку сенсора, обеспечивает возможность его самопроверки и самодиагностики.

4.4. Гироскопы

Недостатком описанных выше акселерометров является то, что они измеряют значение ускорений относительно своих собственных осей. А направление их осей может изменяться, например, вследствие изменения ориентации в пространстве объекта, на котором они установлены. На морских или речных судах это может быть результат бортового или килевого крена, изменения курса судна, на автотранспорте или на железной дороге – результатом наклона дороги или колеи, на воздушном транспорте – результатом маневров самолета или влияния воздушных ям. Описанные в предыдущей лекции сенсоры углов наклона (крена) надежно работают лишь в инерциальных системах отсчета, в которых действует сила тяготения, от направления которой и отсчитываются углы. Но в системах отсчета, которые движутся ускоренно (самолеты, ракеты, автомобили), могут появляться значительные силы инерции, из-за чего описанные сенсоры крена перестают надежно работать. В таких системах оказывается необходимым какое-то надежное, "эталонное" ("опорное") направление, относительно которого и надо отсчитывать как ускорение, так и скорости и углы крена или поворота. Такое опорное направление в пространстве задают гироскопы.

Традиционный механический гироскоп (рис. 4.5 слева) состоит из *ротора* 1, который быстро вращается вокруг своей оси симметрии 2. Эта ось жестко связана с рамкой 3, которая может свободно вращаться вокруг оси 4, ортогональной к оси 2. Ось 4, в свою очередь, жестко связана с рамкой 5, которая может свободно вращаться вокруг оси 6. Она ортогональна к первым двум осям и жестко связана с объектом, на котором установлен гироскоп. Таким образом, ротор может свободно менять свою ориентацию относительно объекта. Другой аналогичный классический вариант гироскопа показан на рис. 4.5 справа. Соответствующую систему крепления осей называют *кардановым подвесом*. По закону инерции главная ось вращения ротора (2) при любых поворотах объекта стремится сохранить свою исходную ориентацию в пространстве. Именно ее и можно использовать как эталон направления. Обычно исходной ориентацией является направление на неподвижную на ночном небе Полярную звезду, т.е. направление вдоль оси вращения Земли. Как говорят современные моряки, "не беда, что небо заволочло тучами, или что звезды скрыла многометровая толща воды: гироскоп, раскрученный в начале плавания, всегда укажет верное направление".

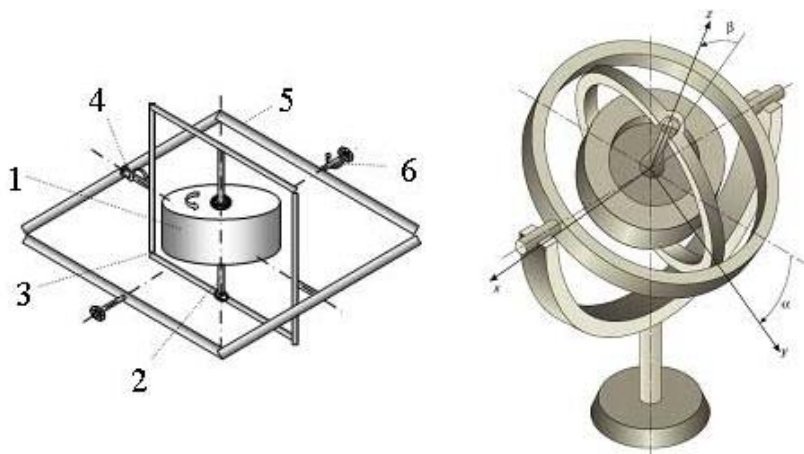


Рис. 4.5. Конструкция классического гироскопа

Жестко связанная с осью вращения ротора рамка 3 тоже сохраняет свою исходную ориентацию в пространстве. Поэтому её называют "инерциальной платформой". Если на рамку 3 установить акселерометр, то и он будет сохранять свою ориентацию в пространстве и, следовательно, измерять ускорение относительно исходной системы координат. Получаемые результаты измерений уже не будут зависеть от изменений ориентации контролируемого объекта в пространстве.

Альтернативный подход состоит в том, что на осях вращения 4 и 6 можно установить сенсоры, измеряющие углы поворота объекта относительно его исходной ориентации. Тогда акселерометр совсем не обязательно устанавливать именно на инерциальной платформе, т.е. на рамке 3. Он может быть жестко связан и с самим объектом, что конструктивно проще. А результаты измерения ускорений, которые он выдает, по известным формулам перехода от одной системы координат к другой всегда можно пересчитать в ускорение относительно исходной или произвольной третьей системы координат. Но для этого сенсор, в состав которого входят и акселерометр, и гироскоп, должен быть интеллектуальным. Такой подход называют "использованием виртуальной инерциальной платформы".

На осях вращения 4 и 6 можно измерять не углы поворота, а моменты сил соответствующего направления и рассчитать по этим моментам

угловые ускорения вращения объекта вокруг ортогональной оси. Интегрируя дальше измеренные угловые ускорения по времени, тоже можно определить углы поворота объекта относительно опорной оси. А это опять-таки позволяет использовать "виртуальную инерциальную платформу".

В реальных конструкциях гироскопов всегда присутствуют хотя бы незначительные силы трения, не идеальна балансировка ротора, имеются внешние магнитные поля и другие сторонние воздействия, которые создают пусть незначительные, но дополнительные неконтролируемые моменты вращения. И это приводит к некоторому дрейфу со временем пространственной ориентации опорной оси гироскопа и других его характеристик. Для уменьшения этого дрейфа ось гироскопа иногда не крепят на рамках, а оставляют ротор, замкнутый в герметичной сфере, свободно плавать и вращаться в жидкости с высокой плотностью (чаще всего это фторуглеводороды). Такие гироскопы называют *поплавковыми*. В другом варианте для уменьшения трения к точкам опоры осей гироскопа подводят инертный газ под высоким давлением, который, создавая газовую прослойку между осью и опорой, значительно уменьшает трение в оси по сравнению с любой смазкой. Гироскопы такой конструкции называют гироскопами *на газовых* (в частности *на воздушных*) *подвесках* или на *аэродинамических* подшипниках.

Вращающийся ротор гироскопа может и просто висеть в воздухе или в вакууме за счет электростатических или магнитных сил, которые компенсируют гравитацию. Гироскопы такой конструкции соответственно называют *электростатическими* или на *магнитных подвесках*.

Благодаря таким усовершенствованиям удалось повысить временную стабильность положения оси гироскопа от порядка 10^{-2} угловых градусов за час до порядка 10^{-4} deg/ч и даже 10^{-5} deg /ч. Чтобы Вы по достоинству оценили эту суперстабильность укажем, что за год автономного плавания подводной лодки неконтролируемое отклонение оси ее гироскопа от исходной ориентации не превысит 0,1 deg. А ракета, движением которой будет управлять кибернетическая система с таким гироскопом, преодолев путь во много тысяч километров, может отклониться от цели не более, чем на несколько метров.

4.5. Микромеханические гироскопы-акселерометры

Из механики известно, что свою ориентацию в пространстве по закону инерции стремятся сохранять не только тела, которые вращаются, но и системы, в которых происходят механические колебания. Еще в школе нам обычно рассказывают о маятнике Фуко, который, сохраняя неизменной ориентацию плоскости своих колебаний в пространстве, позволяет нам наглядно увидеть вращение нашей планеты вокруг своей оси. Применение не ротационных, а именно колебательных или вибрационных гироскопов оказалось значительно перспективнее при переходе к микромеханическим гироскопам и акселерометрам. Ведь с помощью МСТ гораздо легче делать вибрирующие с большой частотой детали, чем быстро вращающиеся вокруг своей оси роторы и опорные микроподшипники для них.

Предложены и исследованы уже десятки разных конструкций микромеханических гироскопов-акселерометров, и процесс их дальнейшего совершенствования продолжается. Мы опишем здесь лишь общие принципы их работы. Все они используют известное явление возникновения сил и ускорений Кориолиса. Этот французский ученый показал, что на тело, движущееся со скоростью \vec{v} в системе координат, которая вращается с векторной угловой скоростью $\vec{\Omega}$, действует дополнительное ускорение \vec{a} , равное векторному произведению

$$\vec{a} = [\vec{v} \otimes \vec{\Omega}] \quad (4.2)$$

т.е. направленное ортогонально к плоскости, построенной на векторах \vec{v} и $\vec{\Omega}$. Напомним, что вектор угловой скорости $\vec{\Omega}$ по модулю равен угловой скорости, а направлен вдоль оси вращения в сторону продвижения острия правого винта.

На рис. 4.6 показана вытравленная в пластине кремния инертная масса 1, соединенная тонкими упругими перемычками (подвесками) 2 с основным кристаллом кремния 3. С помощью, например, периодически меняющихся электростатических сил можно заставить инертную массу 1 колебаться на подвесках 2 в направлении оси OX . Ось OY , которая проходит через подвески, называют главной осью сенсора.

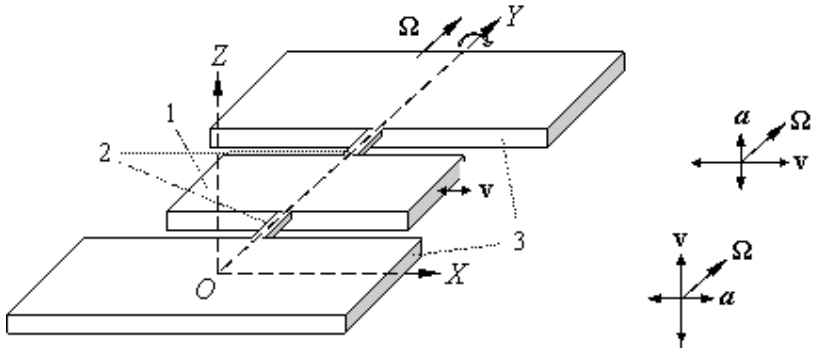


Рис. 4.6. К объяснению принципа действия микромеханических гироскопов-акселерометров: OXYZ – система координат сенсора; OY – главная ось гироскопа-акселерометра; v – вектор скорости колебаний маятника; Ω – вектор угловой скорости; a – ускорение Кориолиса

Если объект, на котором установлен сенсор, начнет вращаться вокруг этой главной оси, то в системе возникнут инерционные силы Кориолиса, которые придадут инертной массе 1 ускорение Кориолиса, направленное вдоль оси OZ. Поскольку скорость движения инертной массы 1 в процессе колебаний меняется по синусоидальному закону, то и ускорение вдоль оси OZ тоже будет меняться по синусоидальному закону с той же частотой. Поэтому инертная масса 1 начнет колебаться в направлении также и этой оси. Амплитуда колебаний пропорциональна амплитуде угловой скорости. Поэтому, измеряя ее, можно вычислить скорость вращения объекта. А дальше, используя концепцию "виртуальной инерциальной платформы", можно рассчитать текущую ориентацию объекта относительно исходной или любой другой фиксированной системы координат.

Микромеханическая структура, показанная на рис. 4.6, пригодна также и для одновременного измерения линейного ускорения объекта вдоль оси OZ. Действительно, линейное ускорение приводит к некоторому смещению инерционной массы 1 вдоль этой оси точно так же, как в конструкции емкостного акселерометра, показанного на рис. 4.2. Измеряя это смещение, можно определить и линейное ускорение.

Инертную массу 1 в микромеханической структуре, показанной на рис. 4.6, можно принудить колебаться в направлении оси OZ. Тогда вращение объекта вокруг главной оси OY сенсора приведет к

возникновению колебаний в направлении оси OX . Измеряя их амплитуду, можно определить скорость вращения. Одновременно, измеряя смещение центральной точки колебаний в направлении оси OX , можно вычислить компоненту линейного ускорения, направленную вдоль этой оси.

Микромеханические гироскопы-акселерометры, работающие с применением указанных принципов, выпускаются уже промышленно в виде небольших интегральных схем. Их главным недостатком является низкая временная стабильность направления главной оси гироскопа – порядка нескольких угловых градусов в час. Поэтому производители указывают их стабильность уже не в deg/ч, как это принято для классических гироскопов, а в deg /с. В то же время эти гироскопы-акселерометры имеют и очень важные преимущества: сравнительно низкую цену; малые габариты и массу (6 x 6 мм, 0,5 г). Их высокая надежность характеризуется значениями вероятности отказа меньше, чем 10^{-6} , гарантированный срок службы – 15 лет. Они потребляют ничтожную энергию, имеют высокую стойкость против вибраций и ударов (до 2000g!), что очень важно на транспорте и в динамичных системах. А с недостаточной высокой временной стабильностью, как оказалось, можно успешно бороться в условиях применений на Земле и вблизи Земли, где всегда действует сила тяготения, направленная к центру Земли. На относительно спокойных участках или интервалах движения, даже глубоко под землей или под водой, всегда можно определить направление ускорения земного тяготения и по этим данным довольно точно автоматически откорректировать направление ориентации "виртуальной инерциальной платформы". Ее коррекцию можно выполнить также и по данным систем навигации GPS, о которых речь шла выше. Так ныне и делается в интеллектуальных навигационных сенсорах.

Например, американская Draper Laboratory использует микромеханический гироскоп-акселерометр с микропроцессором в своем астроинерциальном комплексе (Inertial Stellar Compass – ISC), предназначенном для автоматической наводки телескопа, установленного на искусственном спутнике Земли, на нужные звезды и для длительной стабилизации положения этих звезд в поле зрения телескопа.

Фирма Robert Bosch Gmb разработала на их основе сенсоры для быстрой реакции на опасность опрокидывания или закручивания

автомобиля вокруг вертикальной оси с целью его немедленной автоматической электронной стабилизации. Имеется много и других применений.

4.6. Вибрационные сенсоры

Напомним, что в этих сенсорах первичным информационным сигналом является изменение состояния механических колебаний тела или системы тел. Механические колебательные системы могут быть очень чувствительными к тем или иным факторам воздействия, чем и пользуются при построении вибрационных сенсоров.

В разделе "Электрические сенсоры" мы расскажем о возбуждении незатухающих механических и электрических колебаний пьезоэлектрического кристалла при синхронной подкачке энергии, например, через транзистор с использованием положительной обратной связи. Колебания эти происходят на собственной резонансной частоте кристалла, которая обычно лежит в диапазоне единиц-десятков мегагерц и зависит от его геометрических размеров и массы. Если последние изменяются, то меняется и частота колебаний. В XX в. вибраторы на пьезокристаллах стали классическими чувствительными элементами.

Для компенсации влияния изменений температуры и других помех рядом устанавливают два одинаковых пьезоэлектрических вибратора. Один из них – опорный – остается вне влияния, а на другой действует контролируемый фактор. Для определения величины влияния этого фактора измеряется разность частот колебаний измерительного и опорного вибраторов. Она практически не зависит от изменения температуры и от других сторонних помех, одинаково влияющих на частоту обоих вибраторов.

Чаще всего влияющим фактором является добавление на пьезоэлемент незначительной массы, величину которой надо определить. Тогда такой вибрационный сенсор работает как *микровесы*, чувствительность которых составляет порядка 1 мкг. Изменение частоты (в Гц) в рабочем интервале обычно описывают формулой

$$\Delta f = -2,3 \times 10^6 f^2 \Delta^2 m / S \quad (4.3)$$

где f – исходная частота колебаний (МГц); Δm – прирост массы (г); S – площадь электрода пьезокристалла (см^2).

Если на поверхность двух пьезоэлектрических кристаллов нанести специфический рецепторный слой – тонкую пленку материала, который избирательно адсорбирует (присоединяет) молекулы какого-то газа, и обеспечить контакт одного из кристаллов с атмосферой, то в результате абсорбции молекул соответствующего газа масса этого кристалла несколько возрастает. Соответственно изменяется и частота его собственных колебаний. Измеряя разность частот колебаний, можно определять удельное содержание соответствующего газа в атмосфере. Например, если на поверхность кристалла нанести тонкую пленку золота, то сенсор становится чувствительным к наличию в окружающей атмосфере паров ртути. Если пары ртути присутствуют, то ее атомы адсорбируются золотой пленкой, образуя амальгаму. Масса пленки несколько возрастает, что можно выявить по изменению частоты механических и электрических колебаний пьезокристалла. Естественно, что масса адсорбированных паров зависит от удельного содержания соответствующего газа в контролируемой среде и от времени "экспозиции".

В литературе описан подобный сенсор для непрерывного мониторинга концентрации гексафторида серы (SF_6).

4.7. Кантилеверы

С использованием современных микросистемных технологий механические колебательные системы удается теперь выполнять в удивительно малых размерах. Особенно популярными в этой области стали так называемые кантилеверы (cantilever) – закрепленные на одном конце упругие длинные балки, напоминающие по форме трамплины, с которых спортсмены прыгают в воду. В качестве примера на рис. 4.7 показаны три кантилевера 1, сформированные методами МСТ в кристалле кремния 2.

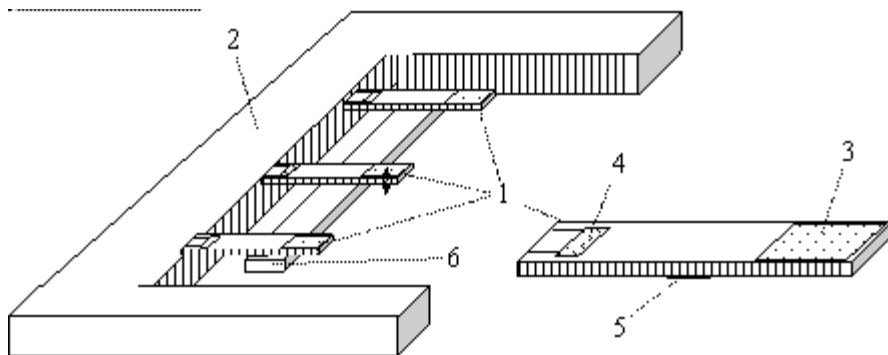


Рис. 4.7. Пример конструкции кремниевых кантилеверов: 1 - кантилеверы; 2 - основной объем кремния; справа – увеличенное изображение кантилевера; 3 - чувствительная зона; 4 - пьезорезистор; 5 и 6 - электроды для возбуждения и поддержания механических колебаний

Справа один из кантилеверов показан в увеличенном виде. На его верхней поверхности формируют чувствительную зону 3 и пьезорезистор 4, а снизу – электрод 5. Для возбуждения и поддержания незатухающих механических колебаний кантилеверов 1 используют обычно электростатические силы, создаваемые подачей переменного напряжения между кантилевером и электродом возбуждения 6, сформированным на подложке из кремния. Необходимую положительную обратную связь обеспечивают пьезорезисторы 4, формируемые вблизи закрепленного конца кантилевера, где сосредоточены наибольшие деформации. Механические колебания автоматически поддерживаются на резонансной частоте свободных колебаний кантилевера. Обычно эта частота составляет несколько мегагерц. Возбуждение и поддержание незатухающих механических колебаний кантилеверов можно осуществлять также другими способами: магнитным, электромагнитным и т.д.

На чувствительную зону 3 наносят "рецепторный слой" – покрытие, избирательно чувствительное к контролируемому химическому веществу или к определенному белку, вирусу либо к другому анализу. Если этот анализ присутствует в среде, с которой контактирует кантилевер (газ, жидкость), то некоторые его атомы (молекулы, частицы) химически связываются с чувствительным покрытием 3. Из-за вызываемого этим незначительного изменения массы частота

механических колебаний кантилевера изменяется. Соответственно изменяется и частота сигналов от пьезорезистора 4. Эти сигналы воспринимаются и обрабатываются электронными схемами, которые сформированы в том же кристалле кремния. Поскольку собственная масса кантилевера очень мала и фиксируются даже очень незначительные изменения частоты, то чувствительность таких вибрационных сенсоров оказывается достаточно высокой. Oak Ridge National Laboratory сообщила, например, о регистрации с помощью сенсора на кантилеверах рекордно малого количества аналита – 5,5 фемтограмма (10^{-15} г). Ведутся работы по созданию в одной кремниевой микросхеме целого набора сенсоров на кантилеверах, каждый из которых настроен на свой аналит. Это будет настоящая химическая или биохимическая лаборатория на чипе, – ведь в одном кристалле можно поместить сотни таких сенсоров. Однако разработка технологии покрытия каждого из сотен кантилеверов своим специфическим, чувствительным к своему аналиту слоем, – это очень не простая задача.

Ученые из университета Пердью (США) исследовали поведение "нанокантилеверов" – кантилеверов толщиной порядка 20 нм и длиной порядка 1 мкм. Оказалось, что в отличие от кантилеверов толщиной в несколько мкм и длиной в десятки микрометров, в которых увеличение массы чувствительного слоя приводит к уменьшению резонансной частоты колебаний, в нанокантилеверах резонансная частота при абсорбции аналита возрастает. Это объясняется тем, что слой чувствительного вещества и присоединяющиеся к нему частицы аналита имеют здесь приблизительно такую же толщину, как и сам кантилевер, и сравнимые с ним размеры. Поэтому в данном случае не только прибавляется масса, но и возрастает коэффициент жесткости кантилевера. Исследователи также неожиданно для себя обнаружили, что более длинные кантилеверы захватывают из окружающей среды намного большее количество аналита, и что плотность захваченных частиц аналита возрастает вблизи свободного конца кантилевера. Сейчас ученые разрабатывают математическую модель чувствительности нанокантилеверов с целью доведения ее до уровня, когда станет возможным обнаруживать присутствие в среде даже единичных частиц аналита (патогенов, антител, молекул ядовитых веществ и т.п.).

4.8. Виброанализаторы

Свою собственную резонансную частоту имеют не только пьезокристаллы, мембраны, кантилеверы. Каждая механическая конструкция имеет свои резонансные частоты, свои характерные колебательные свойства. И при любых механических повреждениях или деформациях картина их собственных колебаний изменяется. Это создает принципиальную возможность по изменению картины механических колебаний обнаруживать нежелательные изменения и дефекты, которые появились в конструкции. Научно-техническую дисциплину, которая этим занимается, называют *вибродиагностикой*, а приборы для измерения и анализа механических колебаний – виброметрами и виброанализаторами.

За последние десятилетия техника виброметрии значительно усовершенствовалась благодаря созданию новых надежных малогабаритных пьезоэлектрических и емкостных акселерометров, которые превращают механические колебания в электрические сигналы и, будучи интеллектуальными, сразу же анализируют получаемую картину колебаний, выдают на выход не сырые сигналы, а результаты их анализа. Вибрации машин, механизмов, отдельных их деталей, как правило, являются сложными колебаниями, суперпозицией многих колебательных составляющих. Одним из основных методов, помогающих разобраться в них, является *частотный анализ*, который называют также *спектральным*. Наличие в составе вибрационного сенсора встроенного микропроцессора, памяти и матричного дисплея позволило выполнять спектральный анализ механических колебаний непосредственно в сенсоре и выводить на дисплей не только требуемые интегральные параметры колебаний, но и их частотные спектры. Это позволяет наглядно увидеть частотную структуру колебаний, связанную с основными механическими движениями отдельных узлов и деталей контролируемого механизма, быстро выявить источник нежелательных или полезных изменений.

Фотографии некоторых современных интеллектуальных виброметров показаны на рис. 4.8. Они состоят из небольшого основного корпуса, в котором находятся элементы питания, вся электроника, дисплей и органы управления, и выносного щупа – пьезоэлектрического детектора вибраций. Кончиком щупа легко притрагиваются к выбранной точке исследуемого механизма. Сенсор сам измеряет вибрации, запоминает данные измерений на протяжении заданного

интервала времени и после обработки в микропроцессоре выводит полученные результаты на индикатор.



Рис. 4.8. Примеры современных интеллектуальных виброметра-виброанализатора (слева) и вибротестера (справа)

Как правило, измеряются и запоминаются переменные ускорения (от $0,01 \text{ м/с}^2$ до 200 м/с^2), скорости (от $0,1 \text{ мм/с}$ до 100 мм/с) и амплитуды вибраций (от $0,003 \text{ мм}$ до 3 мм) в диапазоне частот $1 - 10000 \text{ Гц}$. Вычисляются их среднеквадратичные и пиковые значения, выполняется спектральный анализ колебаний и выводится спектр вибраций. Встроенный микропроцессор может быть запрограммирован также и на вибродиагностику конкретных механизмов. Тогда он по заранее заложенным признакам сам интерпретирует частотные составляющие вибраций, выводит на дисплей допустимые для данного механизма диапазоны значений и подает сигналы предупреждения в случае выхода параметров за границы допустимого диапазона.

Такие виброметры широко применяют ныне для защиты людей, машин, механизмов и сооружений от действия вредных вибраций, для быстрого и точного балансирования механизмов, для подбора средств эффективной борьбы с вибрациями. Необременительный ежедневный контроль с помощью портативных вибросенсоров валов работающих мощных двигателей, механических приводов, ответственных элементов конструкций позволяет своевременно выявить начало угрожающих скрытых изменений в конструкциях. Легко выявляются, например, ослабление креплений, уменьшение жесткости опор, увеличение или уменьшение промежутков между элементами машин, появление трещин, дисбалансов, нарушение центрирования,

изнашивание подшипников и т.п. Таким образом можно предупредить возможные сложные аварии, сделав предупредительный ремонт, своевременное регулирование или замену, и сэкономить значительные средства. Устраняются потери из-за снижения качества продукции, внеплановых остановок производственных процессов, повреждения механизмов, продолжительных ремонтных работ и т.п..

4.9. Хроматографические сенсоры

Когда надо выяснить или контролировать химический состав смеси веществ с достаточно близкими физическими и химическими свойствами, нынче широко применяют метод хроматографии. Классическая реализация этого метода схематически показана на рис. 4.9 слева.

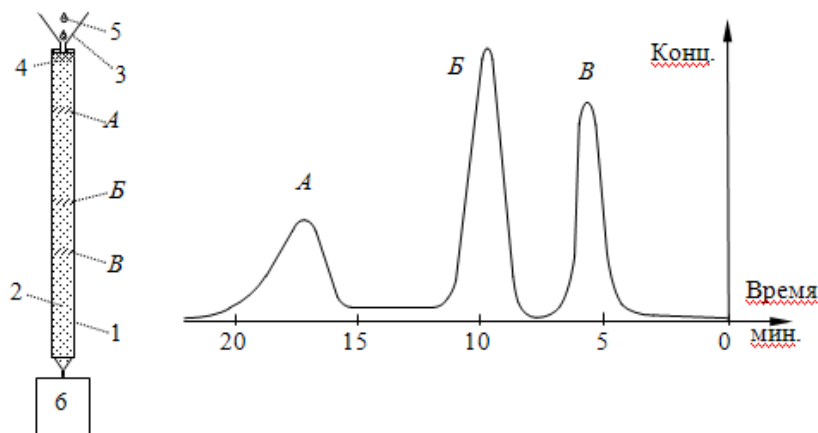


Рис. 4.9. Метод хроматографии. Слева: 1 – хроматографическая колонка; 2 – сорбент; 3 – воронка; 4 – смесь веществ; 5 – доливание жидкости; 6 – детектор количества аналита; справа – вид хроматограммы

В хроматографическую колонку 1, заполненную сорбентом 2, через воронку 3 вводят пробу контролируемой смеси 4. Затем понемногу доливают жидкость 5, которая растворяет и захватывает с собой смесь 4 и начинает просачиваться сквозь сорбент 2 вниз.

Пусть смесь состоит из веществ *A*, *B* и *B*, и они несколько по-разному связываются с сорбентом 2 и с жидкостью 5, протекающей вниз сквозь колонку. Тогда и скорость переноса этих веществ вниз вдоль колонки 1 оказывается несколько разной. И они в ходе продвижения постепенно разделяются в пространстве. Вещество *B*, у которого связь с жидкостью 5 наиболее сильная по сравнению со связью с сорбентом 2, продвигается быстрее всего и достигает конца колонки первым. На выходе из колонки 1 устанавливают детектор 6, с помощью которого определяют количество вещества, выходящего из колонки за единицу времени. Следующим выходит вещество *B*, а последним – вещество *A*, у которого связь с жидкостью 5 наиболее слаба по сравнению со связью с сорбентом 2.

На выходе детектора 6 записывается зависимость количества вещества, выходящего из колонки, от времени. Ее принято называть хроматограммой. Для рассмотренного примера она показана на рис. 4.9 справа. Хроматограмма наглядно показывает количество компонентов в контролируемой смеси и ее относительный состав. Для надежности хроматографическую колонку предварительно калибруют по интересующим пользователя компонентам, пропуская через колонку смеси заранее точно известного состава. Чем больше длина колонки, тем больше разделяются компоненты смеси, тем выше разрешающая способность хроматографического метода. Однако при этом возрастает и время анализа.

Описанный вариант метода называют "колонковой" хроматографией. Известны и другие варианты хроматографического разделения веществ: *на фильтровальной бумаге или на ткани, в тонких слоях сорбента, нанесенных на какую-либо основу, в капиллярах.*

Возможность хроматографического разделения красителей на папирусе была известна, по крайней мере, уже во времена Древнего Рима. Но научные теоретические основы метода хроматографии были разработаны лишь в середине прошлого века. И лишь за последние десятилетия хроматография стала действительно мощным аналитическим методом. Теоретические основы метода довольно полно описаны во многих книгах по аналитической химии, и поэтому здесь мы не будем их рассматривать.

Разработано уже немало разных видов хроматографии (*распределительная, адсорбционная, ионообменная, на молекулярных*

ситях и т.п.). В любом варианте в процессе хроматографии, кроме исследуемой пробы, принимают участие *неподвижная* (" *стационарная* ") фаза и подвижная фаза, которую еще называют *проявителем*, *растворителем* или *элюентом*. В приведенном выше варианте неподвижной фазой является сорбент 2, а проявителем – жидкость 5. Разделение исследуемой смеси происходит благодаря тому, что молекулы разных ее компонентов несколько по-разному связываются с неподвижной и подвижной фазами и поэтому перемещаются за проявителем с разной скоростью.

Если подвижной фазой является жидкость, то хроматографию называют *жидкостной*, а если газ, – то *газовой*. Неподвижной фазой может быть пористое твердое тело или жидкость. Чтобы она не перемещалась, ее механически фиксируют на какой-либо твердой основе, которую называют *матрицей*. Причинами, стимулирующими продвижение подвижной фазы и вместе с ней веществ исследуемой пробы, могут быть: сила тяготения, капиллярные силы, внешнее давление, электростатические силы.

Как видим, в хроматографических сенсорах первичные информационные сигналы появляются вследствие механического перемещения молекул и соответствующих веществ относительно неподвижной основы. Именно поэтому хроматографические сенсоры отнесены у нас к группе механических сенсоров, хотя чаще всего их считают химическими, так как применяют их в основном в аналитической химии и в химических производствах.

Всего несколько десятилетий назад хроматографические сенсоры были громоздкими стационарными установками, пригодными для использования только в лабораториях. Процедуры подготовки и проведения на них анализов требовали много времени, а получаемые хроматограммы могли расшифровать лишь опытные специалисты. За последние десятилетия как методики, так и сами сенсоры значительно усовершенствованы, стали намного более удобными и эффективными. Появились интеллектуальные хроматографические сенсоры, в том числе и портативные.

Один из них показан на рис. 4.10.



Рис. 4.10. Портативный газовый хроматограф Voyager. Размеры 39х27х15 см; масса (с аккумуляторной батареей на 9 ч. непрерывной работы) – 6,8 кг. Жидкокристаллический дисплей 128х64 пикселей. Интерфейс RS232 для соединения с принтером или ПЭВМ

В его состав входят 3 капиллярные хроматографические колонки, которые обеспечивают эффективное разделение фракций, позволяют анализировать легкие, средние и тяжелые соединения, в том числе и очень сложные смеси. Пробу вводят с помощью шприца или с использованием встроенного мининасоса. Измерение концентраций от единиц *ppb* до 100 *ppm* обеспечивают фотоионизационный и электрозахватный детекторы, установленные на выходе из капиллярных колонок.

Наличие микропроцессора обеспечивает возможность работы во многих разных режимах:

- автоматическое определение общего содержания углеводов;

- автоматическое проведение по указанию пользователя одного из 7 запрограммированных анализов типичных смесей веществ;
- программирование пользователем нужных ему специфических анализов из широкого круга видов органических соединений.

На графический дисплей можно выводить не только хроматограммы. Микропроцессор может рассчитать и вывести на экран суммарное количество компонентов в каждом из отдельных пиков (до 50), идентифицировать его принадлежность, формировать меню с целью помощи в калибровке сенсора по трем точкам с возможностью идентификации до 25 разных компонентов.

С помощью меню обученный пользователь может модифицировать методики, записанные в памяти сенсора, и программировать собственные методики анализа, которые тоже запоминаются и потом могут выполняться автоматически. Накопленные в памяти результаты анализов могут быть выданы для распечатки через интерфейс непосредственно на принтер. Встроенный микропроцессор обеспечивает связь хроматографа *Voyager* с персональным компьютером, позволяет выдавать для дальнейшего использования всю накопленную информацию, загрузить новые программы и т.п.

Хроматограф *Voyager* рассчитан на применение в полевых условиях, обеспечивает возможность проведения свыше 750 анализов на день. Результаты могут сразу передаваться через каналы связи. Его широко применяют для экологического контроля загрязненности грунтов, атмосферы, водоемов; контроля содержимого резервуаров танкеров, автоцистерн, помещений перед их заполнением; для мониторинга стоков предприятий; для контроля состава воздуха на химических производствах, целлюлозно-бумажных комбинатах, резиновых фабриках, в больницах и т.п.

На рис. 4.11 показан еще один современный интеллектуальный хроматограф *Varian CP-4900 Micro GC*. Внизу в раскрытом виде показана его модульная конструкция – до 4 блоков. Каждый из них является автономным миниатюрным газовым хроматографом с независимым программным управлением и состоит из микроинжектора на 1-10 мл с электронным контролем, из капиллярной колонки и микрокатарометра.

Модули можно выбирать из 15 разных типов, исходя из конкретной цели применения. Каждый модуль оснащен термостатом, в котором может поддерживаться температура от 30 deg C до 180 deg C. Подвижной фазой является газ (He , H_2 , N_2 , Ar) под давлением до 200 кПа с расходом 2-12 мл/мин. Диапазон измеряемых концентраций – от 1 ppm до 100 %. Производительность – свыше 750 анализов в смену.

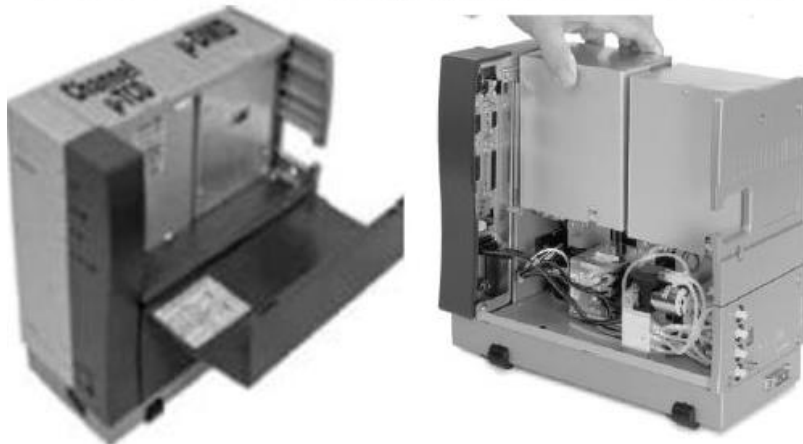
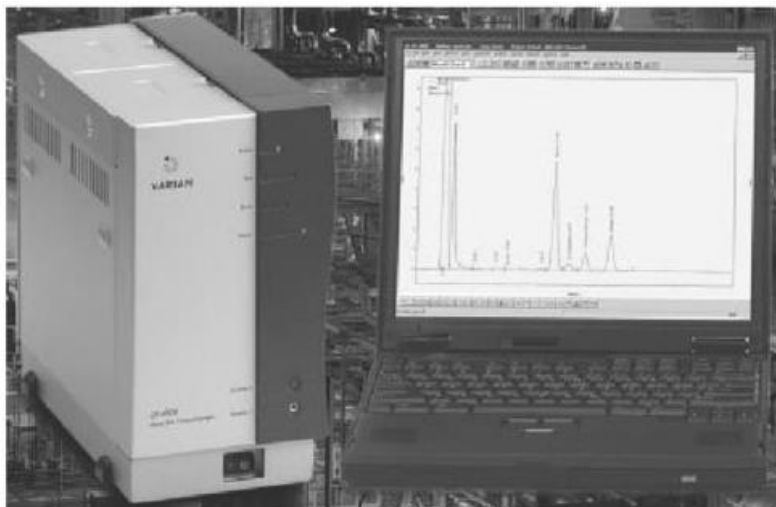


Рис. 4.11. Портативный газовый хроматограф Varian CP-4900 Micro GC: вверху – в собранном виде; внизу – в раскрытом

Этот хроматограф успешно используют во всех областях, где нужен быстрый, мобильный и точный анализ газов. Это, например, контроль ингаляционной смеси во время наркоза с автоматическим документированием; контроль выхлопов автомобилей с автоматическим документированием; проверка качества продукции нефтехимии, анализ природного газа, конденсата, мониторинг наличия легковоспламеняющихся жидкостей и т.п.

Процесс миниатюризации и усовершенствования хроматографических сенсоров только начался. Ведь с использованием микросистемных технологий можно формировать капиллярные колонки довольно большой (многометровой) длины в небольшом кристалле кремния. И там же можно сформировать электрически управляемые микродозаторы, электроды для электростатического продвижения подвижной фазы, микроанализаторы количества веществ на выходе из колонки, всю необходимую для обработки сигналов электронику.

Краткие итоги

Обязательными элементами акселерометров являются инертная масса (ротор), преобразующая ускорение в перемещение (поворот), упругий элемент, обеспечивающий линейность преобразования, и демпфер, блокирующий возникновение длительного колебательного процесса.

На объектах, которые не являются строго инерциальными и могут менять свою ориентацию в пространстве (самолеты, ракеты, автомобили, ...), оказывается необходимым надежное "опорное" направление, относительно которого и надо отсчитывать как ускорение, так и скорости и углы крена или поворота. Такое опорное направление в пространстве задают гироскопы, главным элементом которых является быстро вращающийся ротор или быстроколеблющийся вибратор. Они в соответствии с законом инерции сохраняют свою ориентацию в пространстве, если влияние на них объекта, на котором они установлены, сведено к минимуму. Это достигается с помощью специальных технических решений (карданов подвес, аэродинамическая, магнитная, электростатическая подвеска, ...). Акселерометр может быть установлен на рамке гироскопа, сохраняющей свою ориентацию в пространстве, либо его показания могут быть пересчитаны относительно любой системы координат с помощью концепции "виртуальной инерциальной платформы".

Применение микросистемных технологий позволило изготавливать достаточно чувствительные акселерометры, гироскопы и совмещенные гироскопы-акселерометры в небольших габаритах вместе с необходимыми для проведения измерений электронными схемами. Промышленно выпускаются одно-, двух- и трехосные акселерометры и гироскопы-акселерометры, в том числе интеллектуальные, способные выполнять множество сервисных функций.

В вибрационных сенсорах первичным информационным сигналом является изменение состояния механических колебаний тела или системы тел. В XX в. вибрационные сенсоры на пьезоэлементах широко использовали для построения микровесов, газовых сенсоров, сенсоров малых давлений и сил, виброметров. За последние десятилетия разработаны еще более чувствительные и эффективные микроэлектронные вибрационные сенсоры на кантилеверах. Введение в состав вибрационного сенсора встроенного микропроцессора, памяти и матричного дисплея позволило выполнять непосредственно в сенсоре спектральный анализ механических колебаний и выводить на дисплей не только требуемые интегральные параметры колебаний, но и их частотные спектры. Виброанализаторы стали эффективным средством вибродиагностики, позволяя наглядно увидеть частотную структуру колебаний контролируемых объектов, связанную с основными механическими движениями отдельных их узлов и деталей, быстро выявить источник нежелательных или полезных изменений. Проводимый с их помощью профилактический виброконтроль позволяет экономить значительные средства, предотвращая аварии, брак и аварийный простой дорогого технического оборудования и производственных линий.

Значительное развитие получили и хроматографические сенсоры, позволяющие анализировать и контролировать состав сложных смесей веществ, имеющих близкие физико-химические свойства. В них при переносе контролируемой пробы с помощью подвижной фазы (жидкость или газ) сквозь неподвижный сорбент происходит пространственное разделение компонентов смеси. Появились портативные интеллектуальные хроматографы, позволяющие не только формировать и выводить на дисплей в любом заданном формате хроматограммы, но также проводить калибровку устройств хроматографа, запоминать её результаты, с их учетом интерпретировать хроматограммы, рассчитывать и выводить интересующие пользователя результаты анализа, автоматически проводить многие варианты заранее предписанных программой

анализов с производительностью до 1000 анализов за смену. Процесс миниатюризации и совершенствования хроматографических сенсоров только начался.

5. Физические основы работы акустических сенсоров. Приемники акустических сигналов.

5.1. Физические основы работы акустических сенсоров

В **акустических сенсорах** первичные информационные сигналы являются акустическими. Это, например, звуки живой речи, музыка, пение птиц, сигналы эхолокации дельфинов или акустические сигналы в ультразвуковой диагностике, поверхностные акустические волны и т.п.

Напомним, что акустические волны – это колебания давления, распространяющиеся в воздухе (газах), жидкости или в твердой среде. Известно, что акустические волны распространяются значительно медленнее, чем радиоволны: в воздухе, например, со скоростью около 340 м/с, в воде – около 1,5 км/с, в твердых телах – 3-6 км/с. И это имеет свои положительные стороны.

По частоте колебаний акустические волны подразделяют на:

- инфразвуки (частота меньше 16 Гц);
- звуки (диапазон частот от 16 Гц до 20 кГц), которые воспринимает человеческое ухо;
- ультразвуки (от 20 кГц до 1 ГГц);
- гиперзвуки (свыше 1 ГГц, вплоть до 10^{13} Гц).

Инфразвуки в воде (напр., в морях и океанах) могут распространяться на сотни километров. Воспринимая их, обитатели моря заранее "слышат" приближение шторма. Гиперзвуки и ультразвуки сильно рассеиваются, поглощаются и поэтому затухают гораздо быстрее.

Ультразвуковые волны по частоте обычно делят на три диапазона:

- низкочастотный (16–100 кГц, длина волны в воздухе 3-20 мм, в воде 15-90 мм);
- средних частот (0,1-10 МГц, длина волны в воздухе 0,034–3,4 мм, в воде 0,15-15 мм);
- высокочастотный (10–1000 МГц, длина волны в воздухе 0,34-34 мкм, в воде 1,5–150 мкм).

Акустические волны естественного происхождения, как правило, являются сложными, несут с собой колебания разных частот. Их частотный состав обычно характеризуют частотно-амплитудным спектром – зависимостью интенсивности или амплитуды колебаний от частоты. Музыкальные звуки имеют в основном дискретный спектр, другие – непрерывный спектр. Звуковые шумы имеют очень широкий непрерывный спектр частот.

Интенсивность акустических, как и всех других видов волн характеризуют средней энергией, переносимой ими за единицу времени через единицу площади, перпендикулярной к направлению распространения, и измеряют в Вт/м². Специфической характеристикой интенсивности акустических волн является амплитуда колебаний давления (Па). В области звуков, которые слышит человек, используют и логарифмическую меру громкости звука – так называемый "*уровень звукового давления*". Его выражают в децибелах (дБ) и вычисляют по формуле

$$N=20 \lg(p/p_0) \quad (5.1)$$

где p – амплитуда колебаний давления в паскалях, а $p_0= 2 \times 10^{-5}$ Па– это так называемый "*порог слышимости*", т.е. минимальная амплитуда звуковых колебаний, которые способно услышать человеческое ухо.

При свободном распространении в однородной среде без поглощения и рассеяния интенсивность акустических волн уменьшается пропорционально квадрату расстояния от источника. В реальных средах имеют место поглощение, а также рассеяние акустических волн на неоднородностях, из-за чего интенсивность их с расстоянием убывает быстрее.

В акустических сенсорах часто используют эффект Доплера – изменение частоты колебаний, которые воспринимает наблюдатель, при движении источника волн или наблюдателя относительно друг

друга или относительно той среды, в которой распространяются волны. Если наблюдатель неподвижен относительно среды распространения, а источник акустических волн приближается к наблюдателю со скоростью v , то частота колебаний, которые воспринимает наблюдатель, определяется формулой

$$f=f_0(1+v/v_{ак}) \quad (5.2)$$

где f_0 – частота колебаний в источнике акустических волн, $v_{ак}$ – скорость распространения акустических волн в среде. Воспринимаемая нами частота акустических волн от источника, который к нам приближается, выше, а от источника, который от нас удаляется – ниже. По величине частотного сдвига можно определить скорость движения источника акустических волн относительно наблюдателя.

Если, наоборот, источник акустических волн неподвижен относительно среды распространения, а наблюдатель приближается к источнику со скоростью v , то частота колебаний, воспринимаемых наблюдателем, определяется по формуле

$$f=f_0(1+v/v_{ак}) \quad (5.3)$$

Воспринимаемая нами частота выше, когда мы приближаемся к источнику, и ниже, когда мы отдаляемся от него.

Если источник акустических волн движется относительно среды со скоростью $v_{ист}$, а приемник – со скоростью $v_{пр}$ навстречу источнику, то частота колебаний, которую он воспринимает, определяется по формуле

$$f=f_0(1+ v_{пр}/v_{ак})/(1- v_{ист}/v_{ак}) \quad (5.4)$$

В эхолокации важную роль играет и так называемый "двойной эффект Доплера" – изменение частоты колебаний звука при отражении акустических волн от подвижных объектов. Подвижный объект сначала выступает в роли приемника, а потом (при переизлучении) – в роли источника вторичных акустических волн. В этом случае изменение частоты вычисляется по формуле

$$f=f_0(1+ v \cos \alpha_{пад} /v_{ак}) / (1- \cos \alpha_{от} /v_{ак}) \quad (5.5)$$

где $\alpha_{пад}$ и $\alpha_{от}$ – углы между волновым вектором падающей либо отраженной волны и перпендикулярной составляющей скорости движения поверхности объекта соответственно. Если объект приближается к приемнику, то частота выше, а если отдаляется – ниже. По изменению частоты можно определить скорость движения объекта.

Более детальную информацию относительно физики акустических волн можно получить из профессиональных книг.

5.2. Приемники акустических сигналов

Поскольку акустические волны – это колебания давления, то для восприятия их применяют элементы, чувствительные к быстрым колебаниям внешнего давления. Как правило, это легкие мембраны или диафрагмы, преобразующие колебания давления воздуха, жидкости или твердого тела в механические колебания, которые, в свою очередь, превращаются далее в электрические сигналы или в сигналы другой природы.

Датчики, чувствительные к звуковым волнам, распространяющимся в воздухе или в газах, обычно называют **микрофонами** ; датчики, чувствительные к акустическим волнам, которые распространяются в воде или в жидкостях, – гидрофонами ; а датчики акустических волн в твердых телах, – стетоскопами. Врачи, например, уже много столетий применяют механические стетоскопы для прослушивания звуков внутри грудной клетки человека, возникающих в результате сокращений сердца, прохождения воздуха по дыхательным путям и т.д.

Основными параметрами акустических датчиков являются: частотный и динамический диапазоны, чувствительность, диаграмма направленности и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ).

5.2.1. Микрофоны

Первые **микрофоны** были *резистивными*. Для преобразования механических колебаний в электрический сигнал в них использовали угольный (графитовый) порошок, электрическое сопротивление которого уменьшалось с возрастанием давления. Затем набор

принципов работы акустических датчиков значительно расширился. Ныне используются: электростатические (конденсаторные, емкостные), волоконно-оптические, пьезоэлектрические, пьезорезистивные, электретные и другие типы таких датчиков.

В электростатических микрофонах мембрана, вибрирующая под влиянием акустических сигналов, служит одновременно и одной из обкладок конденсатора. Если электрический заряд q на конденсаторе остается неизменным, а вибрации мембраны, т.е. перемещения одной из его пластин относительно другой, приводят к изменению емкости, то следствием является изменение напряжения на конденсаторе по закону

$$U=qd/(\epsilon_0 S) \quad (5.6)$$

где d – переменное расстояние между пластинами конденсатора, S – их площадь; ϵ_0 – известная электрическая постоянная. Переменное напряжение в данном случае и является выходным сигналом, который дальше усиливается.

Электретные микрофоны отличаются тем, что для них не нужен внешний источник напряжения, так как источником электрического поля в них является электрет – материал с постоянной (иногда говорят "замороженной") электрической поляризацией.

Принцип действия *волоконно-оптического* акустического датчика такой же, как описано в "Виды механических сенсоров. Представление о микросистемных технологиях. Деформационные сенсоры" , рис. 2.10. Принципы действия *пьезоэлектрических* и *пьезорезистивных* датчиков описаны в разделе 3.

Промышленность выпускает сейчас много типов высококачественных микрофонов. Для примера на рис. 5.1 показаны некоторые микрофоны компании Sanken. Слева – конденсаторный микрофон CS-1 массой 100 г и длиной 180 мм. Благодаря соответствующей конструкции приемной трубки (чувствительная мембрана глубоко утоплена, а пластинчатая мягкая боковая поверхность трубки глушит звуковые колебания, поступающие сбоку) этот микрофон имеет узкую диаграмму направленности в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц, почти плоскую амплитудно-частотную характеристику, высокую

чувствительность (-30 дБ/Па). Он не искажает звук, даже если установить его рядом с источником, отлично работает вплоть до громкостей звука в 137 дБ. Его используют в том числе и для профессиональной звукозаписи высочайшего качества.



Рис. 5.1. Высококачественные микрофоны компании Sanken

Конденсаторный микрофон СО-100К (в центре), предназначенный для профессиональных применений, имеет широкую диаграмму направленности, очень ровную АЧХ в диапазоне частот 20 Гц - 100 кГц, чувствительность -35 дБ/Па, высокое соотношение сигнал/шум. Отлично воспринимает и передает также и низкие частоты.

Микрофон CUW-180 (справа), предназначенный для стереофонической записи, имеет две конденсаторные капсулы, каждую из которых можно повернуть на любой угол до 180 deg. Близкое расположение капсул обеспечивает высокую когерентность фаз их сигналов. Микрофон очень удобен и для записи интервью, когда люди сидят напротив друг друга. Его чувствительность составляет -31 дБ/Па, АЧХ – плоская в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц.

Новое "дыхание" усовершенствованию микрофонов дало применение микросистемных технологий. Вместе с чувствительным к звуку датчиком появилась возможность сформировать в том же кристалле кремния и все электронные схемы, требуемые для усиления, селекции и обработки звуковых сигналов. Это привело к уменьшению на порядок размеров, массы и стоимости микрофонов, что очень важно для всех портативных устройств. Резко улучшились чувствительность

и другие характеристики микрофонов, уменьшилось влияние внешних помех и шумов. "MEMS микрофоны", как их стали называть, уже нашли широкое применение в портативных видеокамерах, в мобильных телефонах, видеотелефонах. По данным публикации [151] для этих применений ныне продаются десятки миллионов MEMS микрофонов за год. В недалеком будущем они найдут применение во многих новых бытовых приборах, которыми можно будет управлять голосом. Микроминиатюрные MEMS устройства для прослушивания можно спрятать практически в любом месте.

Фирма Akustica Inc. начала промышленный выпуск первой в мире акустической системы на КМОП кристалле размером 3,65x3x0,5 мм, выполняющей функции многих микрофонов, электронных блоков и программного обеспечения. Система перекрывает частотный диапазон от 100 Гц до 10 кГц, имеет чувствительность –40 дБ, потребляемую мощность – лишь 0,4 мВт.

5.2.2. Гидрофоны

В отличие от микрофонов, гидрофоны должны быть стойкими к высоким статическим давлениям, характерным для больших глубин. Их применяют в гидроакустике для прослушивания акустических сигналов и шумов, распространяющихся в жидкостях, для измерения параметров этих сигналов и в качестве составляющих элементов приемных гидроакустических антенн. Наиболее распространены электродинамические, пьезоэлектрические и магнитострикционные гидрофоны. В *магнитострикционных* гидрофонах используют т.н. "обратный магнитострикционный эффект" в ферромагнетиках – изменение магнитной индукции при изменениях внешнего давления, которое приводит к появлению переменной ЭДС в обмотке.

Некоторые из широкой палитры гидрофонов, выпускаемых промышленно, показаны на рис. 5.2.

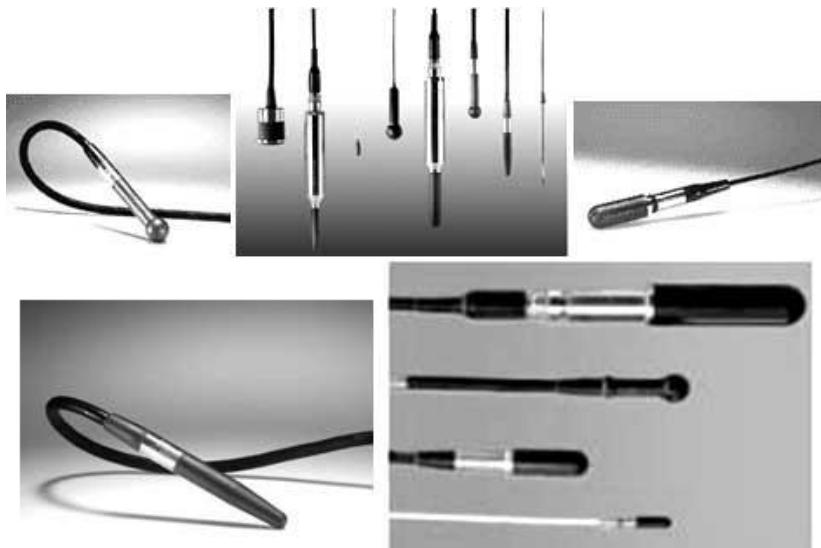


Рис. 5.2. Некоторые промышленные гидрофоны

В зависимости от назначения они имеют довольно разнообразное конструктивное исполнение и разные технические характеристики. В целом они перекрывают диапазон частот от 0,1 Гц (для восприятия и измерения инфразвуковых волн, распространяющихся в воде на сотни и даже на тысячи километров), до 500 кГц (для высокоточной ультразвуковой локации). Могут работать на глубинах до 1000 м и более, выдерживая статические давления свыше 10 МПа. Их диаграмма направленности, как правило, предельно широкая – все 360 deg по азимуту и до 170 deg в вертикальной плоскости. Амплитудно-частотная характеристика в рабочем диапазоне почти плоская. Для примера на рис. 5.3 показана АЧХ гидрофона ТС4034 фирмы Reson, изображенного на рис. 5.2 внизу слева, (<http://www.reson.com/sw3154.asp>).

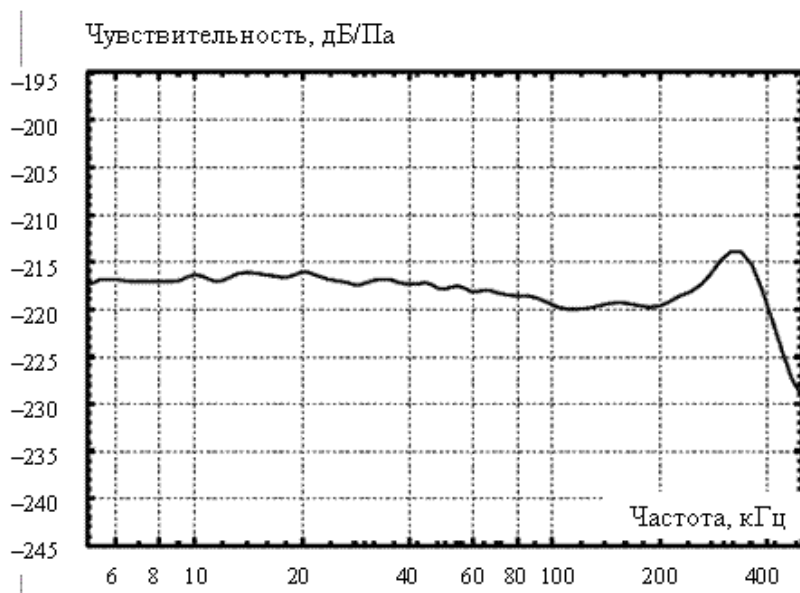


Рис. 5.3. Частотная характеристика гидрофона TC4034 фирмы Reson

Гидрофонам присуща очень высокая чувствительность – до 220 дБ. Чувствительный элемент герметически запаковывают в специальную, прозрачную для звука, синтетическую резину (например, полихлорпрен). Корпус делают из прочного, стойкого против коррозии и против обрастания в морской воде металла, – например, из сплава алюминий-бронза. Значительное внимание уделяют герметичному соединению гидрофона с кабелем и прочности кабеля, который может иметь длину порядка 1000 м.

Как и в случае микрофонов, значительный прогресс в усовершенствовании гидрофонов обеспечивает применение микросистемных технологий. Благодаря МСТ можно значительно расширить частотный диапазон и уже в самом гидрофоне выполнять селекцию и электронную обработку акустических сигналов, передавая по длинному кабелю уже хорошо обработанные мощные сигналы, устойчивые против электромагнитных помех и шумов.

5.2.3. Стетоскопы

В стетоскопах акустические колебания внешней грани твердого тела преобразуют в соответствующие колебания давления газа или жидкости. Они по звукопроводящей трубке передаются на чувствительный к акустическим колебаниям элемент. С целью повышения чувствительности площадь контакта стетоскопа с твердым телом увеличивают, а стенки звукопроводящей трубки постепенно сужают, чтобы сконцентрировать акустические колебания давления на небольшой площади и увеличить их амплитуду. Сужение, как правило, производится по экспоненциальному закону.

Длительное время чувствительным элементом стетоскопа было только ухо человека. Промышленность продолжает выпускать такие стетоскопы и сейчас – уже не только для медицинских и ветеринарных, но и для технических применений. Фирма Draper, например, выпускает стетоскоп D54503, предназначенный для выявления (по изменениям звуковой "картины") дефектов в двигателях, подшипниках и в других подвижных деталях работающих машин (<http://www.voltra.ru>).

Сейчас в стетоскопах применяют уже и "искусственное ухо". На рис. 5.4 слева показан медицинский электронный стетоскоп CADIScore фирмы CADITEC (Швейцария), который сам через грудную клетку человека воспринимает звуки работы сердца, усиливает их и воспроизводит в виде осциллограммы на жидкокристаллическом дисплее вместе со шкалой и отметками времени. Таким образом можно выявить и наглядно увидеть признаки даже неслышных ухом хрипов в дыхательных путях, сердечных аритмий и тахикардии (<http://www.8a.ru>). В случае необходимости фонограмму работы дыхательных путей и сердца можно передать на компьютер и задокументировать. С компьютера её можно передать также на большие расстояния через Интернет и получить срочную консультацию опытных специалистов. На этот же дисплей можно вывести также синхронную электрокардиограмму, полученную от электрокардиографа. Это делает электронный стетоскоп весьма ценным медицинским инструментом для диагностики заболеваний сердца.

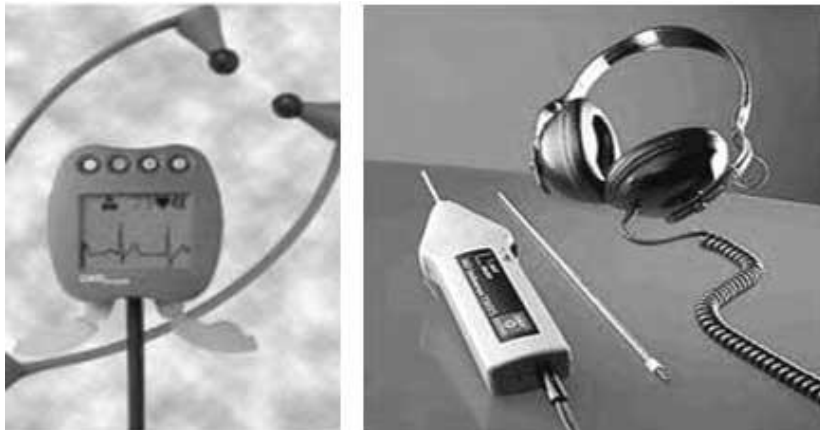


Рис. 5.4. Слева – электронный стетоскоп CADIScore швейцарской фирмы CADITEC. Виден жидкокристаллический дисплей с фонограммой и мини-наушники для параллельного прослушивания тонов сердца врачом-терапевтом. Справа - электронный стетоскоп SKF TMST2

На рис. 5.4 справа показан электронный стетоскоп SKF TMST2 – высококачественный акустический сенсор, предназначенный для технических применений, в первую очередь, – для диагностики (по характеру звука) правильности работы механически вращающихся узлов машин. С удлиненной насадкой возможно прослушивание узлов, "спрятанных" глубоко внутри машины.

5.2.4. Поверхностные микрофоны

Возможность с помощью стетоскопа собирать звук с большой поверхности и концентрировать его на малой площадке чувствительного элемента привела к созданию так называемых поверхностных микрофонов. По сути – это стетоскопы. Они имеют плоскую входную мембрану, внутренний объем газа для концентрирования звука и чувствительный акустический элемент. Входная мембрана с помощью специальной мастики крепится к большой по площади твердой поверхности, которая имеет хорошие акустические свойства, например, к пустотелой стене, к деке стола, к участку пола, под которым оставлено свободное пространство и т.п. Корпус поверхностного микрофона, как правило, литой, крепкий, а

внешняя часть мембраны покрыта специальной тяжелой резиной, которая гасит низкочастотные вибрации, сторонние шумы и сводит на нет обратную связь со звуком, распространяющимся в том же помещении через динамик. Применение поверхностных микрофонов привело к повышению качества звука, разборчивости передач и записей живой речи. Их можно установить так, чтобы они не привлекали к себе внимания. И теперь их широко применяют в конференц-залах. Некоторые типы промышленных поверхностных микрофонов (стетоскопов) показаны на рис. 5.5.



Рис. 5.5. Некоторые типы "поверхностных микрофонов"

Особый тип поверхностных микрофонов разработала фирма Briel & Кjaerg. Они предназначены для размещения на внешней поверхности самолетов, автомобилей, ракет, на лопастях турбин и т.п., с целью восприятия и записи вибраций и акустических колебаний, возникающих в процессе движения. Задача оказалась не из легких: ведь стетоскоп должен надежно работать в дождь и град, в условиях турбулентности, при значительных перепадах температуры (от -50 deg C до $+100 \text{ deg C}$) и давления.

Задачу решили благодаря применению микросистемных технологий после многих исследований и экспериментов. Одним из трудно решаемых вопросов, например, было противодействие значительным перепадам статического давления (например, при взлете ракеты, когда она быстро набирает высоту). Вопрос удалось решить путем формирования в кристалле кремния с миниатюрным датчиком давления специальных обходных каналов, соединяющих внутренний объем сенсора с внешней средой (рис. 5.6 слева). Благодаря таким каналам эффективно выравнивается статическая составляющая давления, и сенсор отлично работает как при повышенных, так и при низких значениях давления внешней среды.

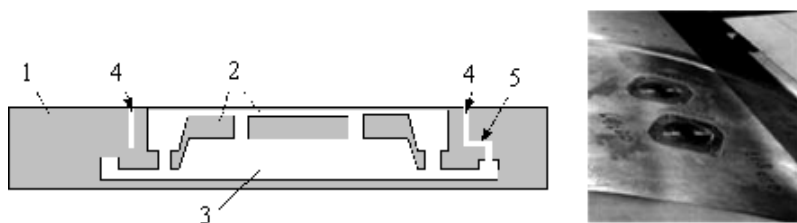


Рис. 5.6. Слева – конструкция твердотельного акустического сенсора поверхностного микрофона 4948 фирмы Bruel & Кјаег: 1 – кристалл кремния; 2 – кремниевая мембрана для измерения колебаний давления; 3 – внутренняя полость; 4 – вертикальные обводные каналы; 5 – горизонтальные обводные каналы. Справа – фотография двух сенсоров, установленных на крыле самолета

Созданный поверхностный микрофон воспринимает вибрации и звуковые колебания в диапазоне частот от 5 Гц до 20 кГц, в динамическом диапазоне от 55 до 160 дБ и продемонстрировал высокую стабильность (дрейф 1 дБ за 1000 лет) в самых сложных условиях. С ним стали возможны такие акустические измерения, о которых раньше инженеры могли только мечтать. Появилась возможность количественного определения "усталости" металла, выявления причин повышенного шума, регистрация изменений режимов аэродинамического обтекания и т.п.

Еще одним интересным применением стетоскопов является прослушивание и запись "подземной музыки". На рис. 5.7 показан, например, исследователь, прослушивающий с помощью электронного стетоскопа "музыку" глетчера.



Рис. 5.7. Джекоб Киркегаард (Jacob Kirkegaard) с помощью электронного стетоскопа прослушивает и записывает "музыку" одного из глетчеров в Исландии

Интеллектуальные электронные стетоскопы открыли нам "звуковое окно" в таинственный мир подземной природы. С их помощью можно прослушивать и записывать естественные звуки гор, пробуждающихся вулканов, фонтанирующих гейзеров, плавающих айсбергов и т.д. Оказывается, что им присуща не только непривычная для нас своеобразная акустическая красота и гармония. С их помощью можно узнать много нового о свойствах и о "внутренней жизни" этих объектов, своевременно предвидеть схождение горных лавин, продвижение глетчера, выбросы вулкана, разрушение айсберга и т.п.

5.3. Некоторые интеллектуальные акустические сенсоры

С использованием вышеописанных приемников акустических сигналов строят интеллектуальные акустические сенсоры, в том числе такие, в которых с помощью микропроцессора выполняется профессиональная обработка первичных сигналов и обеспечивается удобный сервис.

5.3.1. Диктофоны

Одним из видов таких сенсоров являются современные диктофоны. Еще несколько десятилетий назад акустические сигналы, которые воспринимались микрофоном, усиливались и записывались на магнитную ленту в магнитофонах. Современные диктофоны уже не имеют подвижных узлов, и поэтому их можно применять в дороге, в условиях вибраций, запылённости, в значительно более широком диапазоне температур окружающей среды. Наличие встроенного микропроцессора и программного обеспечения позволяет в реальном времени фильтровать, обрабатывать, форматировать музыку, живую речь и другие звуковые последовательности в стандартные звуковые файлы, организовывать удобные для пользователя каталоги этих файлов, интерфейс с внешним компьютером или сетью связи. Используя флэш-память, можно записывать и сохранять очень большие объемы звуковых файлов.

Для примера на рис. 5.8 показаны образцы современных цифровых диктофонов SM и Olympus VN-1100.



Рис. 5.8. Образцы современных портативных цифровых диктофонов: слева – цифровой диктофон SM; справа – Olympus VN-1100

Цифровой диктофон SM рассчитан на запись звука на внешнюю флэш-память не только со встроенного в него микрофона, но и с телефонной линии. Записи в виде стандартных звуковых файлов (в целом до 1120 минут живой речи) можно прослушивать с помощью наушника, переносить на компьютер. В ходе записи диктофон сам автоматически

удаляет длинные паузы в речи, что позволяет эффективно использовать память. Масса этого диктофона только 17 г, габаритные размеры 51 x 42 x 11 мм. Литий-полимерные аккумуляторы обеспечивают 55 часов автономной работы в режиме записи и до 2,5 месяцев работы в режиме ожидания. При работе вместе с телефоном диктофон обеспечивает возможность автоматической регистрации входных телефонных звонков, запоминания номеров, с которых приходят звонки, даты и времени начала и конца разговора.

Портативный цифровой диктофон Olympus VN-1100 легкий, удобный, имеет типичный дизайн, дружественное к пользователю меню. Обеспечивает возможность записи до 17 часов разговора. Записи автоматически датируются и могут хранить пометки пользователя, легко переносятся в компьютер. Могут воспроизводиться, начиная с любого места.

5.3.2. Портативные звукоанализаторы

С тех пор как человечество поняло положительную роль мелодичных звуков и отрицательное влияние на наше здоровье шумов и раздражающих излишне громких звуков, появилась и начала возрастать потребность в их акустических измерениях. Потребность эта стала особенно актуальной, когда в технически развитых странах мира были приняты законы, регулирующие допустимые уровни промышленных и бытовых шумов. Еще до недавнего времени для измерений громкости звука, времени реверберации звуков в помещениях, для выявления и определения резонансных частот и прочих важных акустических характеристик помещений использовалась сложная стационарная аппаратура. Но возрастающая потребность в измерениях привела к созданию относительно недорогих портативных измерителей громкости звука и других параметров звуковых колебаний.

Давно известно, что акустические колебания могут нести в себе очень ценную информацию об источнике звука, о работе двигателей, машин, о состоянии механических конструкций. Но для использования этой информации нужен спектральный анализ звуков. За последние десятилетия с использованием современных технологий удалось создать довольно надежные, удобные, портативные анализаторы звуков. Один из них показан на рис. 5.9, а. Портативный анализатор звука 2250 фирмы Briel & Kjaer является двухканальным. Схема его

применения показана на рис. 5.9, б. Ко входу присоединяются приемники звука со встроенным предусилителем. Соединение может быть как непосредственным, так и через специальный кабель длиной в десятки метров. Анализатор получился весьма удобным и разносторонним помощником для специалистов по акустике. В зависимости от заложенного в его микрокомпьютер программного обеспечения, он может использоваться:

- как измеритель интенсивности или громкости звука;
- как регистратор среднего уровня шума на улицах города, в районах аэропортов, на промышленных предприятиях в разных частотных диапазонах;
- для исследования акустических свойств помещений, концертных залов;
- для точной настройки музыкальных инструментов, для контроля их качества, поиска путей их улучшения.

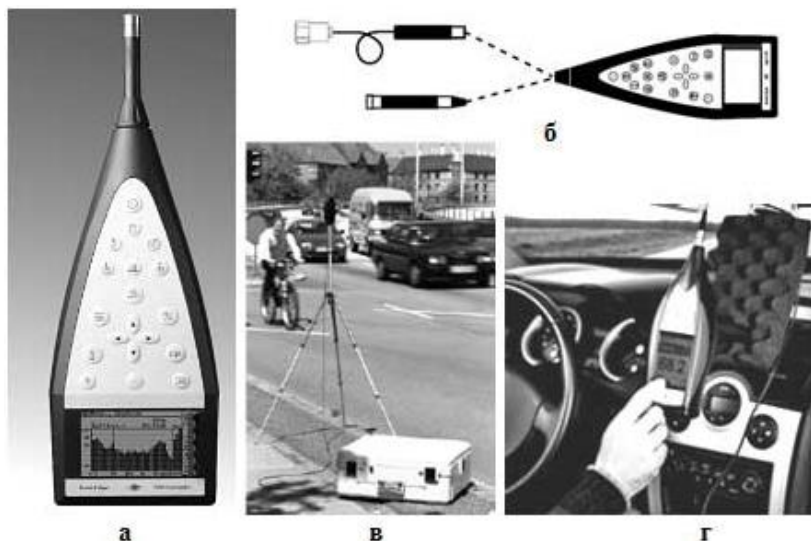


Рис. 5.9. Портативный анализатор звука семейства 2250 фирмы Brüel & Kjær

Анализатор может быстро разложить звуковые колебания в спектр, который выводит на свой жидкокристаллический дисплей. При этом он

может работать как с продолжительными, так и с кратковременными звуками, а также с механическими вибрациями, записывая их в свою память. С его помощью можно по изменению характера звука оперативно обнаружить сбои и нарушения в работе двигателей, машин, быстро находить причины неполадок.

На рис. 5.9, *в* показано применение анализатора звука для оперативного контроля шумов на улицах и площадях города, а на рис. 5.9, *г* – для мобильных измерений уровня шумов и создания шумовой карты города, окрестностей аэропорта, местности, окружающей слишком "шумные" предприятия. В этом случае микрофоны устанавливаются на крыше автомобиля, на котором объезжают контролируемую местность, фиксируя в памяти прибора измеренные уровни шума, соответствующие координаты и время. Если в автомобиле имеется GSM навигатор, то результаты измерений уровня шума автоматически привязываются к карте. Измеренный уровень шума может автоматически сравниваться с допустимым уровнем. При превышении уровня шума подается сигнал, и микропроцессор сам составляет соответствующий протокол.

Спектральный анализ звука выполняется в полосе частот от 0,1 Гц до 20 кГц. На дисплее отображается спектр, который состоит из свыше 400 полос с разрешающей способностью 50 Гц вблизи верхней частоты 20 кГц и 1 Гц на частотах ниже 300 Гц. Информация о спектре шума, о положении резонансных пиков позволяет быстро найти пути уменьшения шума или причины нежелательных изменений в работе оборудования.

При обследовании акустических свойств помещений одновременно определяются значения времени реверберации во всех звуковых октавах и выявляются все резонансные частоты помещения. Можно быстро определить уровень и качество звука в разных местах концертного зала, найти оптимальное размещение вспомогательных звуковых колонок и необходимый уровень усиления звука, выявить проблемы звукоизоляции помещения от уличного шума, найти пути их устранения и т.п.

Записанные с помощью портативных анализаторов звуковые файлы легко переносятся на компьютер для документирования и более глубокого профессионального анализа. В качестве примера на рис. 5.10 показан полученный в результате компьютерного анализа довольно

детальный трехмерный спектр одного из звуковых файлов в координатах "амплитуда - частота - время" после начала звучания.

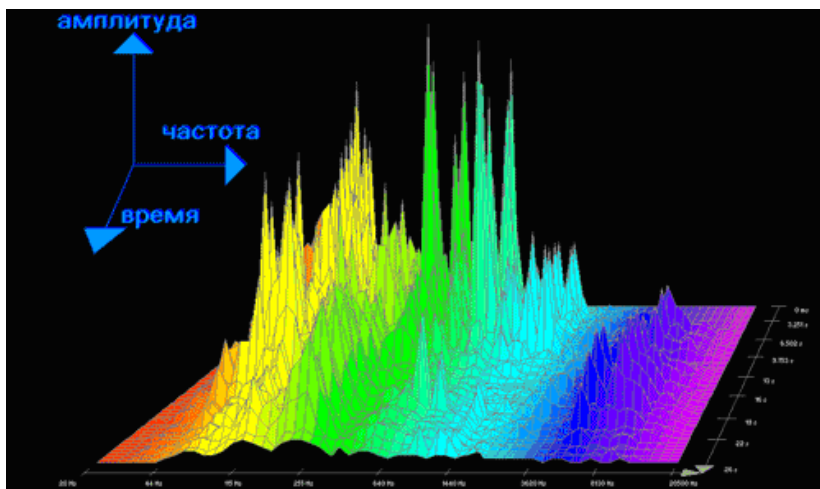


Рис. 5.10. Пример трехмерной картины одного из звуковых файлов в координатах "частота – амплитуда – время" от начала звучания

5.3.3. Беспроводная гарнитура

Все больше владельцев мобильных телефонов начинают пользоваться так называемой " **Bluetooth гарнитурой** ". Эти небольшие легкие акустические сенсоры крепят к уху с целью высвобождения рук от необходимости держать мобильный телефон, которым можно теперь дистанционно пользоваться на расстоянии до 10-20 м. С этой целью в гарнитуру встраиваются миниатюрный микрофон, схемы усиления сигналов от него, Bluetooth радиоприемник-передатчик, наушник и необходимые элементы управления. Некоторые образцы из широкого выбора имеющихся на рынке гарнитур Bluetooth показаны на [рис. 5.11](#). Целый ряд гарнитур поддерживает сервис выдачи управляющих команд голосом, голосовой набор номера, а через некоторые из них с помощью голоса можно даже управлять несколькими домашними устройствами, оснащенными интерфейсом Bluetooth. Это может быть, например, кондиционер или обогреватель, радиоприемник или телевизор.



Рис. 5.11. Некоторые гарнитуры Bluetooth

5.3.4. Гидроакустический телефон

К числу интеллектуальных акустических сенсоров можно отнести и гидроакустический телефон, специально созданный для обеспечения общения людей под водой. Его функциональная схема показана на [рис. 5.12](#). Звук голоса в микрофоне 1 превращается в электрические колебания, которые усиливаются в усилителе 2 и передаются на микрокомпьютер 3. Там они превращаются в двоичные коды, объединяются в стандартные цифровые "пакеты" и передаются на манипулятор сигналов 5. На него поступают также колебания несущей УЗ частоты от генератора 4. При необходимости поддержания секретности частота колебаний может изменяться по командам от микрокомпьютера 3 в соответствии с определенным "протоколом".

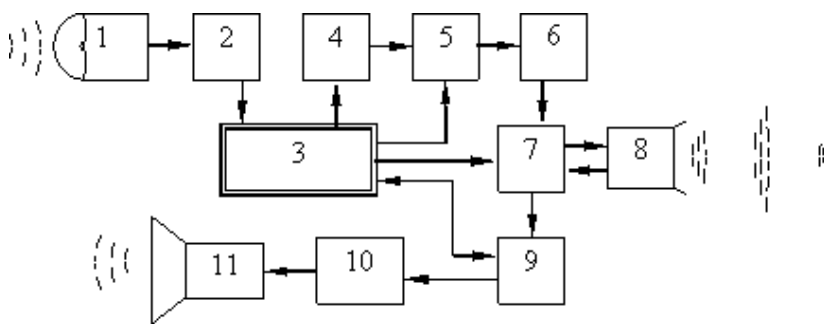


Рис. 5.12. Функциональная схема гидроакустического телефона

Манипулированные сигналы через усилитель мощности 6 и коммутатор 7 поступают на акустическую антенну 8 и излучаются в толщу воды в виде ультразвуковых волн. Распространяясь в воде, они доходят до абонента и принимаются его акустической антенной 8. Через коммутатор 7 принятые сигналы проходят на усилитель-демодулятор 9, передаются на микропроцессор 3, расшифровываются и проверяются на соответствие установленному протоколу и позывным абонента. Если передача предназначена именно данному абоненту, то сигналы поступают на усилитель звуковой частоты 10, а из него – на воспроизводитель звука 11. Это могут быть наушники или громкоговоритель. Такие гидроакустические телефоны применяют для связи с подводными аппаратами и связи между ними, а несколько упрощенные – для переговоров с водолазами.

Напомним также об автономных интеллектуальных гидроакустических буйках, которые сбрасывают в любое место в море или океане. Они начинают автоматически "слушать" и анализировать акустические сигналы, распространяющиеся в водной среде в заданных диапазонах частот. Они оснащены радиоприемным и передающим устройствами с собственными позывными сигналами и могут передавать полученную информацию на далекие расстояния и принимать задания на изменение частот или режимов работы. Такие гидроакустические буи могут заранее предупреждать о приближении штормов, цунами, о появлении в контролируемой акватории судов, морских животных, на которых установлен сигнализатор. Они могут использоваться также в качестве промежуточных приемо-передающих пунктов для сверхдальней связи с подводными лодками.

5.3.5. Прослушивающие устройства

Среди интеллектуальных акустических сенсоров имеются и приборы для незаметного *прослушивания* разговоров. Сразу же оговорим, что это является законным лишь при наличии разрешения суда или прокурора.

Одним из видов таких сенсоров являются направленные приемники звука (рис. 5.13) с рупорной 1 или с параболической антенной 2.

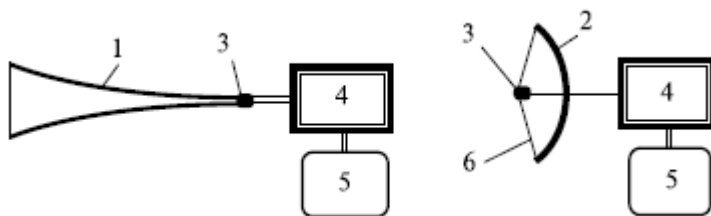


Рис. 5.13. Функциональная схема направленных приемников звука: слева – с рупорной 1; справа – с параболической антенной 2; 3 – микрофон; 4 – электронный блок; 5 – наушники или громкоговоритель; 6 – растяжки для крепления микрофона

Такая антенна не только обеспечивает острую направленность и фильтрацию звуков, приходящих с других направлений, но и, собирая звук с большой поверхности, концентрирует его на малой площади микрофона 3, чем обеспечивает повышение чувствительности. В электронном блоке 4 производятся фильтрация, усиление и предварительная обработка сигналов. Усиленные звуковые сигналы можно прослушивать через наушники или громкоговоритель. Параллельно производится запись разговора в память сенсора.

С параболической антенной диаметром 0,4-1 м удается достичь остроты диаграммы направленности и чувствительности, достаточных для того, чтобы при отсутствии значительного постороннего акустического шума услышать и зафиксировать разговор, ведущийся на расстояниях до 1200 м. В реальных условиях города при наличии значительного звукового фона эта дистанция сокращается до 100 м.

Если разговор ведется внутри помещения или автомобиля за закрытыми окнами, то для его прослушивания разработаны так называемые "лазерные микрофоны", принцип действия которых раскрывается на рис. 5.14.

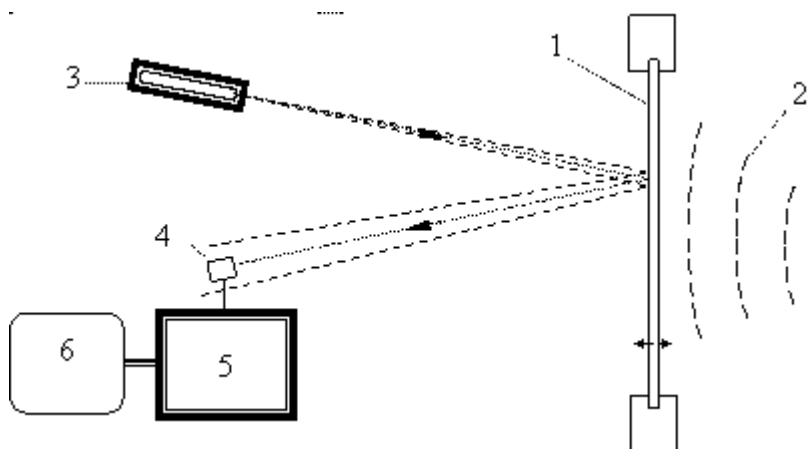


Рис. 5.14. Функциональная схема лазерного микрофона

Звуковые волны 2, достигая стекла 1, вызывают его вибрацию с соответствующими звуковыми частотами. Здесь стеклянная пластина окна играет роль мембраны – чувствительного элемента сенсора, который превращает звуковые сигналы в механические колебания. На значительном расстоянии от стекла (до 100–200 м) устанавливают лазер 3, невидимый (как правило, инфракрасный) модулированный луч которого направляют на стекло. На таком же примерно расстоянии в пределах конуса отраженного от стекла лазерного луча располагают приемный пункт, в состав которого входят один или несколько фотоприемников 4, электронный блок 5 и генератор звука 6 (наушники или громкоговоритель). При вибрациях стекла изменяется фаза световых колебаний, попадающих на фоточувствительный элемент в точке приема. Сигналы от него в электронном блоке усиливаются, фильтруются, детектируются и записываются, а также могут быть прослушаны через наушники 6.

"Профи" по прослушиванию охотно используют устройства с применением стетоскопа. Миниатюрный стетоскоп крепят к стене помещения, примыкающего к охраняемому, – к бетонной панели потолка, пола или к стене того участка системы вентиляции, которая подходит к прослушиваемому помещению. Чувствительность современных стетоскопов позволяет прослушивать разговор за

бетонной стеной толщиной до 1 м. Сигнал от стетоскопа передается на электронный блок, который его усиливает, обрабатывает и через кабель посылает к передатчику. Раньше это были радиопередатчики на ультракоротких волнах. Теперь чаще применяют оптические инфракрасные передатчики с большой угловой апертурой излучения. Это позволяет установить приемник в любом удобном месте довольно широкой зоны, так как радиус приема составляет 500 м и более. Передачу инфракрасными лучами выявить значительно тяжелей, чем радиопередачу. Тем более, что имеющийся в электронном блоке микропроцессор позволяет разбить разговор на фрагменты, сжать соответствующую информацию и передавать её очень кратковременными информационными пакетами в заранее обусловленные моменты времени, известные лишь тому, кто должен принимать передачу.

Заметим, однако, что от обоих последних видов прослушивания можно защититься, прикрепив к стеклу окна (к стене, потолку, полу) небольшие пьезоэлектрические преобразователи и подавать на них напряжение от генератора шума. Создаваемые ими звуковые колебания должны быть слабыми, чтобы не помешать разговору внутри помещения, но они создают очень серьезные помехи прослушиванию посторонними.

Краткие итоги

Датчики, чувствительные к звуковым волнам, распространяющимся в воздухе или в газах, обычно называют микрофонами; чувствительные к волнам, которые распространяются в воде или в жидкостях, – гидрофонами; а к акустическим волнам в твердых телах, – стетоскопами. Основными параметрами акустических датчиков являются частотный и динамический диапазоны, чувствительность, диаграмма направленности и амплитудно-частотная характеристика. Новое "дыхание" усовершенствованию акустических датчиков дало применение МСТ. Появилась возможность вместе с чувствительным к звуку датчиком сформировать в том же кристалле кремния и все электронные схемы, требуемые для усиления, селекции и обработки звуковых сигналов. Это привело к уменьшению на порядок размеров, массы и стоимости датчиков, к улучшению их чувствительности и других характеристик, к уменьшению влияния внешних помех и шумов. С использованием новых приемников акустических сигналов построены многие виды интеллектуальных акустических сенсоров. В

современных диктофонах встроенный микропроцессор позволяет сразу же фильтровать, обрабатывать, форматировать музыку, живую речь и другие звуковые последовательности в стандартные звуковые файлы, организовывать удобные для пользователя каталоги этих файлов, интерфейс с внешним компьютером или сетью связи.

Интеллектуальные звукоанализаторы могут работать как с продолжительными, так и с кратковременными звуками, быстро разложить звуковые колебания в спектр, выполнить записанную в их память сложную обработку данных. " Беспроводная гарнитура " позволяет дистанционно пользоваться мобильным телефоном, распознавать некоторые фрагменты Вашей речи и, благодаря этому, осуществлять голосовой набор номера и управлять голосом некоторой "умной" домашней техникой. Интеллектуальные гидроакустические сенсоры позволяют переговариваться под водой, изучать мир подводных звуков, заранее предупреждать о приближении шторма, цунами и т.д. Интеллектуальные подслушивающие приборы позволяют незаметно подслушивать разговоры на довольно больших расстояниях, за закрытыми окнами, в закрытых помещениях. Интеллектуальные электронные стетоскопы открыли нам звуковое окно в таинственный мир подземной природы. С их помощью можно прослушивать и записывать естественные звуки гор, пробуждающихся вулканов, фонтанирующих гейзеров, плавающих айсбергов и т.д. Интеллектуальные медицинские стетоскопы позволяют выявить и наглядно увидеть признаки даже неслышных ухом сердечных аритмий, нарушений в дыхательных путях, документировать фонограммы, передать их на компьютер или в сеть связи для срочной консультации со специалистами.

6. Активные акустические сенсоры: тонометры, эхолоты, гидролокаторы

6.1. Тонометры

До сих пор мы рассматривали в основном пассивные акустические сенсоры, "пассивные" в том плане, что акустические сигналы к ним приходят "со стороны", а сенсоры их лишь воспринимают. Однако разработаны и широко используются также и активные акустические сенсоры. Из них мы рассмотрим в этой лекции тонометры, эхолоты и гидролокаторы.

Люди, больные на гипертензию или гипотензию (повышенное или пониженное артериальное давление крови, которые называют также гипертонией и гипотонией), знают, что такое тонометр. Артериальное давление – это один из очень важных показателей физиологического состояния сердечно-сосудистой системы человека. Давление крови в артериях изменяется в такт с работой сердца. Когда сердце сжимается и выталкивает кровь в артерии, давление в них кратковременно повышается и достигает своего пика, который называют систолическим или "верхним" давлением. В фазе максимального расслабления сердечных мышц давление крови в артериях наиболее низкое, – его называют диастолическим или "нижним" давлением.

Всемирная организация здравоохранения утвердила нормы, в соответствии с которыми нормальными (допустимыми) для взрослого человека считаются систолическое давление от 100 до 140 мм рт. ст. и диастолическое давление от 60 до 90 мм рт. ст. Повышенное артериальное давление ускоряет изнашивание, старение кровеносных сосудов, неоправданно увеличивает интенсивность работы сердца и нагрузку на него, повышает риск инсультов, инфарктов. Пониженное артериальное давление вызывает у человека апатию, вялость, снижение жизненного тонуса. Поэтому как с гипертензией, так и с гипотензией надо бороться с помощью здорового способа жизни, лекарств или средств народной медицины. Но для правильного лечения надо контролировать артериальное давление. Для этого и нужны тонометры – приборы для измерения артериального давления.

6.1.1. Ручные тонометры

В XVIII–XX веках использовались *ручные* тонометры, современный вариант которых показан на рис. 6.1. Такой тонометр состоит из манжеты 1, резиновой груши 2, соединительных резиновых трубок 3, механического манометра 4, фонендоскопа 5 и вентиля 6 для выпуска воздуха.

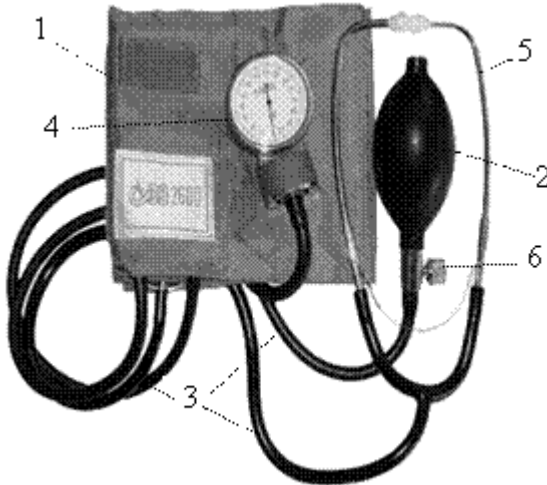


Рис. 6.1. Ручной тонометр

Перед измерением манжету 1 накладывают на плечо пациента так, чтобы ее резиновый мешочек охватил весь обвод руки, и застегивают. Наушники фонендоскопа 5 вставляют в ухо (врача, медсестры или самого пациента, если он измеряет давление сам себе), а слуховой элемент фонендоскопа (стетоскоп) вставляют под край манжеты у сгиба локтя над артерией. Закрывают клапан 6 и с помощью резиновой "груши" 2 через соединительную трубку 3 нагнетают в манжету воздух до тех пор, пока в наушниках фонендоскопа не исчезнет звук пульсации крови в артерии.

Дело в том, что через резиновый мешочек созданное в манжете давление передается на живые ткани под ней, в том числе и на артерию. Когда внешнее давление превышает давление крови внутри артерии, последняя перекрывается, и кровь уже не может проходить по ней дальше. Поэтому пульсация крови за манжетой и прекращается. Через соединительную трубку давление в манжете измеряется манометром 4. Тот, кто слушает звук в фонендоскопе (врач, медсестра или сам пациент), – начинает с помощью вентиля 6 понемногу уменьшать ("сравливать") давление в манжете со скоростью 1-5 мм рт. ст. за секунду. Когда давление в манжете сравнивается с систолическим, кровь в моменты систолы получает возможность снова проталкиваться по артерии. Благодаря этому за манжетой снова

слышится звук пульсации крови. В момент возобновления пульсаций надо сразу же считать значение давления на манометре. Оно и является систолическим давлением. Продолжая стравливать давление и слушая звуки пульсации крови через фонендоскоп, надо теперь уловить момент, когда интенсивность этих звуков резко уменьшается.

Давление, которое в этот момент показывает манометр, и принимают за диастолическое значение. Ведь интенсивность пульсаций резко уменьшается именно потому, что, как только внешнее давление на артерию становится меньше диастолического, кровь во всех фазах сердечного цикла проходит по артериям без напряжения, следствием чего и становится значительное ослабление звука пульсаций.

Таким образом, звук пульсации крови в артерии и является здесь тем первичным информационным сигналом, который позволяет измерять артериальное давление крови. Поэтому тонометры и относим мы к классу акустических сенсоров. Тонометры являются активными сенсорами потому, что они активно воздействуют на кровеносные артерии, оказывая на них меняющееся внешнее давление. Т.е. манжета служит в тонометре узлом активного влияния на контролируемый объект (кровеносные артерии). А фонендоскоп служит акустическим чувствительным элементом, позволяющим наблюдать реакцию объекта на соответствующее воздействие.

6.1.2. Полуавтоматические электронные тонометры

Ныне все более употребительными становятся интеллектуальные электронные (цифровые) тонометры. Их разделяют на 2 группы: полуавтоматические и автоматические. В полуавтоматических тонометрах ручной остается только операция нагнетания воздуха в манжету (с помощью резиновой груши), а в некоторых – еще и операция постепенного снижения давления в манжете (с помощью ручного вентиля). Мы не принимаем во внимание операции наложения и снятия манжеты, так как они являются ручными и в автоматических тонометрах.

Две из многих марок *полуавтоматических* тонометров показаны на рис. 6.2. Такие тонометры состоят из манжеты, резиновой "груши", электронного блока и соединительных трубок. В состав электронного блока входит микрофон, усилитель и селектор звуковых сигналов, датчик давления в манжете, автоматически управляемый воздушный

клапан, звуковой сигнализатор, микрокомпьютер, жидкокристаллический индикатор и кнопки управления прибором.



Рис. 6.2. Образцы полуавтоматических тонометров

Пользователь накладывает манжету на плечо, закрепляет ее застёжкой, включает прибор. После появления на экране жидкокристаллического дисплея соответствующей пометки, надо с помощью резиновой "груши" нагнетать воздух в манжету. Микропроцессор непрерывно следит за нарастанием давления в манжете и может отображать его значение на экране. Когда давление достигает нужного уровня, микропроцессор подает звуковой сигнал, после которого нагнетание воздуха надо прекратить. Дальше все происходит автоматически. Микропроцессор, непрерывно "слушая" сигнал из микрофона, шаг за шагом открывает на доли секунды воздушный клапан, стравливая немного воздуха из манжеты, и фиксирует величину снижения давления. Он сам регулирует время открывания клапана так, чтобы темп снижения давления не превышал 1-3 мм рт. ст. в секунду (с каждым ударом сердца). Как только из микрофона поступает первый звуковой тон, который свидетельствует о начале пульсирования крови в артерии за манжетой, микропроцессор фиксирует значение систолического давления. А в момент, когда интенсивность звуковых тонов резко уменьшается, фиксирует диастолическое давление. Кроме того, микропроцессор в ходе измерения давления вычисляет и интервалы времени между последовательными ударами сердца, подсчитывает среднюю частоту пульса и вариации длительности интервалов между ударами. После фиксации диастолического давления, сам микропроцессор открывает клапан. Воздух выходит из

манжеты, и давление в ней быстро падает до нуля. Измерение заканчивается, а компьютер выводит на экран дисплея найденные значения верхнего и нижнего артериального давления, частоту пульса и предупреждения в случае ошибок или выявления существенной сердечной аритмии.

В некоторых тонометрах все эти значения вместе с датой и временем измерения фиксируются в энергонезависимой памяти прибора, где могут сохраняться данные 30–100 измерений. В этом случае микропроцессор может вычислять и выводить значения среднего артериального давления и частоты пульса за последний период, количество случаев аритмии, и т.п. Некоторые полуавтоматические тонометры имеют также цветную шкалу артериального давления, на которой в виде столбиков отображаются измеренные уровни давления и красным цветом выделяются опасные зоны.

6.1.3. Автоматические электронные тонометры

Некоторые марки автоматических тонометров показаны на рис. 6.3. В их комплектацию уже не входит резиновая груша, так как процесс нагнетания воздуха в этих тонометрах тоже автоматизирован. Для этого в электронном блоке имеется миниатюрный управляемый электронасос. Пользователю остается лишь правильно наложить манжету на плечо и нажать кнопку. Весь дальнейший процесс измерения происходит автоматически. Если в процессе измерения появляются какие-то помехи (перебои сердечного ритма, шевеление руки, кашель, посторонний громкий звук и т.п.), то встроенный в прибор микропроцессор сам запускает процесс измерения повторно.



Рис. 6.3. Образцы автоматических тонометров

Полностью автоматический режим дает также возможность повысить точность измерения. Если, например, момент перехода через систолическое давление случайно совпал с фазой расслабления сердечной мышцы, то микропроцессор дает команду насосу снова повысить давление в манжете несколько выше систолического, и измерение последнего автоматически повторяется в более медленном темпе снижения давления. Запомнив артериальное давление данного пользователя, микропроцессор при следующих измерениях сам регулирует уровень нагнетания воздуха так, чтобы он лишь на необходимую величину превышал систолическое давление данного пациента, и обеспечивает тем самым более комфортные условия измерения. Некоторые из автоматических тонометров имеют также интерфейс к внешнему компьютеру, выводят на свой дисплей текущие дату и время. Они могут быть запрограммированы на различные сервисные действия. Например, напоминать звуковым сигналом и

значками на дисплее о необходимости приема лекарства или очередного измерения артериального давления и т.п.

На работу электронасоса расходуется значительно больше энергии, чем на измерение. Поэтому в автоматических тонометрах запас энергии встроенных аккумуляторов исчерпывается значительно быстрее, их приходится чаще заряжать. Чтобы избавиться от этого недостатка, автоматические тонометры стали выпускать с дополнительным трансформатором-адаптером, который сделал возможным безопасное питание их от обычной сети переменного тока.

6.1.4. Электронные тонометры с манжетой на запястье

Кроме автоматических тонометров с манжетой на плечо, выпускаются также автоматические тонометры с манжетой на запястье и даже на палец руки. Некоторые из таких тонометров показаны на рис. 6.4.



Рис. 6.4. Образцы автоматических тонометров с манжетой на запястье

Как правило, они меньше по размерам и поэтому удобней в пользовании. Их можно взять в дорогу, в отпуск, хотя они пока несколько уступают плечевым тонометрам в точности измерения артериального давления. Дело в том, что артерии в области запястья из-за наличия связок не так надежно перекрываются манжетой, и звуки пульсации крови здесь значительно приглушены. С целью повышения точности в некоторых из таких тонометров цикл измерения

автоматически повторяется трижды, а потом рассчитываются и выводятся средние значения.

6.2. Гидролокаторы

Еще более активными акустическими сенсорами являются эхолоты, которые сами генерируют акустические волны для того, чтобы собрать нужную информацию о контролируемых объектах. В этом они подобны радиолокаторам, но зондирование окружающей среды ведется не радиоволнами, а акустическими волнами. Поскольку акустические волны распространяются значительно медленнее, чем радиоволны, то время запаздывания отраженных сигналов значительно больше, что существенно упрощает обработку сигналов при зондировании на небольшие расстояния.

Преимущество в эхолокации обычно отдают ультразвуковым (далее УЗ) волнам, поскольку они

- имеют меньшую длину волны и поэтому более высокую разрешающую способность;
- при той же амплитуде колебаний давления имеют значительно более высокую интенсивность (которая пропорциональна квадрату частоты);
- не воспринимаются человеческим ухом, поэтому не создают для нас нежелательный звуковой фон.

УЗ волны средних и высоких частот довольно сильно поглощаются и быстро затухают в воздухе и газах. Поэтому для эхолокации в воздухе применяют преимущественно низкочастотные УЗ волны.

Эхолокацию в водной и вообще в жидкой среде принято называть *гидролокацией*. Первые гидролокационные приборы измеряли только глубину водоема, т.е. расстояние от акустической антенны до дна моря (океана, реки, озера). Именно такие приборы сначала и называли эхолотами. Если судно с эхолотом перемещалось, то на основе таких измерений строился профиль дна относительно поверхности воды вдоль траектории перемещения судна. Ныне понятие "эхолот" значительно расширилось. Эхолотами называют все сенсоры, которые действуют по принципу восприятия звуков, отраженных от расположенных поодаль предметов, т.е. по принципу эха (от греческого "эхо" – отраженный звук, отзвук, отклик).

В гидролокации названия " гидролокатор " и "эхолокатор", "эхолот", "сонар" (аббревиатура от английского названия "SOund NAvigation and Ranging", приблизительный перевод – звуковая навигация и измерение расстояний) стали практически синонимами.

6.2.1. Принцип действия гидролокатора

Принцип действия гидролокатора показан на рис. 6.5.

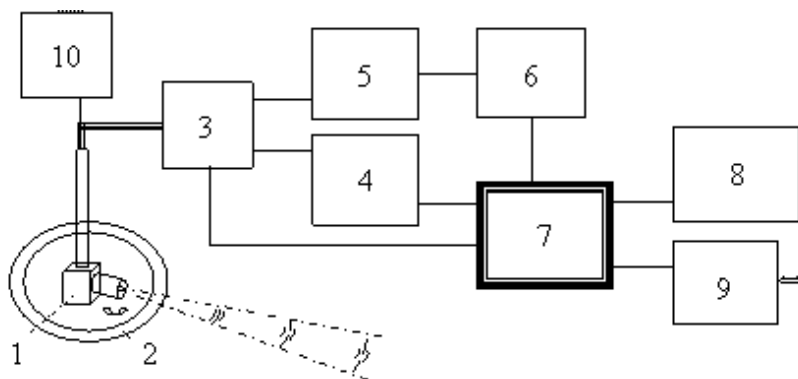


Рис. 6.5. Функциональная схема гидролокатора

Акустическая антенна 1, герметически защищенная оболочкой 2, сделанной из прозрачного для звука материала, находится в воде. Через кабель она соединена с коммутатором 3, который поочередно подключает к ней генератор 4 или приемник-усилитель акустических сигналов 5. Последний соединен с селектором сигналов 6, выход которого подключен к микропроцессору 7. Выходы последнего подключены к индикатору 8 и к интерфейсному блоку 9.

Работой гидролокатора автоматически управляет микропроцессор 7. Он подает на генератор 4 сигнал о начале зондирования водного пространства и команды о параметрах этого зондирования (частота ультразвука, продолжительность, структура и мощность УЗ импульсов, периодичность их повторения и т.п.). Затем микропроцессор 7 подает сигнал на коммутатор 3, который пропускает электрические колебания от генератора 4 к антенне 1. Там они с помощью пьезоэлектрического осциллятора превращаются в мощные акустические колебания и излучаются антенной в окружающее водное пространство.

В одних вариантах работы УЗ волна излучается равномерно во всех направлениях нижележащего водного полупространства. В других вариантах УЗ волна излучается в виде направленного конусообразного пучка волн. Распространяясь в воде, волны натываются на имеющиеся в ней объекты, отражаются и рассеиваются ими. Часть отраженных и рассеянных УЗ волн в значительно ослабленном виде возвращаются назад к акустической антенне 1. Независимо от углового распределения излучения угловая диаграмма направленности этой антенны на прием всегда достаточно узкая, что обеспечивает прием акустических сигналов лишь с того направления, куда "смотрит" антенна. Сразу же после посылки мощного акустического зондирующего сигнала микропроцессор 7 переключает коммутатор 3 на прием. При этом акустические сигналы, которые возвратились к антенне 1 от имеющихся в воде объектов, поступают на приемник 5, усиливаются и передаются в селектор 6. Селектор выделяет из них лишь информационно полезные составляющие, которые и передает на микропроцессор 7. Последний обрабатывает собранную информацию и формирует на индикаторе для пользователя картину, которая воссоздает окружающую обстановку в водной среде. Через интерфейсный блок 9 микропроцессор 7 может передавать некоторую важную информацию другим приборам и получать дополнительную информацию от них, также отображая ее на индикаторе (например, данные о температуре воды, атмосферном давлении, о направлении и силе ветра и т.п.).

Во многих гидролокаторах, особенно предназначенных для пассажирских, промышленных и военных кораблей, акустическая антенна 1 является подвижной. Чтобы "видеть" большой сектор окружающего водного пространства, она может вращаться вокруг горизонтальной и/или вертикальной оси. Вращение по азимуту обычно возможно на все 360 deg. Тогда для привода антенны в составе гидролокатора имеется еще и сервоусилитель 10, управляемый тоже от микропроцессора 7.

Пусть l – это минимальная дальность, которую "просматривает" или "прослушивает" гидролокатор. УЗ волна проходит до объектов, удаленных на такое расстояние, и обратно за время

$$\tau = 2l/v \quad (6.1)$$

Здесь v – это скорость распространения УЗ волн в воде. Длительность зондирующего УЗ импульса не должна превышать это время, поскольку иначе сигналы, отраженные от наиболее близких целей, не будут приняты.

Пусть L – это максимальная дальность, которую "просматривает" или "прослушивает" гидролокатор. УЗ волна проходит расстояние до самых удаленных объектов и обратно за время

$$t=2L/v \quad (6.2)$$

Период посылки зондирующих УЗ импульсов не должен быть меньше этого времени, поскольку иначе сигналы, отраженные от наиболее далеких целей, тоже не будут приняты. Таким образом, диапазон расстояний до объектов, обнаруживаемых гидролокатором (от l до L), максимальная длительность зондирующих УЗ импульсов τ и минимальный период их излучения T однозначно между собой связаны.

6.2.2. Примеры промышленных гидролокаторов

На рис. 6.6 показан базовый блок гидролокатора Furuno СН-250, который выпускается для применения на рыбопромысловом флоте. Его размеры 300 x 290 x 144 мм. Масса с акустической антенной 55 кг. Дальность обзора – до 1600 м. Максимальная глубина – до 600 м. Энергопотребление – 90 Вт.



Рис. 6.6. Вид базового блока гидролокатора Furuno CH-250

Акустическая антенна кругового и вертикального сканирования устанавливается на подводной части корпуса корабля (http://www.navimarin.ru/catalog_more.php?page=1&type=39&id=3).

Гидролокатор может работать в восьми режимах:

- отображение эхо-профиля пройденного маршрута;
- точное определение координат объектов.
- секторное или круговое сканирование водного пространства по азимуту;
- вертикальное сканирование;

- комбинация секторного и вертикального сканирования для оценки распределения косяка рыбы одновременно в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- прокладка маршрута с внимательным обследованием всех возможных подводных препятствий;
- обеспечение гидролокационного "захвата" указанного оператором объекта (косяка рыбы, подводного препятствия) и автоматическое слежение за ним пучком УЗ волн.

В зависимости от режима и условий сканирования рабочая частота составляет 60 кГц, 88 кГц или 150 кГц. С изменением диапазона дальности автоматически меняется продолжительность и периодичность импульсов. В случае выявления косяка рыбы или возникновения угрозы столкновения с подводным препятствием (рифом, скалой и т.п.) может подаваться звуковой сигнал. Имеется возможность соединения гидролокатора с внешними устройствами – персональным компьютером, приемником GPS, радаром и т.п.

Для повышения безопасности движения кораблей, особенно пассажирских, на них устанавливают гидролокаторы наблюдения в направлении движения корабля. Один из таких гидролокаторов показан на рис. 6.7.



Рис. 6.7.

Гидролокатор безопасности движения Interphase Twinscope Color: слева – в режиме горизонтального сканирования вперед (90°); справа – в режиме вертикального сканирования; внизу – вид базового блока

Слева сверху представлена область его горизонтального сканирования в секторе с углом 90 deg пучком УЗ волн частотой 200 кГц с вертикальным расхождением 12 deg. Одновременно работает и направленный вертикально вниз УЗ пучок эхолота. Вверху справа представлена область сканирования вперед по вертикали в пределах углов от 0 до 90 deg пучком УЗ волн с горизонтальным расхождением 12 deg. Дистанция наблюдения – до 360 м, контролируемая глубина – до 240 м. Базовый блок (рис. 6.7, внизу) оснащен цветным экраном 234 x 480 пикселей с режимами работы "дневной", "ночной" и "при ярком солнечном освещении". Автоматически измеряются и выводятся на экран данные о скорости судна и температуре воды, выдается звуковая сигнализация о приближении мелководья, подводных препятствий, об опасности захода в запрещенную зону, если она заведомо определена.

На экране могут выделяться отдельные окна для вывода навигационных и других данных. В базовом блоке имеется энергонезависимая память для сохранения всех необходимых протокольных данных.

Ныне разрабатываются и промышленно выпускаются десятки разных типов гидролокаторов для профессиональных и технических исследований. Они применяются, например:

- для поиска затонувших кораблей, самолетов, обломков ракет-носителей и других конструкций как на дне, так и в толще воды, что значительно сокращает время, материальные затраты и человеческие ресурсы и становится особенно важным при проведении аварийно-спасательных операций, в случае стихийных бедствий и других чрезвычайных ситуаций;
- для наблюдений за состоянием подводных сооружений, газо- и нефте-трубопроводов, конструкций ГЭС, опор мостов и т.п.;
- для быстрого составления точных батиметрических карт дна и фарватеров, часто меняющихся в результате естественных процессов;
- для исследований шельфа морского и океанического дна перед строительством там портов, перед проведением буровых работ, перед прокладкой кабелей связи, трубопроводов и т.п.

К таким гидролокаторам можно отнести, например, разработанный в НИИ приборостроения им. В.В. Тихомирова интерферометрический гидролокатор "ГИДРА-1" со сложными сигналами зондирования, с линейной частотной модуляцией и острой (1 deg) диаграммой направленности.



Рис. 6.8. Внешний вид гидролокатора кругового обзора Micron

Еще один пример – гидролокатор кругового обзора Micron (рис. 6.8), предназначенный для миниатюрных телеуправляемых подводных аппаратов типа "SeaBotix". Его внешний диаметр 56 мм, длина 78,5 мм, масса 0,29 кг. К нему прилагается кабель-трос длиной до 1000 м. Гидролокатор Micron может работать на глубинах до 500 м. Он имеет рабочую частоту, изменяемую в диапазоне от 650 кГц до 950 кГц, острую диаграмму направленности (2,5 deg по азимуту и 38 deg по вертикали) и обеспечивает разрешающую способность 50 мм на расстоянии до 75 м. Полученные и обработанные данные передаются через кабель-трос на пульт управления подводным аппаратом, где могут быть выведены на монитор.

Существует много более простых интеллектуальных сенсоров, в которых используется активная гидролокация. Один из них – измеритель потока жидкости Sonartron ST фирмы Honsberg показан на рис. 6.9.



Рис. 6.9. УЗ измеритель потока жидкости Sonartron ST

В проточную металлическую трубу, сквозь которую пропускается жидкость, друг против друга встроены излучатель и приемник УЗ импульсов. Эти импульсы проходят вдоль оси потока. Время запаздывания принятого импульса относительно момента излучения зависит от скорости движения жидкости. Электронная схема, которая измеряет время запаздывания, пересчитывает это время по данным предварительной калибровки в величину потока жидкости и выдает это значение в цифровой форме. Поток воды в диапазоне от 0,04 л/мин. до 40 л/мин. измеряется с точностью до 2,5 %. Сенсор имеет также аналоговый электрический выход и защитное электрическое реле, замыкающееся при превышении потоком жидкости заранее заданной в цифровом виде величины.

6.3. Рыбопоисковые эхолоты

Простейшими и наиболее дешевыми гидролокаторами являются сейчас эхолоты для любителей рыбной ловли. Их называют еще "рыбоискатель" или, на английский манер, "Fishfinder", "флешер". Главными функциями рыбопоисковых эхолотов являются определение глубины, рельефа и структуры дна водоема, выявление рыбы и

понятное рыбакам отображение этой информации на индикаторе. Такие эхолоты должны быть водостойкими, рассчитанными на работу в жару и в мороз (для зимней рыбалки), портативными, простыми в пользовании. Некоторые из них ориентированы на ловлю рыбы только с лодки. Их акустические антенны крепят снаружи подводной части лодки или внутри лодки к днищу. Тогда они работают сквозь прозрачную для звука обшивку. Другими рыбопоисковыми эхолотами рыбаки могут пользоваться как при ловле рыбы с берега, так и при ловле с лодки.

Акустические антенны в специальных поплавках забрасывают или опускают в воду близ места рыбалки. На зимней рыбалке акустическая антенна может работать и сквозь лед, но лучше все-таки сделать лунку и опустить антенну в воду. На экране эхолота можно увидеть рельеф дна с индикацией глубины, коряги, камни, подводную растительность и, что главное, рыбу. Ее "выдает" главным образом плавательный пузырь. Разность в скорости распространения звука в воздухе и воде настолько велика, что значительная часть звуковых колебаний, достигающих пузыря, рассеиваются в обратном направлении. На экране эхолота хорошо виден, в основном, именно плавательный пузырь рыбы. Настоящую форму рыбы, ее размеры, строение тела эхолот, конечно, показать не может. Поэтому во многих эхолотах сам микрокомпьютер формирует на экране символ рыбы. Пользуясь эхолотом, можно быстрее найти перспективное место рыбалки, можно наблюдать, как рыба реагирует на прикормку и на опущенную рыболовную снасть.

Уже более 10 фирм развитых стран мира промышленно выпускают и продают рыболовецкие эхолоты (Lowrance Electronics, Humminbird, Garmin, JJ-GROUP, Eagle и т.д.). Одними из самых маленьких, простейших и в то же время удобных в пользовании являются "эхолот-часы" SmartCast RF 35 фирмы Humminbird (рис. 6.10).



Рис. 6.10. Рыболовецкие эхолот-часы SmartCast RF 35

Их управляющая часть с монохромным жидкокристаллическим экраном, имеющим длину диагонали 32 мм и разрешающую способность 48 x 32 пикселя, размещается в водонепроницаемом корпусе наручных часов (рис. 6.10, справа) или в таком же небольшом корпусе, рассчитанном на крепление к комлю спиннинга либо удилища (рис. 6.10, слева). Акустическая антенна вместе с необходимой электроникой, миниатюрным радиопередающим устройством и батарейками питания размещается в поплавке. Как только поплавок попадает в воду, электроника и антенна автоматически включаются, и устанавливается радиосвязь с управляющей частью. Радиосвязь на расстоянии до 50 м обеспечивает значительную мобильность и возможность обследования труднодоступных мест. Антенна формирует один ультразвуковой луч с угловой апертурой 90 deg, работает на частоте 115 кГц, обеспечивая наблюдение подводного пространства на глубине 30 м при дальности 50 м.

На экран выводятся глубина водоема, контуры дна, подводных предметов и символы рыбы (если она есть), а также температура воды, измеренная встроенным в поплавок датчиком. Имеется функция звуковой сигнализации в случае появления рыбы в контролируруемом

пространстве. Ресурс работы акустической антенны со свежими батарейками составляет 500 часов. В "свободное от рыбалки время" управляющая часть эхолота может работать как обычные электронные цифровые часы.

Близкий по характеристикам к описанному, портативный рыбопоисковый эхолот JJ Fisherman 140 показан на рис. 6.11.



Рис. 6.11. Портативный рыбопоисковый эхолот JJ-CONNECT Fisherman 140. Вверху - эхолот в действии во время рыбалки с берега, внизу - общий вид составных частей эхолота

В отличие от предыдущего, связь управляющего блока с акустической антенной осуществляется в нем через тонкий герметичный кабель длиной свыше 6 м. Антенна формирует тоже один луч, но с угловой

апертурой 20 градусов. Экран имеет большой размер (44 x 44 мм). Эхолот позволяет видеть, что происходит под антенной в толще воды глубиной от 0,8 м до 24,4 м несколько более детально, чем предыдущий. Но из-за меньшей угловой апертуры он контролирует значительно меньшее подводное пространство.

Совместить более детальное "видение" с одновременным наблюдением за значительным подводным пространством позволяют многопучковые антенны (рис. 6.12). Такие антенны состоят из нескольких излучателей и приёмников УЗ волн. Каждый канал в них работает независимо и отдельно управляется от микропроцессора.

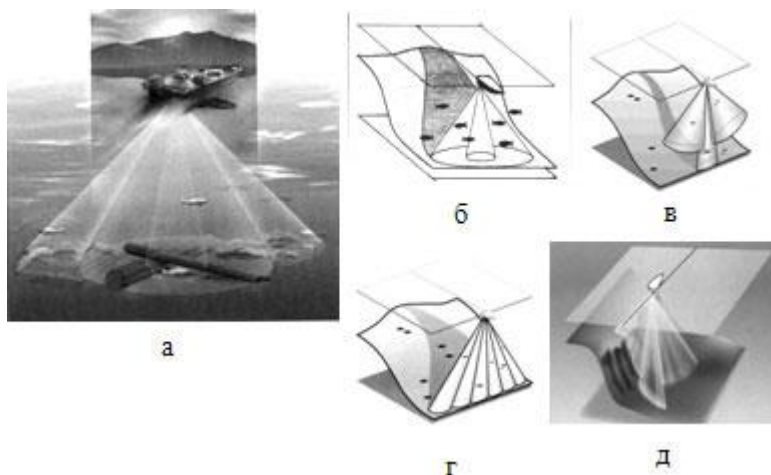


Рис. 6.12. Многопучковые акустические антенны

Рис. 6.12,а дает наглядное общее представление о конфигурации УЗ волн, излучаемых многопучковой антенной. На рис. рис. 6.12,б-,г показаны схематические изображения пучков УЗ волн 2-, 3- и 6-пучковой акустических антенн. На рис. 6.12,д показан случай использования одного вертикального и одного или нескольких боковых пучков, которые позволяют "видеть" то, что происходит в воде под крутым нависшим берегом или под скалой.

В качестве примера высококачественного двухпучкового рыбопоискового эхолота рассмотрим эхолот "Matrix 97 sonar", базовый блок которого показан на рис. 6.13 слева. В нем используется

акустическая антенна DualBeam PLUS TM ("2-лучевой трансдюсер"), которая может крепиться к транцу лодки или ко дну внутри лодки и работать сквозь её обшивку. Антенна формирует два пучка УЗ волн вокруг общей вертикальной оси: внутренний пучок с углом расхождения 20 deg (на уровне – 10 дБ) и с частотой ультразвука 200 кГц и внешний (как на рис. 6.12,б) – с углом расхождения 60 deg и с частотой ультразвука 83 кГц. Средняя мощность излучения в импульсе 500 Вт, пиковая 4 кВт. Ее достаточно для того, чтобы контролировать водную толщу до глубины 450 м и на такой глубине различать предметы размером от 65 мм.



Рис. 6.13. Базовые блоки рыбопоисковых эхолотов: слева – "Matrix 97 sonar"; справа – WIDE 3D PARAMOUNT

Большой цветной экран с диагональю 142 мм имеет разрешающую способность 240 x 320 пикселей и позволяет на глубине до 12 м различать рыболовный крючок и рыбу размерами от 65 мм. С этим экраном можно уверенно работать даже при ярком солнечном свете. По ходу движения лодки на экране формируется профиль дна и предметов, обнаруживаемых в толще воды. Текущий вертикальный срез виден справа, а слева от него – профиль водного пространства вдоль пройденного пути. Этот профиль по мере продвижения автоматически смещается влево, а справа отображаются свежие данные. На фоне профиля водной толщи отмечается глубина дна, глубина на которой плавают рыба, температура воды и другая важная информация. Экран может быть программно разделен на несколько отдельных "окон". Например, на рис. 6.13 слева на экране выделено "окно" с картой соответствующей акватории, на которой отмечается пройденный лодкой маршрут и текущее место пребывания в

координатах GPS. Ведь к этому эхолоту могут быть присоединены не только GPS приемник, но и приемник SmartCast, служба сообщений о погоде, персональный компьютер, барометрический и другие датчики. Микропрограммное обеспечение позволяет быстро менять масштаб изображения, "замораживать" и надолго запоминать его, отдельно отображать информацию от каждого из двух пучков, формировать инверсное изображение дна и т.п. Оно же позволяет дополнительно

присоединить акустическую антенну бокового обзора ("WideSide" как на рис. 6.12,д) и 4-пучковую антенну (QuadraBeam TM) для УЗ локации водного пространства по курсу лодки. У эхолота "Humminbird WIDE 3D PARAMOUNT" (рис. 6.13 справа) – экран монохромный и для выделения деталей используются лишь оттенки серого цвета. Но этот эхолот имеет шесть зондирующих УЗ пучков (как на рис. 6.12,д) с частотами 200 кГц и 455 кГц и благодаря этому в ходе движения лодки может строить на своем экране очень реалистичный трехмерный (3D) профиль дна и водного пространства под лодкой.

Наличие микропроцессора сделало возможным и следующий шаг в усовершенствовании любительских рыбопоисковых эхолотов – переход к так называемым "цифровым технологиям" (фирма Raymarine именует их HDFI). Примером такого более интеллектуального рыбопоискового эхолота стал цифровой эхолот DS500X фирмы Raymarine (рис. 6.14).



Рис. 6.14. Базовый блок рыбопоискового цифрового эхолота DS500X

В эхолотах без такой технологии многие характеристики, установленные при изготовлении, не могут быть изменены в процессе эксплуатации. Это, например, частота УЗ волн, структура, периодичность импульсов и их мощность, частотные характеристики приемника и т.п. Производители, конечно, выбирают их, казалось бы, оптимально, ориентируясь на типовые условия применения. Но на самом деле реальные условия варьируют в широких пределах. И во многих случаях установленные заранее значения оказываются не оптимальными. Слишком мощные УЗ волны нужны, например, лишь для обзора больших глубин в море. В то же время они быстрее разряжают источник питания, создают излишние помехи собственному приемнику, при небольших глубинах и возле дна ухудшают качество картинки на экране. Ухудшает ее и неоптимальная частотная фильтрация. Но ведь можно не фиксировать заранее эти и подобные параметры. "Умный" микрокомпьютер, имеющийся в составе эхолота, может оптимально подбирать их в процессе работы, адаптируясь к конкретным условиям применения. В этом и заключается суть технологии HDFI.

В цифровом эхолоте DS500X микрокомпьютер автоматически подбирает именно такие мощность УЗ пучка, продолжительность, структуру импульсов и периодичность их излучения, которые лучше всего отвечают конкретным условиям функционирования. С ними автоматически согласовываются работа и чувствительность приемника. Вместо аналогового фильтра применяется цифровая фильтрация, которая адаптируется к текущим обстоятельствам на всех глубинах. Параметры регулируются до тысячи раз в секунду. Адаптивное регулирование позволяет получать качественные данные о рыбе, о структуре дна и обстановке в воде даже в тех условиях, когда неадаптивные эхолоты показывают очень мало или вообще ничего.

Для сравнения на рис. 6.15 изображен один и тот же участок водоема, формируемый на одинаковых экранах: слева – без применения адаптивной цифровой технологии, а справа – с ее применением. Белыми кружками выделены детали картины, на которые стоит обратить внимание.

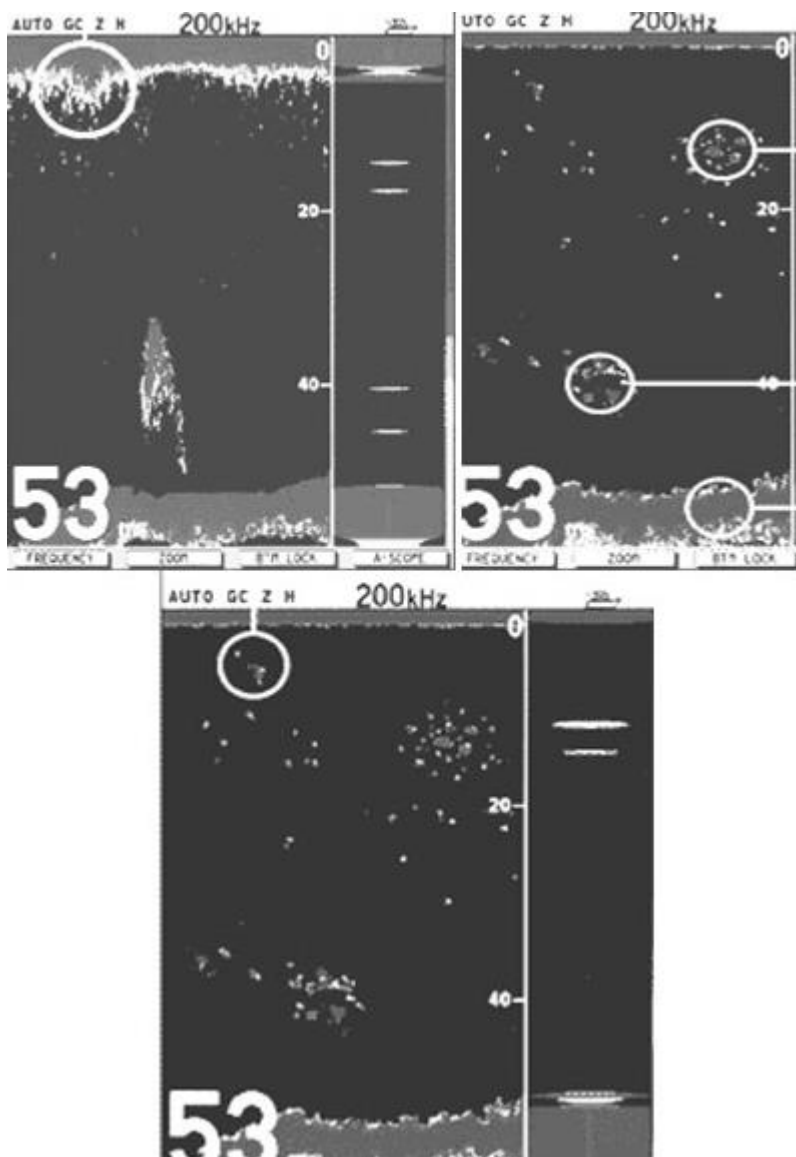


Рис. 6.15. Сравнение изображений подводной обстановки

В неадаптивных эхолотах участки возле поверхности воды и на дне забиты помехами и шумами. В адаптивных от этого удается

избавиться, благодаря чему можно увидеть рыбу и вблизи поверхности, и вблизи дна, лучше увидеть структуру дна. Намного лучше различаются и объекты в толще воды.

Программное обеспечение интеллектуального рыбопоискового эхолота DS Raymarine "знает" и использует различия в частотно-импульсных характеристиках, присущие живым организмам и безжизненным предметам, сортирует каждый сигнал по 220 параметрам (!) и выделяет сигналы от рыб среди прочих сигналов значительно надежнее, чем в неадаптивных эхолотах. Адаптивным в эхолоте DS Raymarine является даже стиль вывода на экран дополнительной информации. По выбору пользователя, например, данные о температуре воды, глубине, барометрическом давлении, об оценочной массе рыбы (она автоматически вычисляется, исходя из объема плавательного пузыря) и т.п., могут выводиться на экран эхолота не в виде сухих цифр, а в виде изображений соответствующих классических аналоговых приборов с текущими показаниями (рис. 6.16). Как оказалось, многим рыбакам это значительно удобней для восприятия.

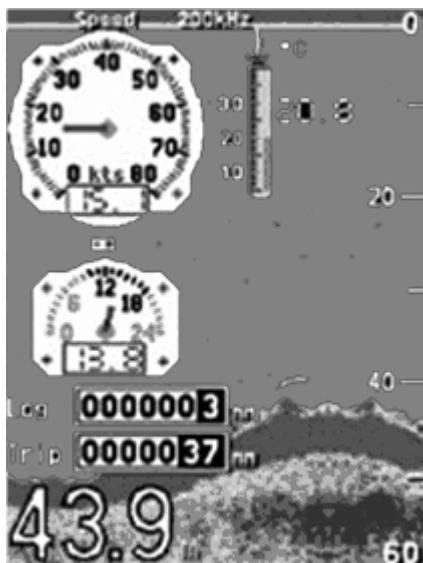


Рис. 6.16. Некоторые аналоговые приборы на экране цифрового эхолота

Краткие итоги

К числу активных акустических сенсоров принадлежат тонометры, гидролокаторы, эхолоты. К настоящему времени разработаны удобные высококачественные интеллектуальные тонометры, полуавтоматические и автоматические. Они измеряют не только артериальное давление, но и частоту пульса, выявляют сердечные аритмии, могут накапливать и обрабатывать данные измерений за длительный период, напоминать звуковым сигналом и значками на дисплее о необходимости приема лекарства, очередного измерения артериального давления и оказывать другие сервисные услуги.

Еще более активными акустическими сенсорами являются эхолокаторы, которые сами генерируют акустические волны для того, чтобы собрать нужную информацию о контролируемых объектах. Для эхолокации обычно используют УЗ волны. Эхолокацию в водной и иной жидкой среде принято называть гидролокацией. Гидролокатор состоит из акустической антенны, генератора импульсов мощных УЗ волн, приёмника отраженных УЗ сигналов, коммутатора, электроники обработки сигналов, индикатора и клавиатуры управления. Работой гидролокатора автоматически управляет микропроцессор. Акустическая антенна чаще всего является подвижной, что позволяет с высоким разрешением "прослушивать" все окружающее водное пространство или выбранный сектор. Гидролокаторы позволяют дистанционно наблюдать подводную обстановку, обнаруживать подводные объекты, определять их координаты и расстояния до них, оценивать их размеры. Гидролокаторы применяются на кораблях для обеспечения безопасности движения, на рыболовных судах для обнаружения рыбы, при поисках затонувших кораблей, самолетов и других объектов, для наблюдений за состоянием подводных сооружений, исследований шельфа морского и океанического дна и т.д.

В последние десятилетия созданы и широко используются такие интеллектуальные акустические сенсоры, как портативные эхолоты для любителей рыбной ловли. Главными функциями таких эхолотов являются определение глубины, рельефа и структуры дна водоема, выявление рыбы и понятное рыбакам отображение этой информации на индикаторе. Пользуясь рыбопоисковым эхолотом, можно быстрее найти перспективное место рыбалки, наблюдать реакцию рыбы на прикормку и на опущенную рыболовную снасть. На экране эхолота

хорошо виден плавательный пузырь рыбы. Символы рыб на экране формирует микрокомпьютер. Наличие микропроцессора сделало возможным переход к так называемым "цифровым технологиям" эхолокации. Микрокомпьютер автоматически подбирает именно такие мощность УЗ пучка, продолжительность, структуру импульсов и периодичность их излучения, которые лучше всего отвечают конкретным условиям функционирования. С ними автоматически согласовываются работа и чувствительность приемника. Вместо аналогового фильтра применяется цифровая фильтрация, которая адаптируется к текущим обстоятельствам на всех глубинах. Адаптивное регулирование позволяет получать значительно более качественные данные о рыбе, о структуре дна и обстановке в воде.

Чтобы совместить более детальное "видение" подводной обстановки с одновременным наблюдением за значительным подводным пространством, применяют многопучковые акустические антенны. Такие антенны состоят из нескольких излучателей и приёмников УЗ волн. Каждый канал в них может работать независимо и отдельно управляется от микропроцессора. Боковые пучки позволяют "видеть" то, что происходит в воде под крутым нависшим берегом или под скалой. Пучки с более высокой частотой УЗ волны обеспечивают более высокую разрешающую способность, а с более низкой частотой позволяют "видеть" дальше.

7. Интеллектуальные акустические сенсоры для УЗИ. Сенсоры для сейсморазведки. Сенсоры на ПАВ

7.1. УЗ-сенсоры расстояния

В этом разделе мы продолжим рассмотрение активных акустических сенсоров. Одним из применений эхолокации уже не в воде, а в воздухе, является *УЗ выявление присутствия объекта в контролируемой зоне и измерение расстояния до него*. Особенно важным становится это в сложных условиях густого тумана, задымленности, запыленности и т.п., когда оптические методы "работают" плохо. А для УЗ волн это всё – не помеха. В качестве источника ультразвука чаще всего применяют пьезоэлектрические преобразователи.

Некоторые типы промышленно выпускаемых УЗ сенсоров расстояния показаны на рис. 7.1.

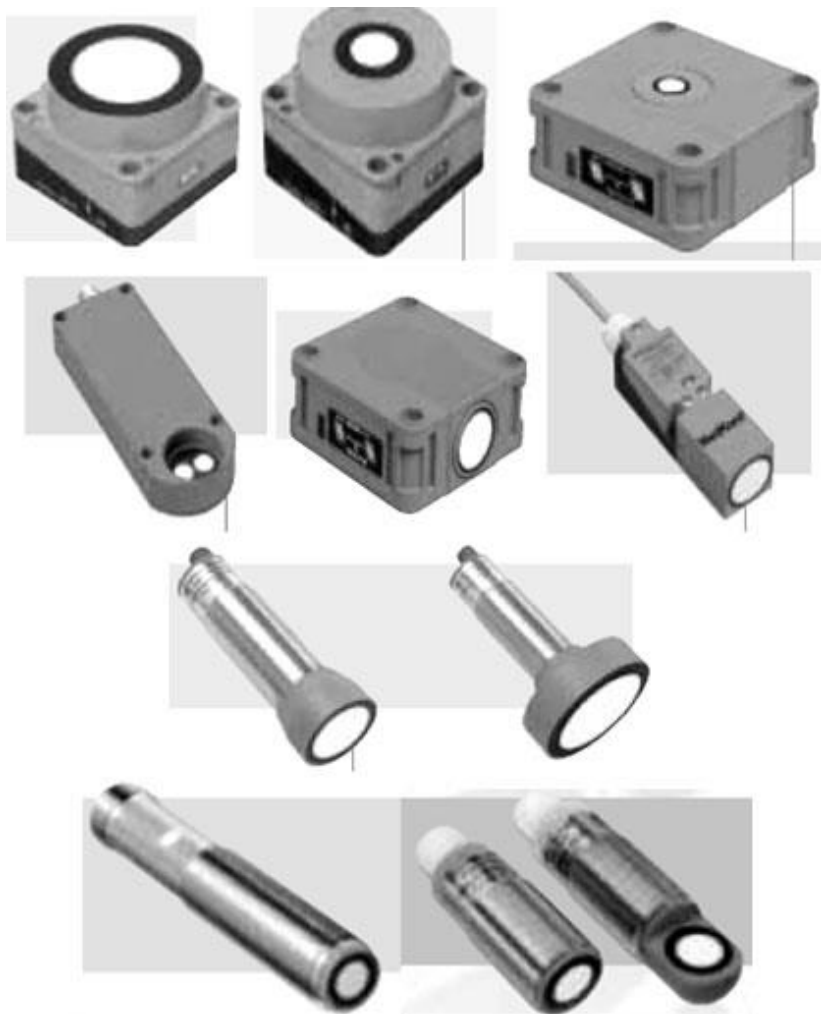


Рис. 7.1. Некоторые промышленные УЗ сенсоры расстояния

Излучатель и приемник УЗ волн находятся в одном корпусе вместе с необходимой для измерений электроникой и с элементами, обеспечивающими направленность – концентрацию излучаемых и

принимаемых УЗ волн в определенном секторе пространства. УЗ волны с частотой 65–400 кГц в виде кратковременного импульса излучаются в направлении контролируемой зоны 10–200 раз каждую секунду. Если в контролируемой зоне появляется объект, то отраженная или рассеянная от него УЗ волна возвращается назад к сенсору и воспринимается приемником с некоторым запаздыванием. По измеренному времени запаздывания t рассчитывается расстояние до объекта

$$s=0,5ct \quad (7.1)$$

где c – скорость распространения ультразвука в воздухе.

Как и в гидролокации, длительность импульсов τ определяет минимальное расстояние до объекта, которое можно измерить,

$$x_{\min} = 0,5c\tau \quad (7.2)$$

Частота зондирования $\nu_{\text{зонд}}$ определяет максимальное расстояние, которое можно измерить

$$x_{\max} = 0,5c / \nu_{\text{зонд}} \quad (7.3)$$

От частоты зондирующих УЗ волн f зависит длина волны

$$\lambda=c/f \quad (7.4)$$

и определяемая этим разрешающая способность сенсора, т.е. минимальные размеры объектов, присутствие которых еще можно зафиксировать. В воздухе на частоте выше 340 кГц длина волны составляет менее 1 мм.

Выпускаются УЗ сенсоры расстояния с разными параметрами, рассчитанными как на небольшие расстояния – от 15 до 200 мм с точностью до 0,2 мм, так и на средние расстояния – от 0,3 до 6 м с точностью до 1 мм, а также на расстояния в десятки метров. Выход таких сенсоров может быть как цифровым, так и аналоговым.

Если в состав УЗ сенсора входит микрокомпьютер, то благодаря встроенным датчикам температуры и давления легко решается вопрос коррекции результатов произведенных измерений с учетом

зависимости скорости распространения УЗ волны в воздухе от указанных параметров.

Если частота УЗ колебаний фиксирована, то с помощью таких сенсоров можно определять и скорость движения объекта, измеряя доплеровский сдвиг частоты отраженной волны.

Если угловая диаграмма направленности УЗ сенсора достаточно узка (а это зависит от конструкции корпуса и наличия параболического или сферического рефлекторов) то, постепенно поворачивая его в определенном угловом секторе, можно, как и в гидролокаторах, сканировать УЗ зондом и осматривать более значительную зону пространства.

Для выявления вхождения в контролируемую зону пространства некоторого объекта промышленность выпускает также УЗ сенсоры, состоящие из двух отдельных частей – излучателя и приемника. Некоторые типы таких УЗ сенсоров показаны на рис. 7.2, где слева внизу приведена и общая схема взаимного расположения излучателя 1 и приемника 2.

На рисунке выделена "зона чувствительности" 3, – та часть пространства, в которой перекрываются конус распространения УЗ волн от излучателя и область, из которой УЗ излучение воспринимается приемником 2. Если в этой зоне нет объектов, то сигнал на выходе приемника слабый. Если же какой-либо объект 4 входит в эту зону, то он начинает рассеивать зондирующие УЗ волны, и сигнал на выходе приёмника 2 резко возрастает. По времени запаздывания принятого сигнала относительно излучаемого можно определить, на каком расстоянии в зоне чувствительности 3 находится объект 4, а по изменению частоты колебаний или по изменению положения объекта от одного зондирующего импульса к другому, – с какой скоростью он движется. Взаимное расположение излучателя 1 и приемника 2 и угол между их осями можно изменять в зависимости от потребности.

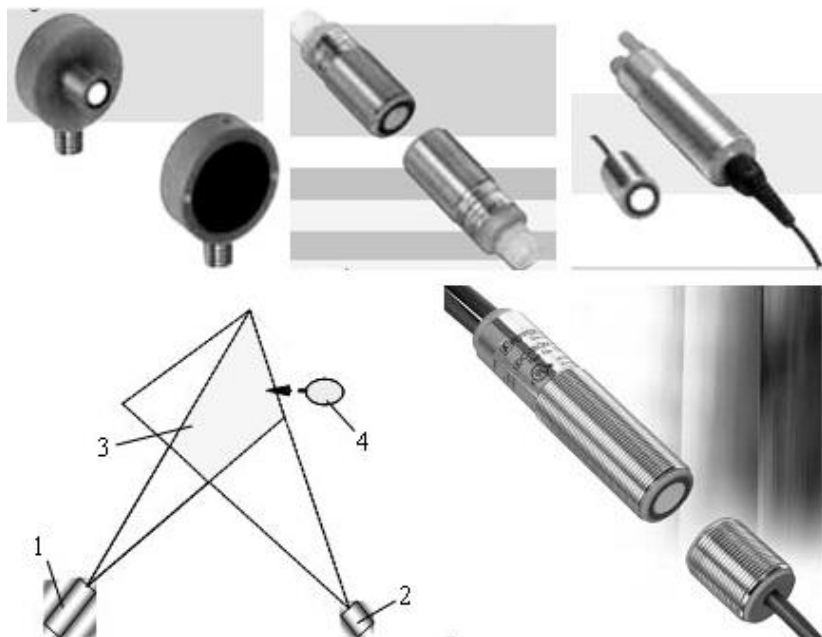


Рис. 7.2. Примеры УЗ сенсоров, состоящих из двух частей

На рис. 7.3 приведена фотография УЗ измерителя уровня жидкости в закрытых резервуарах Omni-L. Уровень жидкости определяется с точностью порядка 1 мм по времени запаздывания отраженного от поверхности жидкости УЗ импульса.



Рис. 7.3. УЗ измеритель уровня жидкости Omni-L

Много специализированных интеллектуальных акустических сенсоров созданы и применяются для дефектоскопии металлических заготовок (проката, отливок, ...) и готовых металлоконструкций. В основе их работы тоже лежит принцип эхолокации, но уже в твердых телах. В каких-то местах металлической конструкции возбуждаются УЗ колебания, в других – установлены приёмники УЗ волн. Принятые ими УЗ колебания подвергаются математическому анализу в микрокомпьютере. По результатам анализа можно определить механическое состояние конструкции. Такие специализированные интеллектуальные акустические сенсоры позволяют своевременно обнаруживать трещины, пустоты, посторонние включения и другие дефекты в металлических изделиях, явления "усталости" металлов, нежелательные механические изменения в конструкциях и предотвращать возможные аварии. В случае возникновения повреждений трубопроводов, бесстыковых рельсов сверхскоростных железных дорог и т.д. интеллектуальные УЗ акустические сенсоры позволяют быстро локализовать место повреждения и восстановить функционирование этих важных магистралей.

7.2. Интеллектуальные портативные сенсоры для УЗ исследований

Одним из важных видов эхолокации являются ультразвуковые исследования внутренних органов человека, которые широко применяют в медицине. Скорость распространения УЗ волн в тканях человеческого тела составляет около 1540 м/с, т.е. близка к скорости в водной среде. Но из-за акустической неоднородности человеческого тела на границах раздела органов и тканей с разной плотностью и упругостью, происходит частичное отражение, рассеяние и преломление УЗ волн. Чем больше перепад плотности, тем выше амплитуда отраженной УЗ волны. Это и позволяет определять, а потом и воссоздавать в виде изображения пространственные границы между органами, тканями и разными структурными элементами тканей, их форму, размеры, взаимное расположение, локальные особенности. Применяя УЗ волны высокой частоты (1-15 МГц), удается достичь высокой разрешающей способности – до 0,1 мм. При отражении от подвижных объектов (дыхательные перемещения грудной клетки, диафрагмы, сокращения сердца, пульсация артерий, продвижение крови по сосудам и т.п.) изменяется частота отраженной УЗ волны (эффект Доплера). Измеряя величину изменения частоты, можно вычислить соответствующую скорость движения и визуально выделять

участки внутренних органов, которые двигаются с разной скоростью, – даже довольно медленно (меньше 1 см/с).

УЗ исследования (**ультрасонографию**) применяют в медицине уже много десятков лет. Но раньше аппараты для таких исследований были не очень удобными, громоздкими, представляли собой большие комплексы, пригодные для применения лишь в стационарах. За последние десятилетия благодаря микросистемным и новейшим информационным технологиям, достижениям гидролокации удалось создать высококачественные портативные аппараты для УЗ исследований – по-настоящему "интеллектуальные" УЗ сенсоры, в том числе и для получения объемных (3-мерных) изображений (*объемной ультрасонографии*).

7.2.1. УЗ мультидатчики

Пространственное положение объекта, от которого отражаются УЗ волны, и его мелких деталей вычисляют, принимая и сравнивая сигналы, полученные от ряда датчиков, пространственно расположенных в разных местах. Такую технологию позволили довести до совершенства и практически реализовать так называемые "УЗ мультидатчики" – сформированные на одном кристалле кремния массивы из многих пьезоэлементов и электронных схем генерирования и обработки сигналов. Они являются одновременно и излучателями, и приемниками, и усилителями УЗ волн. На том же кристалле формируют и цифровые схемы, которые выполняют предварительную обработку сигналов. Разные датчики в массиве могут работать на разных частотах, что создает дополнительные возможности для сбора надежной, качественной информации. В одном мультидатчике могут содержаться несколько кристаллов кремния, и суммарное число пьезоэлектрических элементов достигает сотен штук.

В некоторых мультидатчиках кристаллы с пьезочувствительными элементами могут даже по заданной программе линейно перемещаться внутри корпуса, обеспечивая дополнительную трехмерную "развертку" изображения.

Промышленность выпускает много типов мультидатчиков, которые специализированы для УЗ исследований разных органов человеческого тела. На рис. 7.4 показаны лишь некоторые из них.

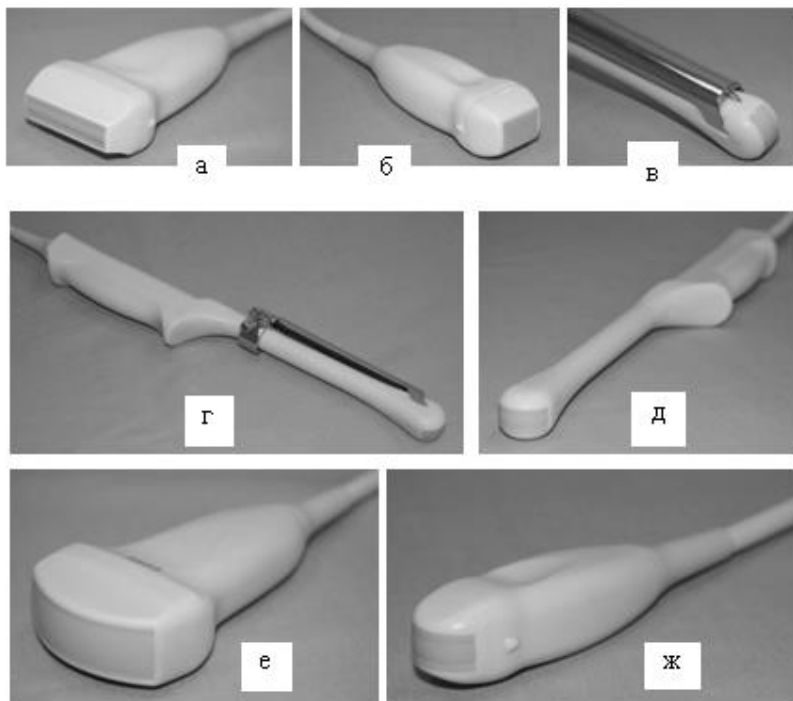


Рис. 7.4. Некоторые типы мультидатчиков для УЗ исследований: а – линейный датчик 10L1 (12-5 МГц / 36 мм); б – секторный фазированный датчик 5P1 (7-4 МГц); в, г, д – трансвагинальные датчики 6V1 (8-4 МГц / 11 мм); е – конвексный датчик С344 (5-2 МГц / 40 мм); ж – кардиологический микроконвексный датчик С611 (8-4 МГц / 11 мм)

Не советуем Вам полагаться на чисто внешнее зрительное восприятие. За относительно простым внешним видом скрыты довольно сложные микроэлектронные устройства, которые по количеству выполняемых функций, по точности и сложности своего устройства можно по праву считать одним из чудес современной техники. Они значительно упрощают и облегчают дальнейшую обработку сигналов и формирование высококачественных УЗ изображений исследуемых внутренних органов и структур человеческого тела в базовом блоке аппарата для УЗИ.

7.2.2. Портативные аппараты для УЗИ

Из разных типов таких аппаратов, которые промышленно выпускаются, а их десятки, ознакомим Вас лишь с несколькими портативными. На рис. 7.5 слева показан современный аппарат SonoAce Pico для УЗ сканирования человеческого тела. Будучи переносным (357х320х204 мм, масса меньше 10 кг), он имеет практически такие же диагностические возможности, как и традиционные стационарные аппараты для УЗИ. Благодаря цифровой технологии формирования УЗ пучков и обработки сигналов он позволяет получать цветные изображения состояния внутренних органов с высокой разрешающей способностью.



Рис. 7.5. Портативные аппараты для УЗ исследований: слева – SonoAce-Pico; справа – Fukuda UF-750XT

Кроме возможности формирования объемных изображений и применения широкополосных мультисекторных датчиков, он может выполнять функции формирования трапециевидного изображения, увеличения масштаба изображения при исследовании малых органов. Он рассчитан также на применение микроконвексного датчика, имеет программы кардиологических исследований. Возможная глубина сканирования – до 30 см. В базовую комплектацию входят также электрокардиографический модуль с программным обеспечением, система SonoView TM Lite для архивации и дальнейшего просмотра эхограмм, ёмкая память, выходы для одновременного присоединения к базовому блоку двух датчиков.

Возможно применение многих прогрессивных технологий
ультрасонографии:

Multi-beam – технология цифрового формирования УЗ пучков с подавлением влияния многократных отражений, нелинейных искажений, неточности интервалов задержки и т.п.

OTI TM (Optimum Tissue Imaging) – технология формирования оптимального изображения ткани благодаря коррекции скорости (выбор оптимальной скорости для каждой области, чтобы обеспечить высокое качество изображений одновременно всех видов ткани, таких как жировая, мышцы или паренхима печени).

THI TM (Tissue Harmonic Imaging – "тканевая" или вторая гармоника) – повышает качество изображений, их контраст и линейную разрешающую способность у пациентов с затрудненной визуализацией (например, с толстыми жировыми прослойками).

OHI TM (Optimized Harmonic Imaging) – применяется в особо трудных для исследования случаях.

FINE TM (Filtered Image for Noise reduction & Edge enhancement) – технология улучшенной фильтрации УЗ сигналов, которая уменьшает уровень шумов и обеспечивает более высокий контраст.

SAFE TM (Compound Automatic Flash Elimination) – обеспечивает адаптивную нелинейную фильтрацию для удаления цветных точек, которые возникают вследствие случайных артефактов. Улучшает визуализацию кровотока в доплеровских режимах.

Ультразвуковой диагностический сканер Fukuda UF-750ХТ показан справа на рис. 7.5. Он предназначен для неотложной (на выездах) УЗ функциональной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, щитовидной и молочной желез, почек, печени, желудка, желчного пузыря, половых органов. Цветной жидкокристаллический дисплей с диагональю 265 мм обеспечивает высокое качество изображений. Общие габаритные размеры сканера 380х220х370 мм, масса – меньше 13 кг. Оснащен магнитооптическим диском памяти на 640 Мбайт, на котором могут храниться до 6 тысяч эхограмм. Имея приблизительно такие же функциональные возможности, как и предыдущий сканер, он обеспечивает также УЗ исследование слабого и медленного кровотока.

Еще меньшие размеры и массу (78x350x280 мм и 4,5 кг) имеет созданный фирмой General Electric Medical Systems УЗ сканер Logiq Book, (рис. 7.6). Он тоже цифровой, используется собственная информационная технология TruScan фирмы GE, обеспечивающая высокое качество изображений, лучшие возможности обработки данных и высокий уровень эргономичности.



Рис. 7.6. Портативный УЗ сканер Logiq Book

В состав программного обеспечения входят:

- программные пакеты для измерений, вычислений и автоматического создания отчетов (для акушерства, кардиологии, ангиологии, радиологии, урологии, гинекологии, хирургии, педиатрии);
- программы объемной реконструкции с возможностью мультипланового анализа, поддержки протокола беспроводной связи;
- программа формирования и поддержки базы данных пациентов с возможностью переноса данных на внешние носители и на внешний компьютер.

Современные аппараты для УЗИ позволяют проследить, например, даже за развитием эмбриона, начиная с 3–4 недель беременности, когда он имеет длину лишь около 1,5 мм, точно определить эмбриональный возраст, своевременно выявить пороки развития. Больше всего впечатляет возможность получения УЗ "портрета" ребенка на последнем этапе беременности. При угле обзора около 60 deg можно получить полное изображение лица ребенка (рис. 7.7).



Рис. 7.7. Примеры УЗ фотографий еще не родившихся детей

7.3. Интеллектуальные портативные сенсоры для сейсморазведки

Геологи уже давно стали развивать методы исследования земной коры с помощью акустических волн. Их традиционно называют сейсморазведкой. Длительное время доминировало представление о том, что материал, из которого состоит земная кора, является упругим, как жидкость или металл, и распространение в ней акустических волн описывается известным волновым уравнением, выведенным для однородных жидкостей и металлов. Однако экспериментальные исследования по эхолокации земной коры показали, что это не совсем так. Земная кора оказалась неоднородной, особенно ее приповерхностный слой, состоящий в основном из осадочных пород. Да и кристаллический фундамент из-за тектонических процессов, постоянно происходящих в недрах Земли, оказался неоднородным. Он имеет блочную структуру из-за наличия значительных разрывных разрушений, вызванных тектоническими процессами. В местах разрывов между блоками возникают пустоты. Находящиеся над пустотами осадочные породы, не выдерживая давления выше расположенных слоёв, начинают разрушаться и, постепенно проседая,

заполнять эти пустоты. Область множественных разрушений и проседания медленно распространяется по осадочным породам снизу вверх. И спустя некоторое время вся толща осадочных пород над тектоническим разрывом кристаллического фундамента пронизывается трещинами, порами и пустотами. И только самый верхний слой осадочных пород толщиной 10-30 м, на который ничего не давит сверху, временно сохраняет относительную целостность и плотность, скрывая наличие глубоко под ним разрывных нарушений кристаллического щита. Если над такими тектоническими нарушениями возводят массивные инженерные сооружения, то их вес провоцирует продвижение нарушений и в самый верхний слой осадочных пород. Со временем, в результате утраты несущей способности и проседания грунта, это может послужить причиной неожиданных аварий.

7.3.1. Метод спектрально-сейсморазведочного профилирования

В ряде работ показано, что такие опасные зоны можно выявить с помощью метода спектрально-сейсморазведочного профилирования (ССП). Он состоит в том, что вертикально вглубь земли от мобильного ССП сенсора посылается импульсный акустический зондирующий сигнал. Затем "прослушивается" и записывается его растянутый во времени "отклик" – слабые вторичные акустические волны, возбужденные этим сигналом в земной коре. Они принимаются пьезоэлектрическим пленочным датчиком, который (это принципиально важно!) не имеет собственных резонансных частот. После усиления и фильтрации эхо-сигналов интеллектуальный сенсор выполняет их спектральный анализ. В спектре полученного сейсмического отклика слоям недр, которые находятся на большей глубине, соответствуют все более низкие частоты в спектре. Потом сенсор перемещают на определенное расстояние по горизонтали в заданном направлении "разреза", и повторяют измерения. Результаты многих последовательных измерений сводят вместе и строят "ССП-разрез" геологической структуры, один из примеров которого показан на рис. 7.8.

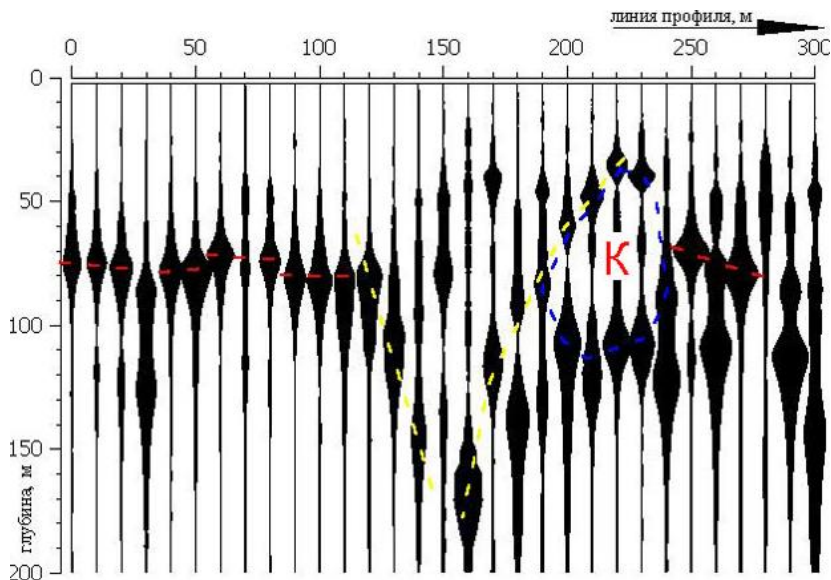


Рис. 7.8. ССП-разрез геологического массива вдоль газопровода "Уренгой – Новопсков" на расстоянии 80 км от г. Уфы; К – карстовая зона

Профилирование выполнено в зоне неожиданно произошедшей аварии газопровода. На участке этого разреза от 0 м до 110 м на глубине 70-80 м выявлена четкая граница между слоями, обусловленная наличием известняковой плиты. Дальше на участке от 120 м до 220 м проявился лейкоподобный объект (светлая штриховая линия), который и является характерным для зон тектонических нарушений. Это – следствие постепенного векового проседания осадочных пород. Темной штриховой линией выделена граница карстовой области *K*, возникшей в результате размыва грунтовыми водами, мигрирующими в таких зонах из глубин земли.

Замечено, что карсты всегда находятся рядом с подобными зонами. Из-за описанных особенностей геологической структуры, грунт на участке от 130 м до 250 м постепенно теряет несущую способность. Утратив опору, труба газопровода под действием собственного веса провисла, что со временем и привело к её разрыву. Если бы до прокладки или хотя бы вскоре после прокладки трассы трубопровода было проведено

спектрально-сейсморозведочное профилирование, то, приняв надлежащие меры, аварии можно было бы избежать.

7.3.2. Возможности ССП в горном деле

Интеллектуальные спектральные сейсмические сенсоры помогают бороться и с такими грозными врагами горняков, как обрушение пород в шахту и внезапные выбросы угля и газа. Когда из-под земли добывается уголь, соль или руда или производится проходка туннеля, то над штреком без прежней опоры остаются верхние слои породы, которые начинают провисать и постепенно пронизываются мелкими нарушениями и отслоениями. Как правило, отслоения происходят по границам угольных, слюдяных и других прослоек породы со слабым сцеплением с соседними слоями породы. С помощью ССП можно своевременно выявить поверхности ослабленного механического контакта между слоями породы, расположение и размеры опасных отслоений, т.е. получить важную технологическую информацию, позволяющую выбрать оптимальные методы защиты штрека, людей, техники.

На рис. 7.9 показан ССП разрез над конвейерным штреком одной из шахт Донбасса.

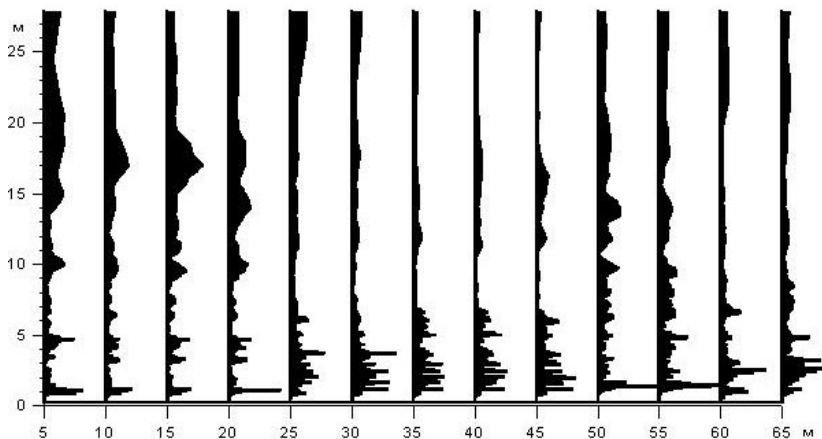


Рис. 7.9. ССП разрез геологического массива над конвейерным штреком. Измерения проводились снизу. Уровень "0" соответствует "потолку" штрека.

Нижние 0,5-1 м породы, прилегающие к потолку штрека, не дают сигналов. Пробное бурение вверх от потолка штрека показало, что это – песчаник, который, как представлялось, является сплошным до 10 м толщины. Это было основанием надеяться на стойкость и надежность кровли. Однако на сделанном ССП разрезе четко проявились поверхности ослабленного механического контакта между слоями (на рис. 7.9 – горизонтальные штрихи), которые, как позже было установлено, обусловлены тонкими прослойками угля, сцепление которых с песчаником довольно слабое. Т.е. представление о надежности и стойкости кровли было обманчивым. По результатам ССП в штреке было установлено дополнительное усиленное крепление. И когда верхние слои породы обвалились, именно это крепление позволило избежать человеческих жертв и потери техники.

Внезапные выбросы угля и газа – грозное стихийное бедствие, которое и до сих пор является причиной трагических случаев у горняков. Но ведь эти выбросы являются "внезапными" только для тех, у кого нет информации об их назревании. Выбросы не происходят беспричинно. Их источником являются большие герметические пустоты в породах, постепенно заполненные метаном под высоким давлением и расположенные вблизи от горных выработок. Такие пустоты можно выявить акустическими методами. Имея информацию об их расположении и размерах, можно разными методами осторожно снизить давление газа в них и тем самым ликвидировать угрозу выбросов.

Метод ССП может помочь и в поисках месторождений алмазов. Ведь они могут сформироваться лишь там, где при разрыве кристаллического щита, породы перемещались (выносились) снизу вверх. На ССП разрезах тело трубки выносов обычно выглядит как куполообразный объект с двойной окантовкой на глубинах 70-150 м (рис. 7.10).

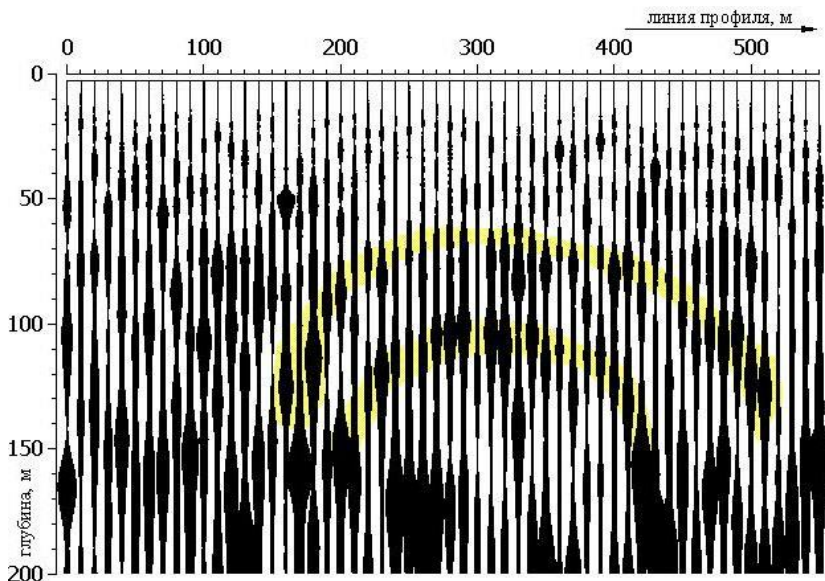


Рис. 7.10. ССП разрез геологического массива месторождения "Поморское" (Архангельская область). Серыми линиями выделена трубка выноса пород

И с целью повышения эффективности поисков детальные геологические исследования целесообразно проводить лишь в районах, где выявлены такие объекты.

7.4. Сенсоры на поверхностных акустических волнах

До сих пор мы рассматривали сенсоры, которые используют акустические волны в объеме газов, жидкостей или твердых тел. Но есть еще и большая группа сенсоров, в которых используется распространение акустических волн по поверхности твердых тел или в их приповерхностной области. Такие волны называют поверхностными акустическими волнами (ПАВ) и соответственно *приповерхностными акустическими волнами* (ППАВ). Для возбуждения и детектирования ПАВ и ППАВ используют прямой и обратный пьезоэлектрический эффект, который будет описан в следующем разделе. Чаще всего с этой целью на поверхности пьезокристалла, пьезокерамики или на пьезоэлектрической пленке формируют так называемые *встречно-тыревые преобразователи* (ВШП). Это – электроды, имеющие

форму гребенки, в которых длина каждого штыря намного больше ширины (рис. 7.11).

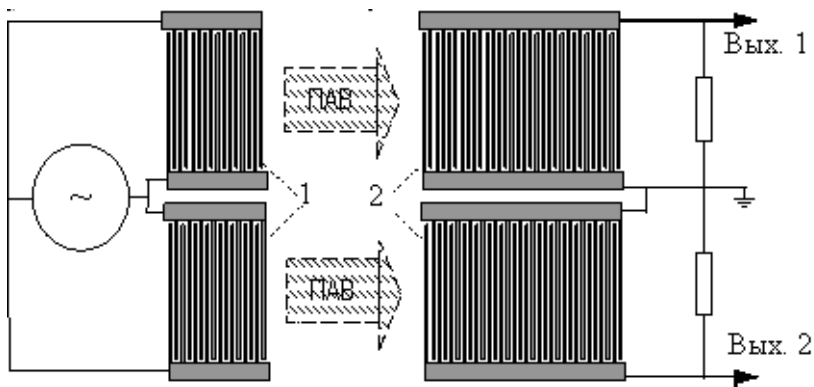


Рис. 7.11. Принцип действия сенсоров на ПАВ: 1 – встречно-штыревые преобразователи электрического сигнала в ПАВ; 2 – встречно-штыревые преобразователи ПАВ в электрический сигнал

Когда на ВШП 1 подается переменное напряжение, в пьезоэлектрическом материале возникают волны механического сжатия и растяжения с частотой переменного напряжения. Если расстояние между штырями равняется длине волны, то волны от всех штырей оказываются синфазными и усиливают одна другую. Возникает сильная резонансная поверхностная акустическая волна. Скорость распространения ПАВ в пьезоматериалах составляет 3,8-4,2 км/с. Поэтому ПАВ с частотой 1 ГГц имеет длину волны приблизительно 4 мкм. Распространяясь вдоль поверхности пьезоэлектрика, ПАВ проходит расстояние в 1 мм приблизительно за 250 нс. Когда волна доходит до электродов 2, она становится причиной возникновения между парой соседних штырей переменного электрического напряжения той же частоты. Колебания напряжения между соседними парами штырей, складываются. Поэтому напряжение на выходе ВШП оказывается наибольшим в случае совпадения их фаз, т.е. тогда, когда расстояние между штырями соседних пар равняется длине волны.

Таким образом, геометрическая структура ВШП обеспечивает высокую избирательность приборов на ПАВ. Если эта структура строго периодическая, то она функционирует как высокочастотный

частотный фильтр. Если же должны приниматься лишь сигналы, определенным образом модулированные по амплитуде, частоте, фазе и т.п., то используется и соответствующая геометрическая структура ВШП. Прибор на ПАВ функционирует тогда как высокоэффективный коррелятор, выдающий на выходе пик напряжения только тогда, когда пространственно-временная структура поверхностной акустической волны точно совпадает с геометрической структурой ВШП. Прибор фазирован и синхронизируется с сигналом, который поступает на его вход, автоматически, т.е. сам (!) и только в момент полного совпадения структуры волны и структуры ВШП. Именно по этим причинам приборы на ПАВ широко используют в современной радиотехнике: и в мобильной радиосвязи, и в системе глобального ориентирования GSM, в системах цифровой и локальной беспроводной связи и т.п. С применением ВШП и ПАВ построены эффективные фильтры промежуточной частоты, выходные и многомодовые фильтры, калиброванные линии задержки с очень малым затуханием, фильтры Найквиста для цифрового телевидения и цифровой радиосвязи, линии задержки для кодового и временного разделения каналов, фильтры систем волоконно-оптической связи, синхронные и асинхронные конвольверы и т.д.

7.4.1. Применение ПАВ для автоматической радиоиентификации

Интересным применением относительно дешевых сенсоров на ПАВ стала автоматическая радиоиентификация багажа, контейнеров, транспортных единиц, важных почтовых отправлений. Схема их радиоиентификации показана на рис. 7.12. В багаж, подлежащий бдительному контролю, за дополнительную плату вкладывают небольшой радиоиентификатор с индивидуальным кодом. В аэропортах, на вокзалах, в морских или речных портах, на транспортных узлах и контрольных пунктах устанавливают системы автоматической радиоиентификации. В состав такой системы входит микрокомпьютер 1, принимающий через каналы связи запросы на проверку контролируемых грузов. Получив запрос с кодами контролируемых грузов, он через генератор 2 и радиоантенну 3 автоматически организует излучение фазо-манипулированных радиосигналов на частоте порядка 1 ГГц с позывными соответствующих грузов. Радиоиентификаторы, вложенные в грузы, принимают эти позывные, усиливают и подают на свой индивидуальный ПАВ селектор.

Несколько упрощенная топология ВШП в таком селекторе, соответствующая коду 110011011, показана на рис. 7.12 внизу. Двоичным "0" и "1" соответствует различное подключение пары соседних штырей. В реальных устройствах длина индивидуального кода достигает 128 бит и более. Пик напряжения на выходе такого селектора появляется только тогда, когда код позывного сигнала точно совпадает с его собственным индивидуальным кодом. Лишь в этом случае, радиоидентификатор "откликается" на позывной сигнал, посылая в ответ свой код.

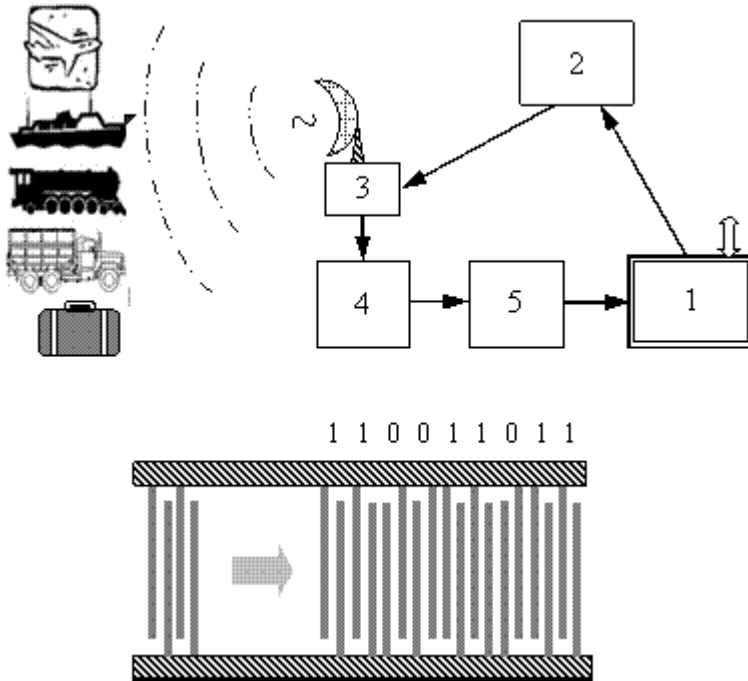


Рис. 7.12. Схема функционирования системы радиоидентификации багажа. Внизу – структура ВШП, соответствующая коду "110011011"

Этот отклик принимается антенной 3, усиливается радиоприемником 4 и передается на фазовый детектор 5, который формирует двоичный код. Микрокомпьютер 1 сравнивает этот код с кодом контролируемого груза и, если они совпадают, фиксирует это в своей памяти. Затем с помощью генератора 2 и радиоантенны 3 излучаются позывные

следующего контролируемого груза, и процесс повторяется. После обработки всего запроса микрокомпьютер формирует ответ на него и через каналы связи автоматически информирует запрашивающего о наличии или отсутствии в данном контрольном пункте соответствующих грузов.

Аналогичные сенсоры на ПАВ используют также для радиоидентификации автомобилей.

7.4.2. Конструкции сенсоров на ПАВ

Высокая избирательность устройств на ПАВ, их устойчивость против шумов и помех, успешное применение для их создания микросистемных технологий обусловили то, что в последнее десятилетие активизировались разработки на их основе и других разнообразных высокочувствительных сенсоров. Используются несколько основных конструкций сенсоров на ПАВ: на поверхности толстой (кремниевой) основы 1 (рис. 7.13,а) и на тонкой мембране (рис. 7.13,б). В последнем случае мембрану 2 получают путем анизотропного травления толстой основы 1. На поверхности формируют встречно-штыревые электроды 3, поверх которых наносят пьезоэлектрические пленки 4. Над той частью поверхности, вдоль которой распространяются поверхностные акустические волны 5, возникает чувствительная зона 6. "Чувствительна" она в том смысле, что скорость распространения ПАВ, их амплитуда, фаза, частота оказываются очень подвержены влиянию многих факторов: давления, температуры, химического состава внешней среды. Появление в этой зоне даже незначительной дополнительной массы меняет скорость распространения волны 5, ее интенсивность, вследствие чего между переменным электрическим напряжением на входе и на выходе ВШП возникает дополнительная разность фаз и амплитуд. Измеряя эту разницу, можно определить величину дополнительной массы. Сенсоры на мембране оказались чувствительнее, чем сенсоры на толстой основе.

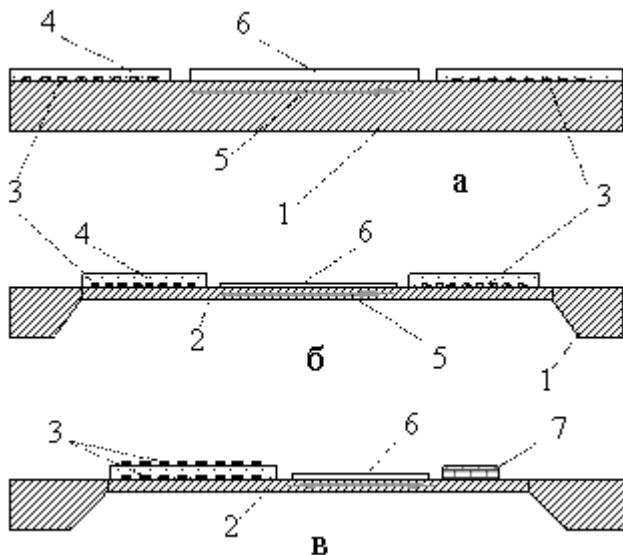


Рис. 7.13. Возможные конструкции сенсоров на ПАВ: а) на толстой основе; б) на пьезоэлектрической пленке; в) с отражателем ПАВ

Вариантом конструктивного исполнения сенсоров на мембране является формирование ВШП не с одной стороны пьезоэлектрической пленки, а с обеих, как это показано на рис. 7.13,в, и использование отражателя ПАВ 7. В этом варианте один и тот же пьезоэлектрический узел 3 используется и как излучатель, и как приемник ПАВ. Поскольку волна проходит расстояние к отражателю 7 и обратно, то при сохранении предыдущих размеров время распространения волны оказывается вдвое больше. Это дает выигрыш в чувствительности. Если же зафиксировать время распространения волны, то ПАВ элемент такой же чувствительности становится на 30-40% короче.

Обратим еще раз Ваше внимание также на то, что периодичность расположения штырей прямо определяет частоту резонансной несущей поверхностной волны. Чем более высокую плотность расположения штырей может обеспечить применяемая технология, тем более высокой частоты ПАВ можно использовать. При использовании нанотехнологии, обеспечивающей возможность формирования штырей с периодом 200 нм, можно работать например, с ПАВ частотой порядка 20 ГГц. От этого можно получить значительный выигрыш в

чувствительности, избирательности и быстродействия сенсоров на ПАВ.

7.4.3. Микровесы на ПАВ

С использованием ПАВ элементов ныне выпускают очень чувствительные микровесы. В качестве примера на рис. 7.14 показаны микровесы XR-Micro компании Метлер Толедо.



Рис. 7.14. Высоточные микровесы компании Метлер Толедо. Взвешивание массы до 52 г с дискретностью 1 мкг. Габаритные размеры 263 x 490 x 322 мм

Они имеют встроенный микрокомпьютер, электронный контроль горизонтального уровня, двойной термостатированный кожух с обезпыливанием, цветной сенсорный дисплей, возможность подсоединения к электронной информационной сети, беспроводной

связи через интерфейс BlueTooth. Тщательно продуманы все нюансы взвешивания очень малых доз дорогостоящих веществ. Обычно взвешиваемую дозу кладут в "лодочку", бюксу или на листик кальки, и при переносе возможны ее потери. В этих весах обеспечивается возможность дозирования навески сразу же в конечную тару через маленькое окошко в дверце, благодаря чему исключаются опасные движения воздуха внутри рабочего объема весов при взвешивании.

Достигается воспроизводимость результатов взвешивания лучше 1,5 мкг, и значительно снижаются потери очень дорогих реагентов.

Такие высокоточные и быстродействующие весы используются, например, в лабораториях тонких химических и биохимических анализов и синтезов в таких сферах применения, как фармацевтическая и косметическая промышленность, добыча и обработка драгоценных редких металлов, геологическая разведка, микроэлектроника, цветная металлургия, судебная экспертиза, научные исследования и т.п.

В литературе описан разработанный с применением ПАВ микроакселерометр, который по нашей классификации входит в группу механических сенсоров, поскольку первичные информационные сигналы появляются в нем в виде механических отклонений инертной массы. Эти сигналы преобразуются затем в давление на чувствительную зону ПАВ элемента, а он, в свою очередь, преобразует их в изменение параметров ПАВ, принимаемой акустическим приемником.

7.4.4. Химические и биохимические сенсоры на ПАВ

Если на чувствительную зону нанести специальное покрытие (окислы металлов, полимерные пленки и т.п.), избирательно сорбирующее молекулы определенного газа или пара из окружающего воздуха, то получим довольно чувствительный ПАВ сенсор присутствия в воздухе соответствующих веществ. Уже разработаны и промышленно выпускаются ПАВ сенсоры для контроля наличия большинства важных органических и неорганических газов в технологической среде и в атмосфере помещений.

В литературе описан, например, ПАВ сенсор с рабочей частотой 6-8 ГГц, в котором используется ориентированная пьезоэлектрическая пленка из нитрида алюминия (AlN) толщиной до 300 нм. ВШП

сформированы с обеих ее сторон (как на рис. 7.13, в). Отражатель акустических волн 7 выполнен в виде многослойной структуры AlN/SiO_2 . На чувствительную поверхность нанесен тонкий слой полиметилметакрилата толщиной 10-20 нм, выполняющий роль избирательного геттера молекул ацетона из окружающего воздуха. В другом варианте для сорбции молекул ацетона из воздуха на верхний электрод из платины наносят мономолекулярный слой 1-1-меркаптондекановой кислоты. В обоих случаях сенсор имел чувствительность порядка единиц пикограмма (10^{-12} г) на площадке 30×30 мкм.

Описаны ПАВ сенсоры влажности воздуха с чувствительными пленками из поли-*p*-диэтилбензола или из натрий-полисульфонсульфоната. В качестве пьезоэлектрика использован кристалл $LiNbO_3$ (128 deg YX) на частоте 138 МГц. Чтобы компенсировать влияние температуры и давления, использованы две одинаковые, расположенные рядом, ПАВ структуры (рис. 7.11), одна из которых (опорная) была изолирована от воздействия внешнего воздуха. Сенсор отлично работает в диапазоне значений относительной влажности 20-85% с чувствительностью 0,4 кГц (дифференциальное изменение частоты) на 1% относительной влажности.

Описан ПАВ иммуносенсор для выявления присутствия молекул кокаина. Для этого на чувствительную зону осажден протеин А, на котором иммобилизованы антитела антибензойлехгоина, избирательно чувствительные к молекулам кокаина. Использовались ПАВ с частотой 250 МГц. В случае наличия в окружающем воздухе даже незначительного количества молекул кокаина наблюдается заметный частотный сдвиг колебаний, по величине которого определяется концентрация кокаина.

За последнее десятилетие были созданы также матричные ПАВ сенсоры. Их еще называют мультисенсорами. В них на одном кристалле формируется одновременно целый массив ПАВ сенсоров, на каждый из которых наносят свою чувствительную пленку. Большинство разработок выполнены в области мультисенсорных газоанализаторов, в которых контролируемый объем воздуха анализируется на присутствие сразу десятков различных веществ.

7.4.5. Применение ПАВ в адаптивных композитных структурах

Одним из интересных применений сенсоров на ПАВ стало их использование в так называемых " **адаптивных** самоконтролируемых композитных структурах ". Речь идет о композитных материалах, предназначенных для очень ответственных применений: обшивки космических и глубоководных аппаратов, самолетов, специальных роботов для работы в агрессивной среде или в условиях высокой радиации, поверхности предельно легких, но прочных строительных конструкций и т.п. Эти материалы, во-первых, должны противостоять довольно жёстким внешним воздействиям, во-вторых, должны быть способны целесообразно изменять свои свойства в зависимости от условий окружающей среды и при изменении режимов работы соответствующего аппарата и, наконец, должны сами постоянно контролировать свою механическую целостность. Для реализации последнего и применяют сенсоры на ПАВ. Принцип действия объясняет рис. 7.15.

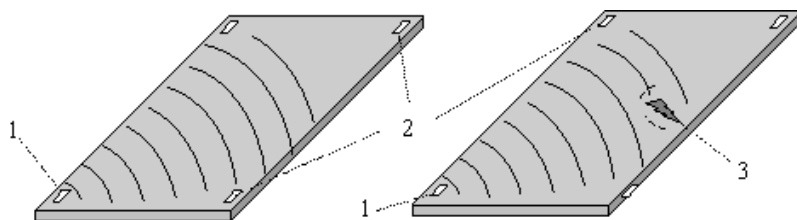


Рис. 7.15. Распространение ПАВ: слева – в неповрежденной структуре; справа – при наличии механического повреждения

В конструкцию композитной обшивки встраивают пьезоэлектрические излучатели 1 и приемники 2 ПАВ. Их работой руководит микрокомпьютер. Он инициирует возбуждение в обшивке ПАВ разных частот и фиксирует в своей памяти характеристики волн, принятых в нормальных условиях акустическими приемниками, установленными в разных точках структуры (временные задержки, фазы, амплитуды). По изменениям этих характеристик в ходе работы микрокомпьютер может определять изменение внешних условий (давления, температуры и т.д.). Если в обшивке появляется механическое повреждение 3, то характер распространения ПАВ изменяется (рис. 7.15, справа): возникают дополнительные рассеянные волны, а первичные волны за дефектом экранируются. По выявленным изменениям характеристик

принятых волн микрокомпьютер рассчитывает местоположение и степень опасности дефекта для всей конструкции.

Краткие итоги

Промышленность выпускает десятки типов УЗ сенсоров расстояния, позволяющих выявить присутствие объекта в контролируемой зоне и измерить расстояние до него. Они предпочтительны в сложных условиях густого тумана, задымленности, запыленности, когда оптические методы "работают" плохо. Сенсоры рассчитаны как на небольшие расстояния – от 15 до 200 мм при точности до 0,2 мм, так и на средние – от 0,3 до 6 м при точности до 1 мм, а также на расстояния в десятки метров. С их помощью можно организовать полноценную эхолокацию в воздухе. В интеллектуальных сенсорах легко решается вопрос коррекции результатов измерений с учетом их зависимости от температуры и давления.

Принцип эхолокации в твердых телах используется в интеллектуальных акустических сенсорах для дефектоскопии металлических заготовок (проката, отливок, ...) и готовых металлоконструкций. Такие сенсоры позволяют своевременно обнаруживать трещины, пустоты, посторонние включения и другие дефекты в металлоизделиях и предотвращать возможные аварии. При повреждениях трубопроводов, бесстыковых рельсов сверхскоростных железных дорог и т.д. они позволяют быстро найти место повреждения и восстановить функционирование этих важных магистралей.

Современные микросистемные технологии позволили создать совершенные, компактные мультидатчики, состоящие из сотен миниатюрных излучателей и приёмников ультразвука. Они значительно упрощают и облегчают дальнейшую обработку сигналов. Уже выпускаются и успешно работают портативные медицинские УЗ аппараты с использованием указанных мультидатчиков. Они, позволяют получать цветные изображения внутренних органов с высокой разрешающей способностью, выявлять и диагностировать нарушения в желудочно-кишечном тракте, в мозге, в щитовидной и молочной железах, в печени, мочеполовых органах, наблюдать и количественно оценить работу сердца и даже проследить, например, за развитием эмбриона.

В области сейсморазведки большие возможности открыл метод спектрально-сейсморазведочного профилирования (ССП). Интеллектуальные акустические сенсоры ССП позволяют, например, своевременно выявлять опасные зоны тектонических нарушений, поверхности слабого механического сцепления слоёв земных пород и предотвратить внезапные оседания зданий и обрушения кровли штреков. С их помощью можно "увидеть" большие герметические пустоты в породах, заполненные метаном и расположенные вблизи от горных выработок, чтобы предвидеть внезапные выбросы газа и угля. Легче находить геологические зоны, перспективные для поиска месторождений алмазов.

В последние десятилетия значительное развитие получили сенсоры на ПАВ (поверхностных акустических волнах). Будучи высокоэффективными корреляторами, они широко применяются в различных видах микроволновой радиосвязи. Благодаря специальным пакетам автоматизированного проектирования, ряд фирм сравнительно недорого и быстро изготавливают сенсоры на ПАВ по спецзаказам. Примерами их применения являются эффективные фильтры промежуточной частоты, выходные и многомодовые фильтры, фильтры Найквиста для цифрового телевидения и цифровой радиосвязи, линии задержки для кодового и временного разделения каналов, фильтры систем волоконно-оптической связи, синхронные и асинхронные конвольверы и т.д. Очень полезной оказалась такая услуга, как автоматическая радиоидентификация объектов. Область поверхности, по которой распространяется ПАВ, оказалась очень чувствительной к ряду внешних воздействий. Это позволило создать с применением сенсоров на ПАВ весьма точные микровесы, новые виды очень чувствительных химических и биохимических сенсоров. Разрабатываются также матричные ПАВ сенсоры. В них на одном кристалле на каждый из десятков ПАВ сенсоров наносят свою чувствительную пленку, благодаря чему выполняется анализ воздуха одновременно на десятки разных веществ. Интересным оказалось применение ПАВ и для создания самоконтролируемых композитных структур.

8. Физические основы работы и классификация электрических сенсоров.

8.1. Физические основы работы электрических сенсоров

Напоминаем, что к электрическим сенсорам мы относим те сенсоры, первичные сигналы в которых появляются в виде изменения электрических свойств физических тел, веществ или связанных с ними электрических цепей.

В широком смысле все или почти все интеллектуальные сенсоры можно отнести к классу электрических. Ведь, в конце концов, любые сигналы в интеллектуальных сенсорах превращаются в электрические сигналы, с которыми работает микрокомпьютер. Как вытекает из двух предыдущих разделов, и в механических, и в акустических сенсорах почти всегда имеются чувствительные элементы, превращающие механические или акустические сигналы в электрические. Такая ситуация очень часто имеет место и во всех других классах интеллектуальных сенсоров. Электрические сенсоры, являющиеся составными частями других сенсоров, обычно рассматриваются в таких случаях как "трансдюсеры", – преобразователи других видов сигналов в электрическую форму. В них изменение электрических свойств является уже вторичным, – следствием первичных изменений механических, акустических или других свойств. Переход к электрической форме сигналов нужен лишь для удобства их дальнейшей обработки. Тем не менее, такие трансдюсеры и в составе других сенсоров сами по себе остаются электрическими сенсорами.

Электрическими свойствами тел являются: их электрический заряд, электрический потенциал, конфигурация создаваемого электрического поля, электроёмкость и т.п. К электрическим свойствам веществ принадлежат их электропроводность или электрическое сопротивление, диэлектрическая постоянная и, в более общем случае, – их комплексная диэлектрическая постоянная. К свойствам электрических цепей можно отнести напряжение на том или ином участке цепи; протекающий через них ток; для цепей переменного тока – импеданс, амплитуду, частоту и фазу колебаний тока, собственные резонансные частоты и т.п. Если любое из этих свойств изменяется под действием факторов или процессов, за которыми требуется

"наблюдать", то эти изменения можно регистрировать и на этой основе строить определенные заключения об объекте наблюдения.

Физические механизмы действия чувствительных электрических элементов чрезвычайно разнообразны, и охватить их все в одном месте было бы громоздко. Поэтому физические основы работы каждого вида электрических сенсоров мы кратко раскроем непосредственно при их рассмотрении.

8.1.1. Классификация электрических сенсоров

По физическому принципу действия чувствительного элемента электрические сенсоры обычно классифицируют (рис. 8.1) на сенсоры с *пассивными* и с *активными* чувствительными элементами.

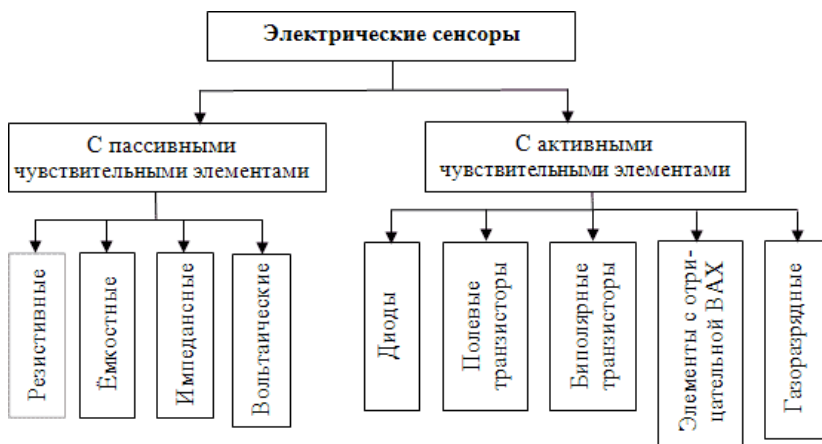


Рис. 8.1. Классификация электрических сенсоров по физическому принципу действия

К активным чувствительным элементам относят транзисторы, диоды, нелинейные электронные элементы, имеющие участки вольтамперной характеристики с отрицательным наклоном, газоразрядные и другие элементы, внутри которых вызванные внешним влиянием небольшие изменения сразу же значительно усиливаются за счет внешнего источника энергии.

Обычно считают, что все активные чувствительные элементы являются "токовыми", т.е. под воздействием контролируемого внешнего фактора изменяется протекающий сквозь них электрический ток.

Пассивные чувствительные элементы классифицируют по виду электрической характеристики, изменяющейся под влиянием контролируемого фактора, на резистивные, ёмкостные и т.д. Дальше их можно классифицировать на подвиды в зависимости от того, под действием какого именно внешнего фактора изменяются их электрические характеристики (пьезорезисторы, терморезисторы, фоторезисторы, ...).

8.2. Резистивные сенсоры

Одними из простейших электрических сенсоров являются *резистивные* сенсоры, в которых под действием внешнего фактора изменяется сопротивление того или иного участка электрической цепи. Как сказано уже выше, их мы будем классифицировать, исходя из того внешнего фактора, под действием которого изменяется электрическое сопротивление резистора.

Известным примером резисторов, реагирующих на механическое воздействие, являются сенсоры-"вахтёры" для наблюдения за целостностью оконных стекол. По поверхности стекла протягивают "кружево" из тонких, почти незаметных проволочек. Сенсор измеряет и контролирует общее сопротивление этого "кружева" проволочек. Если стекло разбивается, то некоторые проволочки неминуемо разрываются, вследствие чего общее электрическое сопротивление изменяется. Регистрируя такое изменение, сенсор подает сигнал тревоги.

К "механическим" резисторам относятся также реостаты, которые изменяют свое электрическое сопротивление при перемещении ползунка.

8.2.1. Терморезисторы

Другой известный пример – терморезисторы, у которых электрическое сопротивление проводника или полупроводника зависит от температуры.

Точность измерения температуры с использованием терморезисторов зависит от ряда факторов. С точки зрения теплофизики терморезистор характеризуется собственной теплоемкостью C_T и собственным тепловыделением $q=I^2R$, где I – величина электрического тока, который течет через терморезистор, R – его электрическое сопротивление. Величину q называют еще "мощностью саморазогрева" терморезистора. Обычно теплоемкость C_T терморезистора тем меньше, чем меньше его масса.

На самом деле терморезистор далеко не всегда находится при температуре, совпадающей с температурой объекта. Ведь он обменивается теплом не только с объектом, температуру которого он должен измерять, но также с окружающей средой и со схемой измерения. Пользуясь известной электротепловой аналогией, эквивалентную теплоэлектрическую схему измерения можно представить в виде, показанном на рис. 8.2.

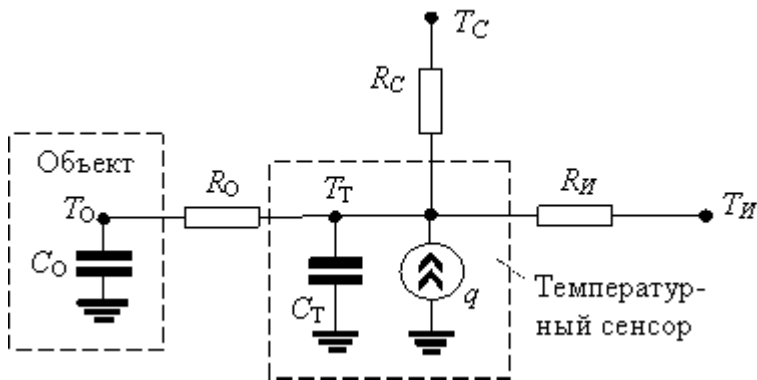


Рис. 8.2. Эквивалентная теплоэлектрическая схема измерения температуры

Расчет этой схемы в стационарном режиме, т.е. в состоянии уже достигнутого теплового равновесия, дает для температуры, измеряемой температурным сенсором, следующую формулу

$$T_T = R_3 \left(\frac{T_o}{R_o} + \frac{T_c}{R_c} + \frac{T_n}{R_n} \right) + q, \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_n} \quad (8.1)$$

где R_o, R_c, R_{II} – тепловые сопротивления между температурным сенсором и объектом, температурным сенсором и окружающей средой, температурным сенсором и измерительной схемой соответственно; T_o, T_c, T_{II} – абсолютные температуры объекта, окружающей среды и измерительной схемы соответственно.

Отсюда видно, что сенсор будет верно измерять температуру объекта лишь при условии, что $R_o \ll R_c, R_o \ll R_{II}$ и $q \ll T_T / R_o$, т.е. если терморезистор находится в тесном тепловом контакте с объектом, а от окружающей среды и от измерительной схемы хорошо теплоизолирован, и если измерительный ток достаточно мал.

Из схемы, показанной на рис. 8.2, вытекает также, что, когда температура объекта быстро изменяется, то реакция терморезистора на эти изменения будет зависеть от его тепловой инерции. Она характеризуется временной постоянной $\tau = R_o C_T$. Для того чтобы измерение температуры было малоинерционным, теплоемкость терморезистора СТ должна быть по возможности меньшей, а его тепловой контакт с объектом по возможности лучшим.

Подчеркнем, что изложенные соображения относятся не только к терморезисторам, но и ко всем другим температурным сенсорам.

Известно, что электрическое сопротивление металлов возрастает с повышением температуры по закону, известному из школьного курса физики:

$$R = R_o (1 + \alpha \Delta T); \quad \Delta R / R_o = (R - R_o) / R_o = \alpha \Delta T \quad (8.2)$$

где R – сопротивление проводника при абсолютной температуре T , R_o – сопротивление того же проводника при абсолютной температуре T_o , α – температурный коэффициент сопротивления. Все металлы имеют положительный температурный коэффициент сопротивления. С целью уменьшения теплоемкости терморезисторы из металлов обычно изготавливают в виде очень тонких проволочек или пленок. Чаще всего используют платину, вольфрам, никель, которые имеют высокую температуру плавления, отличаются своей химической, термической и механической стойкостью и долговременной стабильностью. Однако температурные коэффициенты сопротивления у них относительно невелики.

Более значительные по величине и разные по знаку температурные коэффициенты электрического сопротивления имеют полупроводники. Полупроводниковые терморезисторы принято называть термисторами. Вводя в кремний незначительные примеси, можно получить в определенных температурных диапазонах как положительный, так и почти нулевой, а также отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Особенно широко в роли термисторов применяют окислы металлов. Их изготавливают в виде тонких и толстых пленок, маленьких керамических пластинок, стержней, цилиндров, небольших бусинок и т.д.

Терморезисторы далеко не всегда имеют линейную характеристику, т.е. линейную зависимость электрического сопротивления от температуры. Для простых сенсоров это было проблемой. В составе интеллектуальных сенсоров как нелинейность характеристики, так и тепловые влияния окружающей среды, измерительной схемы и саморазогрев терморезистора могут быть учтены при расчетах на микрокомпьютере. Интеллектуальные терморезистивные сенсоры могут не только пассивно измерять и показывать температуру объекта, но и по заданному алгоритму запоминать и анализировать динамику ее изменения, обнаруживать критические ситуации для системы, в составе которой они работают, или еще только угрожающее приближение к таким ситуациям и своевременно сигнализировать об этом. Микрокомпьютер может руководить и регулированием температуры по заранее заданной программе.

Одним из примеров возможной реализации интеллектуального сенсора на основе терморезисторов являются так называемые "PID-регуляторы температуры" (например, типов T16/P16 и T48), которые выпускаются промышленно. Небольшие по размерам (50×50×106 мм), они удовлетворяют жестким требованиям промышленных применений IP65. Их входы рассчитаны на подключение стандартных платиновых терморезисторов Pt100 (2 или 3, диапазон изменения сопротивления от 1 до 320 Ом) или терморезисторов типов S, T, J, N, K, E, R, B. Измерения происходят каждые 0,4 с. Пользователь может выбрать разные режимы работы: пассивное слежение за изменениями температуры, автоматическая сигнализация о выходе температуры за заданные пределы, автоматическое регулирование температуры через выходные силовые реле по нескольким разным оптимальным алгоритмам. Текущее значение температуры четко высвечивается на светодиодных индикаторах в указанных пользователем единицах. Туда же выводится и другая важная информация.

С использованием микрокомпьютеров и набора миниатюрных термисторов, имеющих очень малую собственную теплоемкость и незначительную тепловую инерцию, можно строить более сложные интеллектуальные сенсоры. В лекции 1 уже приводился пример интеллектуального сенсора для наблюдения за изменениями объемного потока жидкости вдоль стебля или веток растения. В таких сенсорах используют 3 термистора: один – для контроля температуры в месте нагрева, второй – для измерения температуры стебля на заданном расстоянии от места нагрева, третий – для измерения температуры окружающей среды. Сигналы от первого служат для точного регулирования и поддержания заданной температуры в месте нагрева. Это важно, так как повышение температуры выше физиологической границы может отрицательно повлиять на жизнедеятельность растения. Сигналы от второго термистора позволяют микрокомпьютеру вычислить объемный поток жидкости. А сигналы от третьего дают возможность учесть поправку, связанную с отдачей тепла в окружающее пространство.

Еще один пример описан в литературе . Сенсор для определения теплопроводности и коэффициента диффузии жидкости состоит из миниатюрных малоинерционных германиевых терморезисторов, усилителей сигналов от них и из миниатюрного электроннагревательного элемента. Все они сформированы с применением микроэлектронной технологии на одном кристалле полупроводника, который при измерениях погружают в исследуемую жидкость. Микрокомпьютер регулирует мощность нагрева так, чтобы температура жидкости в месте нагрева изменялась по синусоидальному закону. Измерительные терморезисторы расположены на заданном расстоянии от нагревателя. Из сигналов, которые они выдают, микрокомпьютер выделяет гармонические колебания только нужной частоты, определяет их амплитуду и фазовый сдвиг. В работе описана двумерная аналитическая модель переноса тепла в неподвижной жидкости, которая позволяет вычислить по этим данным на микрокомпьютере теплопроводность и коэффициент диффузии жидкости.

Компания Honeywell выпускает сенсоры потока газов, которые состоят из микронагревателя и двух тонкопленочных терморезисторных измерительных мостов. Они перекрывают диапазон измеряемых потоков от нескольких мл/мин до сотен л/мин и широко применяются в химической и фармацевтической промышленности (см. также <http://content.honeywell.com/sensing/products>).

Внешний вид некоторых из них показан на рис. 8.3.

8.2.2. Фоторезисторы

Следующим видом резистивных сенсоров являются фоторезисторы. Их электрическое сопротивление зависит от освещенности. Фоторезисторы изготавливают чаще всего из полупроводников группы $A_{II} B_{VI}$ (CdS , $CdSe$, $CdTe$, ...) путем напыления тонких слоёв или намазывания толстых слоёв с последующим спеканием пластин, реже – из монокристаллов. Изменение их электрического сопротивления под действием света происходит благодаря внутреннему фотоэффекту, т.е. благодаря тому, что при поглощении квантов света в полупроводнике появляются дополнительные свободные носители электрического заряда.

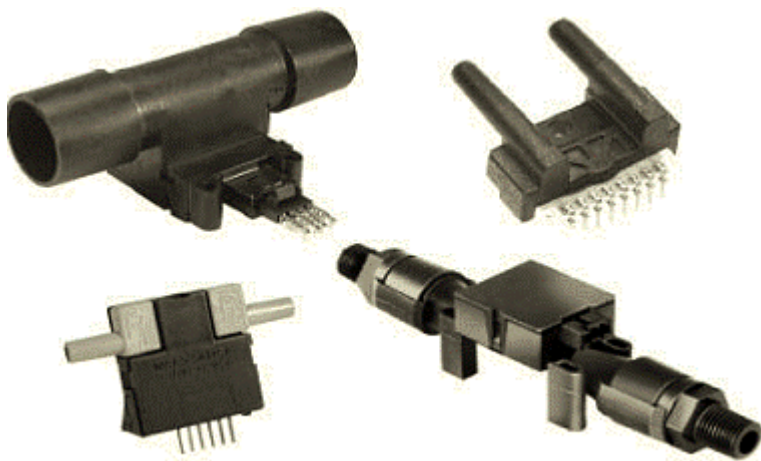


Рис. 8.3. Сенсоры потока газов компании Honeywell

От материала, из которого изготовлен фоторезистор, и от внесенных в него примесей зависит спектральная характеристика, т.е. зависимость чувствительности фоторезистора от длины волны падающего света. Спектры чувствительности существующих фоторезисторов перекрывают весь широкий оптический диапазон спектра от ультрафиолетовой до далекой инфракрасной области. Синтезированы также фоторезисторы, которые практически повторяют спектральную

кривую чувствительности человеческого глаза. Именно их рекомендуют применять для точной фотометрии, т.е. для измерений характеристик света в так называемых "световых единицах" (*люменах, люксах, канделах* и т.п.).

Зависимость электрического сопротивления фоторезистора от интенсивности падающего света далеко не всегда является линейной. Эта зависимость несколько изменяется также с температурой. В простых сенсорах это часто создавало проблемы. Однако для интеллектуальных сенсоров это не является помехой, поскольку и нелинейность, и влияние температуры можно легко учесть путем перерасчета на микрокомпьютере.

С использованием фоторезисторов можно построить многие виды интеллектуальных сенсоров как исследовательского, так и прикладного характера. В качестве примеров можно упомянуть схемы автоматического определения выдержки в фотоаппаратах, в автоматах печати фотоснимков, схемы автоматического управления искусственным освещением и т.д.

8.2.3. Пьезорезисторы

Если на металлическую проволоку действует сила, которая растягивает ее, то в результате деформации длина проволоки несколько увеличивается, а площадь поперечного сечения несколько уменьшается. Из-за этого электрическое сопротивление проволоки возрастает. Такое явление называют пьезорезистивным (от греческого корня) или тензорезистивным (от латинского корня) эффектом. Металлические пьезорезисторы из константана или из нихрома используют для обнаружения и измерения значительных сил растягивания и деформации в строительных и в механических силовых конструкциях. С их помощью можно своевременно обнаружить, например, явление усталости металлических опор, начало их пластической деформации и предотвращать разрушения.

Значительно более высокую тензочувствительность, чем металлические, имеют полупроводниковые пьезорезисторы, поскольку механизм изменения электрического сопротивления в них намного сложнее. Тензочувствительность резисторов, например, из кремния в десятки раз выше, чем у металлических. Но их электрическое сопротивление также значительно сильнее зависит от температуры.

Для уменьшения влияния на результаты измерений неконтролируемых изменений температуры применяют мостовые схемы. В одно их плечо включен нагруженный пьезорезистор (на который действует измеряемая сила), а в другое – точно такой же резистор, но механически не нагруженный. При изменениях температуры соотношение сопротивлений и баланс моста не изменяются.

Высокий уровень развития современной микроэлектронной технологии позволил формировать из кремния миниатюрные прецизионные пьезорезистивные структуры вместе с элементами термокомпенсации, усиления и электронной обработки сигналов. На этой основе созданы и промышленно выпускаются сотни наименований разнообразных микроэлектронных сенсоров для измерения силы, давления, механического напряжения, для фиксации даже легчайших прикосновений. Например, сенсоры давления компании Honeywell на основе кремниевых пьезорезисторов перекрывают диапазон давлений от единиц паскаля до десятков МПа, обеспечивая измерение с точностью $\pm 0,1-3\%$; <http://content.honeywell.com/sensing/products>]. Среди них – сенсоры абсолютного, избыточного и дифференциального давления для работы в сухой и во влажной не агрессивной среде, а также для измерений в жидких и даже в агрессивных средах.

Еще более высокую тензочувствительность имеют пьезорезисторы из эластомеров, которые изготавливают из резины, полиуретана и подобных упругих синтетических материалов, в состав которых включены электропроводящие частицы или волокна (например, графитовый или угольный порошок). Принцип действия пьезорезисторов из эластомеров показан на рис. 8.4.

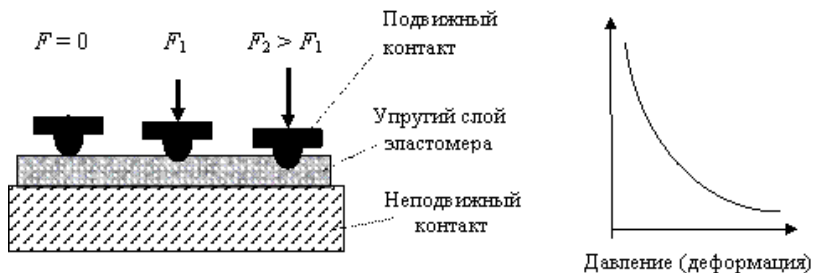


Рис. 8.4. Принцип действия пьезорезистивного сенсора из эластомера

При отсутствии внешней силы подвижный контакт только прикасается к электропроводящему эластомеру, и сопротивление между контактами довольно велико. Появление силы давления, действующей на подвижный контакт, приводит к деформации упругого слоя эластомера и к некоторому углублению контакта в этот слой. При этом одновременно уменьшается расстояние между контактами и между электропроводящими частицами в эластомере и увеличивается площадь контактной зоны. Вместе взятое, это приводит к заметному уменьшению электрического сопротивления. Типичный вид нелинейной зависимости электрического сопротивления от приложенной силы или от перемещения подвижного контакта (от величины деформации) показан на рис. 8.4 справа.

В литературе описаны даже массивы тензочувствительных элементов из таких эластомеров. Их применение вместе с микрокомпьютером в составе интеллектуальных сенсоров позволяет измерять распределение механических нагрузок по поверхности массива и их изменение во времени (динамику). Сенсор может сигнализировать об угрожающей локальной или общей перегрузке, фиксировать и отслеживать перемещение объектов по поверхности этой чувствительной "разумной" сенсорной опоры. При тренировках спортсменопрыгунов, например, такой распределенный сенсор фиксирует место, силу, время и продолжительность отталкивания, позволяет изучать эффективность применения различных амортизаторов и т.п.

В литературе показано, что на основе нитевидных кристаллов кремния *p*-типа, легированных бором и закрепленных на упругих элементах, можно создать высокочувствительные пьезорезистивные сенсоры для надёжной работы даже при криогенных температурах.

8.2.4. Гигристоры

Электрическое сопротивление некоторых гигроскопических материалов существенно зависит от влажности окружающего воздуха. Резисторы из таких материалов называют гигристорами и применяют в сенсорах влажности. Для этого синтезированы специальные материалы: нонилфенилполиэтиленгли-кольэфир, гидроксипропилцеллюлоза и т.п. с наполнением угольным порошком. Типичная зависимость электрического сопротивления таких гигристоров от относительной влажности воздуха показана на рис. 8.5.

В составе интеллектуального сенсора можно учесть изменения этой зависимости с температурой, а также некоторое запаздывание изменения электрического сопротивления гигристора при быстрых изменениях влажности воздуха, запоминать динамику изменений влажности за определенный период для дальнейшей передачи в компьютерную сеть, для документирования, прогнозирования и т.д.

В литературе описано применение в роли гигристора твердого полиэлектrolита на основе силикона (Si-PE), имеющего высокую чувствительность в диапазоне относительной влажности от 11 до 96 % и малую инерционность (время задержки около 4 с).

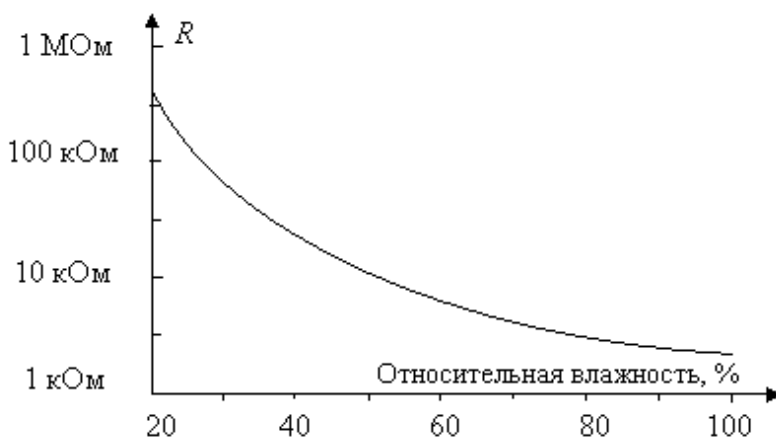


Рис. 8.5. Типичный вид зависимости электрического сопротивления гигристора от влажности окружающего воздуха

8.2.5. Магниторезистивные сенсоры

В магниторезистивных сенсорах используется способность некоторых материалов существенно изменять свою электропроводность в зависимости от направления и напряженности внешнего магнитного поля. К таким материалам относятся, например, пленки пермаллоя (*NiFe*). Чаще всего применяют структуру, в которой чувствительный элемент состоит из 4 пленочных резисторов из пермаллоя, напыленных на поверхность кремния и соединенных в виде мостовой измерительной схемы. Сверху магниторезистивные пленки защищают тонким слоем нитрида тантала. Рядом формируют миниатюрные

плоские пленочные катушки. Когда через одну из них пропускают электрический ток, создаваемое им магнитное поле ориентирует домены пермаллоевых пленок вдоль оси резисторов. Именно в таком состоянии они имеют наибольшую чувствительность. Это делается каждый раз перед началом серии измерений. Через другую катушку при измерениях пропускают постоянный электрический ток, необходимый для компенсации остаточного внешнего магнитного поля, перпендикулярного к плоскости резисторов, и таким образом балансируют измерительную мостовую схему. При появлении измеряемого внешнего магнитного поля происходит разбаланс моста, а выходной сигнал пропорционален магнитной индукции внешнего поля. Все необходимые схемы формируют в том же самом кристалле кремния. Компенсационную катушку используют также для калибровки и для полного балансирования моста. Разность между током балансировки и начальным компенсационным током пропорциональна индукции внешнего магнитного поля. Такая схема обеспечивает высокую линейность измерений, малую их зависимость от температуры и от других помех (например, от наличия поблизости деталей из ферромагнитных материалов).

Кроме "одноосных" магниторезистивных датчиков, чувствительных к магнитному полю одного направления, выпускают также "двухосные" и "трехосные" датчики, в которых 2 или 3 магниторезистивных датчика ориентированы во взаимно перпендикулярных направлениях. Из них изготавливают также современные высоконадежные компасы без магнитной стрелки и вообще без подвижных деталей, а также высокоточные сенсоры направления движения ("датчики курса") для авиационных, морских, автомобильных транспортных средств. На рис. 8.6 слева показан аналоговый магниторезистивный компас НМС6052, в котором используется двухосный сенсор НМС1052 размером 3,5×3,5 мм с минимальным измеряемым магнитным полем 80 мкГс (магнитное поле Земли порядка 600 мГс). Компас работает в диапазоне температур от – 45°С до +120°С, имеет интерфейс к ПК.

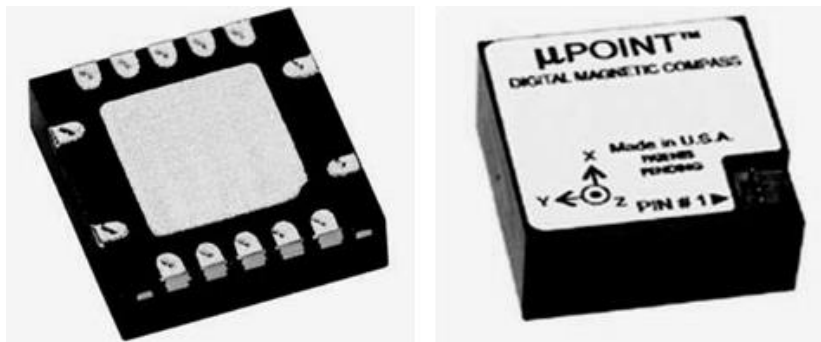


Рис. 8.6. Магниторезистивные компасы компании Honeywell: слева – аналоговый компас марки HMC6052; справа – цифровой компас марки HMR3600

На рис. 8.6 справа показан миниатюрный цифровой гиросtabilизированный прецизионный компас HMR3600, предназначенный для определения азимута, работающий при любой ориентации в пространстве. Кроме трех магниторезистивных магнитометров, в его состав входят три акселерометра и гироскоп, изготовленные с помощью МЭМС технологии, описанной в лекции 2. Компас определяет азимут, продольный и поперечный крены с точностью $\pm 0,5^\circ$ при разрешающей способности $0,1^\circ$. Применяется в авиации, мореплавании, на наземном транспорте, в лазерных дальномерах, блоках управления видеокамерами, при подземной и подводной ориентации.

В 1988 г. Бейбич (М. N. Vaibich) обнаружил, что в многослойных структурах Fe/Cr суммарной толщиной около 100 нм, в соседних слоях которых домены расположены антипараллельно, электрическое сопротивление может очень сильно и быстро изменяться под действием внешнего магнитного поля. Это явление названо "гигантским магнетосопротивлением" (ГМС). С его применением уже созданы высокоточные сенсоры магнитного поля и сверхбыстрые ГМС-головки для жестких магнитных дисков, что позволило резко улучшить характеристики последних.

Еще об одном интересном виде резистивных сенсоров написано в литературе. Речь идет об *акусторезистивном* эффекте – изменении электрического сопротивления вещества при наличии в нем

высокочастотной акустической волны. Довольно сложный механизм этого явления может быть понят только на основе квантовомеханических закономерностей. Он связан с образованием, поглощением и рассеянием фононов – квантов высокочастотных механических колебаний кристаллической решетки. Этот эффект позволяет обнаруживать наличие и определять интенсивность ультразвуковых и гиперзвуковых волн, не воспринимаемых человеческим ухом.

8.3. Емкостные и импедансные сенсоры

Не менее широко для создания сенсоров используют изменения электроемкости чувствительных элементов под влиянием факторов, которые надо контролировать. На рис. 8.7, в качестве примера, в продольном сечении показан цилиндрический конденсатор, в котором внутренний цилиндрический электрод 1 может двигаться вдоль оси цилиндра относительно внешнего цилиндрического электрода 2.



Рис. 8.7. Цилиндрический конденсатор с подвижной сердцевиной как сенсор линейного перемещения

Электрическая емкость цилиндрического конденсатора, как известно, описывается формулой

$$C=2\pi\epsilon_0l/\ln(r/R) \quad (8.3)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная; r и R – радиусы внутренней и внешней обкладок конденсатора; l – длина зоны взаимодействия цилиндров. Поэтому в достаточно широком диапазоне емкость пропорциональна длине l , т.е. является линейной функцией перемещения сердцевины. Такие конденсаторы успешно используют для точного преобразования в электрический сигнал взаимного положения и перемещения тел.

Электрическая емкость плоского конденсатора описывается, как известно, формулой

$$C = \epsilon \epsilon_0 S / d \quad (8.4)$$

где S – площадь его пластин; d – расстояние между ними; ϵ – диэлектрическая проницаемость материала между пластинами. Изменение любой из этих величин приводит к изменению емкости и таким образом может быть зафиксировано. Например, в классических конденсаторах переменной емкости одна группа металлических пластин при повороте вокруг оси сдвигается относительно другой. При этом изменяется площадь их взаимодействия S и соответственно электрическая емкость. Такой конденсатор можно использовать, например, как чувствительный элемент в сенсоре угла поворота.

Расстояние d между пластинами конденсатора обычно невелико (миллиметры или доли мм). Поэтому даже совсем небольшие изменения этого расстояния приводят к заметному изменению электрической емкости. На этом принципе работают емкостные сенсоры миллиметровых, микронных и даже субмикронных перемещений, которые, как уже отмечалось в предыдущих лекциях, можно применить для выявления и измерения вибраций, дифференциального или абсолютного давления и т.п.

На рис. 8.8, например, показан ёмкостной интеллектуальный сенсор серии 3051TA фирмы Rosemount, предназначенный для измерения абсолютного давления жидкостей, газов и паров в диапазоне от 2 кПа до 70 МПа.



Рис. 8.8. Емкостной интеллектуальный сенсор серии 3051ТА фирмы Rosemount для измерения абсолютного давления жидкостей, газов и пара

Миниатюрный емкостной чувствительный элемент расположен в ножке корпуса. Здесь он хорошо защищен от посторонних механических и тепловых воздействий как со стороны контролируемой, так и со стороны внешней среды. Измеренные значения сохраняются в энергонезависимой EEPROM памяти. Имеется выход на жидкокристаллический дисплей, который может быть подключен по желанию пользователя. На нём будут высвечиваться значения давления в любых указанных пользователем единицах. Данные от чувствительного элемента корректируются и линеаризируются в электронном блоке. Обеспечивается точность измерений до 0,075%. Измерения автоматически повторяются, и данные обновляются до 20 раз на секунду. Сенсор нормально работает при температурах контролируемой среды от -40°C до $+121^{\circ}\text{C}$ и при относительной влажности от 0% до 100%.

На рис. 8.9 объясняется принцип действия простого емкостного сенсора уровня жидкости в закрытом резервуаре. Чувствительный элемент сенсора можно рассматривать здесь как два параллельно соединенных конденсатора, в одном из которых пространство между пластинами заполнено жидкостью, а в другом – воздухом. Согласно формуле (8.4) при заполнении жидкостью с диэлектрической проницаемостью ϵ емкость конденсатора возрастает. Поэтому

суммарная емкость чувствительного элемента – конденсатора линейно возрастает с повышением уровня жидкости.

Фактором, усложняющим ситуацию, является то, что диэлектрическая проницаемость жидкости может заметно зависеть от температуры. Например, при повышении температуры воды от 20°C до 30°C значение ϵ уменьшается примерно от 80 до 78. Поэтому изменение температуры может внести нежелательные погрешности в определение уровня жидкости. В интеллектуальных сенсорах этот фактор можно легко учесть, контролируя температуру и вычисляя в микрокомпьютере поправки, связанные с ее изменениями. Несколько изменив микропрограмму вычислений, можно легко настроить тот же интеллектуальный емкостной сенсор на измерение уровня другой жидкости с другой диэлектрической проницаемостью и с другой ее зависимостью от температуры.

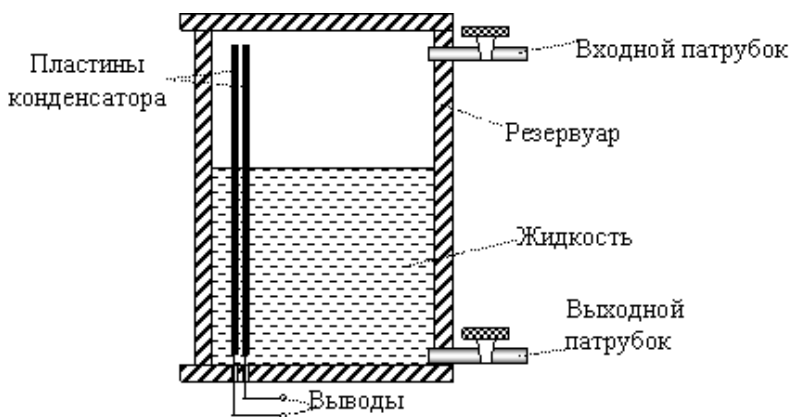


Рис. 8.9. Принцип измерения уровня жидкости в закрытом резервуаре с помощью емкостного сенсора

Можно отслеживать и фиксировать динамику изменений уровня жидкости, обнаруживать непредвиденные быстрые изменения и сигнализировать о них, чтобы своевременно известить о несанкционированных отборах жидкости, ликвидировать неисправности вентилей или разгерметизацию.

Диэлектрическая проницаемость среды между пластинами конденсатора может изменяться не только с изменением температуры, но и в зависимости от других факторов. И соответственно будет изменяться емкость конденсатора. Если между пластинами конденсатора поместить, например, гигроскопичный диэлектрик, то его диэлектрическая проницаемость существенно зависит от влажности. Такой конденсатор можно использовать для создания емкостного сенсора влажности сыпучих материалов, например, грунта, сахара, муки, алебаstra и т.д.

В тонко- и толстоплёночных емкостных сенсорах чаще всего используют изменения емкости между двумя вставленными друг в друга гребенчатыми электродами (рис. 8.10). Такая конструкция обеспечивает максимальную чувствительность на малой площади. Избирательность такому чувствительному элементу придает нанесенная поверх гребенчатых электродов пленка. Именно от её состава и структуры зависит то, молекулы каких именно веществ будут избирательно в ней сорбироваться, и как будет меняться при этом ее диэлектрическая проницаемость.

Материалом чувствительной к влажности пленки служит полиимид. Изменения емкости микроконденсатора с такой пленкой, связанные с абсорбцией и десорбцией молекул водяного пара, регистрируются и измеряются по изменению частоты сформированного на том же кристалле кремния кольцевого электронного генератора, в состав которого входит микроконденсатор. Изменение относительной влажности воздуха на 1% приводило к изменению частоты генератора приблизительно на 25 кГц. Чтобы скомпенсировать влияние температуры и дрейф сигнала со временем, на том же кристалле сформированы микронагреватель и термистор, которые обеспечивают возможность точного нагрева полиимидной пленки до 80°C.

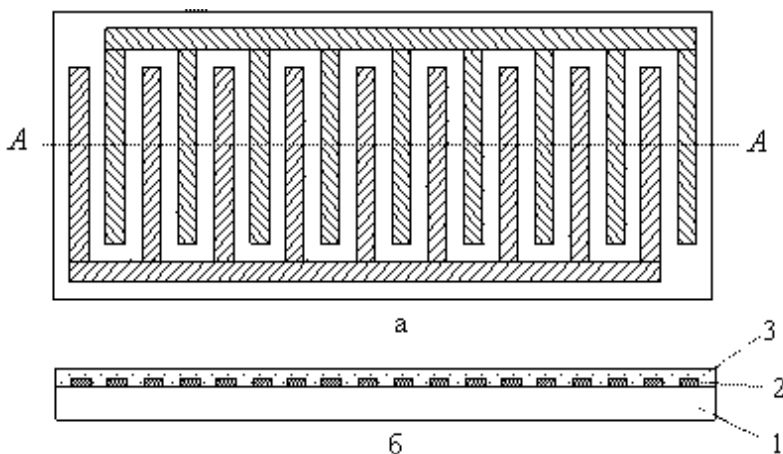


Рис. 8.10. Типичная структура чувствительных элементов емкостных пленочных сенсоров: а) вид электродов в плане; б) разрез вдоль АА: 1 – основа; 2 – металлические электроды; 3 – слой вещества, чувствительного к действию внешнего фактора

У многих веществ под действием внешних факторов изменяется не только диэлектрическая постоянная, но и электропроводность. В общем случае такие вещества принято характеризовать комплексной диэлектрической проницаемостью. А промежуток между электродами в этом случае характеризуют импедансом – комплексным электрическим сопротивлением переменному току. Конструктивно импедансные чувствительные элементы выполняются так же, как и емкостные. Но измерения производятся на переменном токе оптимально подобранной частоты. При пропускании через них переменного электрического тока соответствующей частоты можно измерять не только абсолютное значение импеданса, но и сдвиг фазы между током и напряжением на чувствительном элементе, что дает дополнительную информацию. Например, импедансные газовые сенсоры на основе окислов и нитридов металлов используют тот факт, что соответствующие пленки изменяют свои электрические характеристики при абсорбции и десорбции молекул определенных газов, присутствующих в окружающей среде. Разные газы при этом по-разному влияют на изменения импеданса. Дополнительная информация позволяет надежнее различить вклад каждого из газов сложной смеси. В интеллектуальных газовых сенсорах для этого используется также активное изменение температуры чувствительной

пленки с помощью микронагревателя и анализ зависимости ее импеданса от времени и температуры.

Краткие итоги

Электрические сенсоры по физическому принципу действия чувствительных элементов делят на сенсоры с "пассивными" (резистивными, емкостными, импедансными, вольтметрическими) и с "активными" чувствительными элементами (диоды, биполярные и полевые транзисторы, элементы с отрицательными участками вольтамперной характеристики, газоразрядные). Электрические сенсоры часто используют в составе других видов сенсоров в качестве трансдюсеров – преобразователей информационных сигналов других видов в электрическую форму.

Из резистивных электрических сенсоров наиболее широко применяют металлические и полупроводниковые терморезисторы (термисторы), фоторезисторы, пьезорезисторы, гигристоры и магниторезистивные датчики. Широко применяемыми конструкциями емкостных сенсоров являются плоские и цилиндрические конденсаторы или пленочные, вставленные друг в друга, гребенчатые электроды, на которые нанесен слой селективно чувствительного вещества. Последняя конструкция чаще всего используется и в импедансных электрических сенсорах.

Высокий уровень развития современной микроэлектронной технологии позволил формировать миниатюрные прецизионные резистивные, емкостные, импедансные чувствительные элементы вместе с необходимыми элементами компенсации, усиления и электронной обработки сигналов. На этой основе созданы и промышленно выпускаются сотни наименований разнообразных микроэлектронных резистивных, емкостных, импедансных сенсоров.

Интеллектуальные резистивные сенсоры могут не только пассивно измерять и показывать значения контролируемых факторов (температуры, освещенности объекта, механической напряженности, давления, деформации, влажности, потока жидкости или газа, теплопроводности и коэффициента диффузии, концентрации в воздухе паров определенных веществ, ...), но и по заданному алгоритму запоминать и анализировать динамику их изменения. Они могут автоматически обнаруживать критические ситуации для системы, в составе которой работают, или еще только угрожающее приближение к

таким ситуациям и своевременно сигнализировать об этом. Микрокомпьютер может руководить и автоматическим регулированием контролируемых величин по заранее заданной программе.

9. Вольтаические сенсоры. Сенсоры на диодах и биполярных транзисторах

9.1. Вольтаические сенсоры

Напоминаем, что к этому виду мы относим те сенсоры, в которых под действием внешнего фактора первичный информационный сигнал возникает в виде электрического потенциала, разности потенциалов или напряжения между какими-то точками электрической цепи. Вольтаические сенсоры мы будем дальше классифицировать по физической природе того фактора, под влиянием которого возникает и изменяется электрический потенциал, напряжение или электродействующая сила (ЭДС).

9.1.1. Сенсоры на основе термо-ЭДС

Широко известным является применение для измерения температуры термопар – электрически соединенных между собой проводников из двух разных материалов. Если места их электрического контакта ("спаи") находятся при разных температурах, то между ними возникает разность потенциалов, которую называют "термо-ЭДС". Соответствующее физическое явление по имени первооткрывателя называют эффектом Зеебека. Его физической причиной служит то, что в области "горячего" контакта носители электрического заряда (электроны или "дырки") имеют более высокие скорости теплового движения. Поэтому диффузионный поток носителей от "горячего" спая к "холодному" больше, чем диффузионный поток от "холодного" спая к "горячему". В полупроводниках к этой причине добавляется еще и то, что концентрация носителей заряда у "горячего" спая тоже заметно выше. В результате носители заряда скапливаются возле "холодного" спая, и возникает разность потенциалов.

На не слишком больших температурных интервалах термо-ЭДС в термопарах из металлов пропорциональна разности температур:

$$\varepsilon = \alpha(T_1 - T_2) \quad (9.1)$$

В этом выражении α называют коэффициентом термо-ЭДС или коэффициентом Зеебека; T_1 и T_2 – это температуры "горячего" и "холодного" спаев соответственно. У термопар из металлических проводников значения коэффициента термо-ЭДС лежат в пределах $\alpha = 5-60$ мкВ/К, а у полупроводников могут быть и на порядок выше.

По величине термо-ЭДС всегда можно однозначно определить разность температур. Наиболее широкий диапазон измерения температуры (от -270 deg C до 1300 deg C) обеспечивает термопара хромель/алюмель. К наиболее употребительным термопарам принадлежат медь/константан, нихром/ константан, железо/константан и т.д. Роль одного из проводников с успехом может выполнять, например, и легированный кремний, который имеет коэффициент термо-ЭДС даже более высокий, чем у металлов.

Чтобы уменьшить их собственную теплоёмкость, термопары делают проволочными или пленочными. Благодаря незначительной толщине и массе измерительный спай пленочной термопары может иметь очень малую собственную теплоёмкость и поэтому достаточно малую тепловую инерционность (меньше 10 мс). С помощью пленочной термопары можно измерять температуру даже очень малых тел миллиметровых и субмиллиметровых размеров, к которым ее приклеивают.

Не следует думать, что термопары можно использовать только для измерения температуры. Например, показано, что термоэлектрические свойства углеродных нанотрубок очень чувствительны к адсорбированным на них молекулам азота, аммиака, водорода, кислорода. И поэтому термопары из углеродных нанотрубок вполне могут служить для создания очень компактных датчиков концентрации молекул указанных газов.

9.1.2. Сенсоры на основе фотовольтаического эффекта

Иногда в сенсорах, которые фиксируют и измеряют интенсивность света, используют *фотовольтаический* эффект – появление под действием падающего света разности потенциалов между освещенной и темной зонами полупроводника. Это связано с появлением в

полупроводнике при поглощении фотонов дополнительных носителей электрического заряда (внутренний фотоэффект), которые начинают мигрировать в темную зону. Возникающую фото-ЭДС измеряют электронными схемами с очень высоким внутренним сопротивлением на разомкнутых выводах полупроводника. Благодаря весьма малой инерционности, её используют для контроля мощности и формы сверхкоротких импульсов излучения лазеров.

9.1.3. Пьезоэлектрические сенсоры

Наиболее употребительным видом вольтметрических сенсоров являются пьезоэлектрические сенсоры. Об их многочисленных применениях мы уже упоминали при изучении механических и акустических сенсоров. Напомним, что пьезоэффект состоит в том, что механическая деформация пластины из пьезоэлектрика вызывает его дополнительную поляризацию, вследствие чего возникает разность потенциалов между электродами, нанесенными на противоположные грани пластины.

Наиболее известным материалом для пьезоэлектрических сенсоров являются кристаллы кварца. Сравнительно новыми, более эффективными, пьезоэлектрическими материалами стали лангасит (лантан галлиевый силикат) и лангитат (лантан галлиевый танталат), которые по ряду важных параметров существенно превосходят кварц. Широко применяют также пьезоэлектрическую керамику типа титаната и цирконата бария, свинца. В последние десятилетия все шире применяют и полимерные материалы, которые после нагревания до температуры, близкой к точке Кюри, поляризуются при этой температуре в сильном электрическом поле и последующего охлаждения тоже приобретают хорошие пьезоэлектрические свойства. Особенно известным из них является поливинилиндифторид (PVDF) и его сополимеры.

Один из возможных вариантов конструкции чувствительного пьезоэлектрического элемента для сенсора приложенной силы показан на рис. 9.1 слева. Пьезоэлемент с нанесенными на противоположные его грани электродами устанавливают на неподвижную опору. Сверху кладут подвижную опору, на которую механически опирается один конец штока. Сила, которая действует на другой его конец, передается через подвижную опору на пьезоэлемент, сжимает его, в результате

чего между электродами возникает разность потенциалов, – тем большая, чем больше действующая сила.

На рис. 9.1 справа в качестве примера показан внешний вид одного из пьезоэлектрических сенсоров силы, которые промышленно выпускает компания *Kistler* (<http://www.kistler.com>). Этот сенсор серии 9215 имеет внешнюю резьбу М5х0,5 измеряет значение силы от 0 до 20 Н или от 0 до 200 Н с точностью до нескольких мН. Через один конец корпуса сенсора передается усилие на установленный внутри шток, а через второй – снимается выходной сигнал. Такие сенсоры широко применяют для тестирования переключателей, кнопок, пружин, для точного дозирования силы затягивания винтовых соединений, в микроманипуляторах и т.д.

При разработке и применении пьезоэлектрических сенсоров необходимо учитывать два важных обстоятельства. Первое состоит в том, что в окружающей среде всегда есть некоторое количество свободных ионов, которые под действием разности потенциалов перемещаются и оседают на соответствующих электрически заряженных поверхностях пьезоэлектрика.



Рис. 9.1. Слева – одна из конструкций чувствительного элемента пьезоэлектрического сенсора силы; справа – внешний вид сенсора силы серии 9215 фирмы Kistler

Электрическая изоляция этих поверхностей одна от другой никогда не бывает идеальной, из-за чего возникают, пусть и очень малые, токи перетекания зарядов. Поэтому разность потенциалов между двумя электродами пьезоэлектрика, возникающая после его поляризации или вследствие деформации, постепенно уменьшается и спустя некоторое время исчезает. В связи с этим пьезоэлектрические сенсоры являются чувствительными лишь к меняющимся со временем деформациям и силам, но не могут применяться для измерения длительно действующих сил и деформаций. Второе важное обстоятельство состоит в том, что пьезоэлектрический эффект зависит от температуры. И это обстоятельство надо обязательно учитывать в сенсорах, предназначенных для прецизионных измерений.

9.1.4. Пьезоэлектрический резонатор

Эти трудности можно обойти, используя пьезоэлемент в режиме *пьезоэлектрического резонатора*. Дело в том, что всегда наблюдается не только описанный выше прямой, но и обратный пьезоэлектрический эффект: если на противоположные электроды пьезоэлемента подать напряжение, то пьезоэлемент несколько деформируется (сжимается или растягивается) в поперечном направлении. Когда на электроды пьезоэлемента подаётся переменное напряжение, то в пьезоэлементе возбуждаются механические колебания. Этот эффект широко используется в акустических излучателях, о которых речь уже шла в разд.2.

Амплитуда вынужденных механических колебаний зависит не только от амплитуды приложенного переменного напряжения, но и от его частоты. В том случае, когда эта частота совпадает с частотой собственных механических колебаний пьезоэлемента, наблюдается т.н. "электромеханический резонанс": амплитуда возбуждаемых механических колебаний резко возрастает. Благодаря прямому пьезоэлектрическому эффекту при этом резко возрастает и амплитуда электрических колебаний. По этой причине в электрических цепях переменного тока пьезоэлектрический резонатор ведет себя как высокодобротный колебательный контур с добротностью до 10000. Если с помощью положительной обратной связи и, например, транзистора организовать синхронную подкачку энергии, то в пьезоэлектрическом резонаторе возникают и поддерживаются незатухающие электрические и механические колебания на его собственной частоте. Собственные частоты пьезоэлектрических

резонаторов лежат в очень широком диапазоне от сотен герц до сотен мегагерц – в зависимости от применяемого пьезоэлектрического материала, размеров резонатора, наличия на нем дополнительных элементов и др. факторов.

Когда, например, на пьезоэлектрический резонатор действует внешняя сила, то вследствие некоторого сжатия кристалла частота его собственных механических колебаний изменяется, причем тем больше, чем больше приложенная сила. Измеряя изменение частоты колебаний, можно достаточно точно определить величину силы, в том числе и длительно действующей. Такой вариант применения чувствительных пьезоэлектрических элементов чаще всего и используется на практике. Для компенсации влияния изменений температуры рядом устанавливают два одинаковых пьезоэлектрических резонатора. Но один из них остается механически не нагруженным, а на другой действует контролируемая сила. Для определения её величины измеряется разность частот колебаний этих двух резонаторов. Она практически не зависит от изменений температуры, так как последняя одинаково влияет на частоту обоих резонаторов.

Очень высокая чувствительность такого рода сенсора описано его применение для облегчения прецизионных работ, связанных с отделением и поштучным отбором живых клеток под микроскопом с помощью микроманипулятора. Пьезоэлектрический сенсор силы, закрепленный на держателе стеклянной микропипетки, позволяет своевременно фиксировать даже легчайшие прикосновения пипетки к внешней оболочке клетки или к твердой опоре, на которой находится препарат. Своевременная автоматическая блокировка дальнейшего возрастания силы обеспечивает надежную защиту живой клетки и хрупкого сверхтонкого кончика пипетки от механического повреждения.

9.1.5. Датчики Холла

Известным видом вольтаических сенсоров являются также так называемые датчики Холла. Их действие основано на том, что на носители электрического заряда, движущиеся в магнитном поле, действует сила Лоренца. Поэтому, если через пластину проводника или полупроводника пропускать электрический ток (рис. 9.2 слева), то при наличии внешнего магнитного поля носители электрического заряда под действием силы Лоренца будут отклоняться в направлении,

перпендикулярном вектору индукции магнитного поля и направлению тока. Вследствие этого возникает поперечная разность потенциалов, пропорциональная силе тока и величине индукции магнитного поля. На рис. 9.2 справа показана конструкция полупроводникового датчика Холла: снизу – его вид в плане, сверху – в разрезе. В кристалле кремния *p*-типа формируют область *n*-типа, а над изолирующим слоем окисла – металлические проводники. Одну пару проводников используют для пропускания через *n*-область электрического тока, другую – для измерения ЭДС Холла U_x . Эта ЭДС возникает всегда, когда на датчик действует внешнее магнитное поле. Как правило, в том же полупроводниковом кристалле формируют и все необходимые электронные схемы усиления и температурной компенсации.

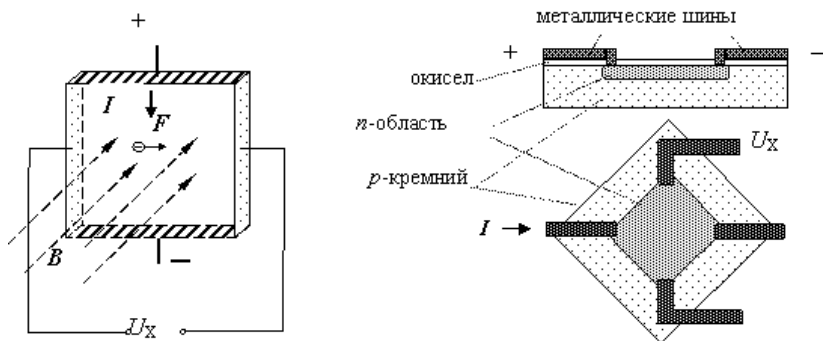


Рис. 9.2. Принцип действия (слева) и структура (справа) полупроводникового датчика Холла

На рис. 9.3 для примера показан внешний вид датчиков Холла, выпускаемых компанией Honeywell, <http://content.honeywell.com/sensing/products>]. Они широко применяются в промышленности, автомобилестроении, строительстве. В так называемых "линейных" датчиках выходной сигнал линейно зависит от величины индукции магнитного поля в широком диапазоне его значений – вплоть до 1000 Гс.



Рис. 9.3. Вид некоторых датчиков Холла от компании Honeywell

9.2. Сенсоры на диодах и биполярных транзисторах

Полупроводниковые диоды формируют, как известно, посредством локального легирования полупроводника, так чтобы образовался т.н. "*p-n*-переход" – переходной слой между областями полупроводника *p*- и *n*- типа. Электрический ток через такую структуру может свободно протекать только в "прямом" направлении – от "анода" (область *p*-типа) к "катоде" (область *n*-типа). Известно следующее теоретическое выражение, описывающее вольтамперную характеристику (ВАХ) диода, т.е. зависимость протекающего сквозь него тока от приложенного напряжения:

$$i = i_0(e^{eU/kT} - 1) \quad (9.2)$$

где i_0 – т.н. "темновой" ток, обусловленный тепловой генерацией носителей заряда; e – электрический заряд электрона; U – приложенное к диоду напряжение; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура диода.

Из формулы (9.2) видно, что ток через диод при фиксированном напряжении сильно зависит от абсолютной температуры. А если зафиксировать пропускаемый ток (например, с помощью схемы источника тока), то напряжение на прямо смещенном *p-n*- переходе, почти линейно возрастает с повышением температуры. Поэтому полупроводниковые диоды и биполярные транзисторы часто используют как чувствительные элементы в сенсорах температуры. Такие сенсоры выпускаются многими фирмами и обеспечивают точность измерения температуры до $\pm 0,1$ deg C.

Интересным сенсором и одновременно актуатором является кремниевый лавинно-пробойный диод (silicon avalanche diode – SAD). Объектом его наблюдения является напряжение в той электрической цепи, параллельно которой он включен (в запертом направлении). Пока напряжение в сети остаётся ниже напряжения пробоя диода, последний, имея очень высокое сопротивление, практически не влияет на работу цепи. Но если напряжение в цепи хотя бы кратковременно превысит напряжение пробоя диода, в результате обратимого электрического пробоя сопротивление диода резко падает, и он практически закорачивает остальную цепь, защищая её от перегрузок. Он, таким образом, как бдительный сторож, неусыпно "охраняет" вверенную ему электрическую цепь", действуя в нужный момент

решительно и молниеносно. Такие диоды наиболее часто применяют в целях защиты цепей передачи данных и плат микросхем от опасных кратковременных перегрузок, например, от пробоев вследствие накопления статического электричества.

9.2.1. Фотодиоды

Однако наиболее известными диодными сенсорами являются фотодиоды. В фотоприемниках (сенсорах света) они ведут себя как управляемый светом источник тока. Благодаря наличию в толще *p-n*-перехода внутреннего электрического поля дополнительные свободные носители заряда, которые возникают при поглощении квантов света, начинают перемещаться и создают дополнительный электрический ток, пропорциональный интенсивности света. Его называют "фототоком". Зависимость тока через фотодиод от напряжения и интенсивности падающего света довольно хорошо описывается формулой

$$i = i_0(e^{eU/kT} - 1) - \eta e\Phi \quad (9.3)$$

где i_0 – "темновой" ток; e – электрический заряд электрона; U – напряжение на диоде; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; η – квантовый выход носителей заряда при возбуждении светом (усредненное количество носителей, которые возникают при поглощении одного кванта света); Φ – квантовая интенсивность светового потока (фотонов/с).

На практике световой поток часто задают в люксах. Тогда коэффициент при нем имеет смысл светочувствительности фотодиода и задаётся в мкА/лк. Соответствующие вольтамперные характеристики фотодиода при отсутствии света ($\Phi=0$) и при его возрастающих интенсивностях ($\Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3$) показаны слева на рис. 9.4.

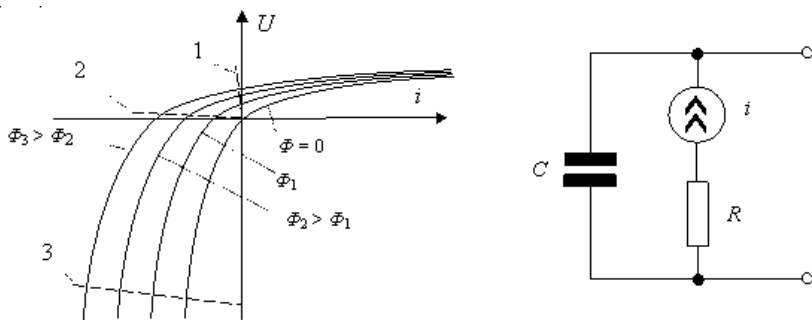


Рис. 9.4. Слева – вольтамперные характеристики фотодиода при разных уровнях освещенности; справа – эквивалентная электрическая схема фотодиода

Справа рис. 9.4 приведена эквивалентная электрическая схема фотодиода. Рядом с источником тока показаны собственная емкость диода C и его внутреннее сопротивление R . Они в значительной мере и определяют быстродействие фотодиода. Чтобы обеспечить высокое быстродействие, надо, в первую очередь, уменьшать собственную емкость фотодиода. Этого достигают, используя фотодиоды p - i - n структуры, которые показаны на рис. 9.5. В такой структуре непосредственно возле p -области (анода) диода формируется обширная очень обедненная носителями, почти изолирующая, область кремния (так называемая i -область). Этим достигается значительное уменьшение собственной емкости фотодиода.

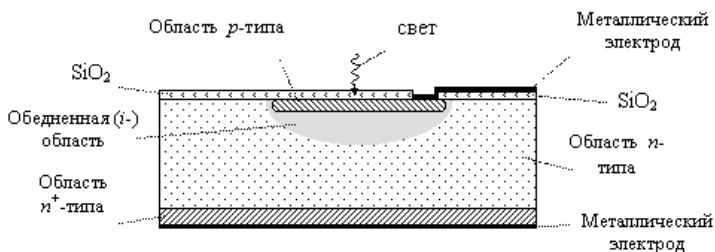


Рис. 9.5. Структура p - i - n -фотодиода

Чтобы в полупроводнике при поглощении фотона образовалась пара носителей заряда (электрон + "дырка"), энергия фотона должна быть

больше ширины запрещенной энергетической зоны. Для кремния, например, это 1,12 эВ. Такую энергию имеют кванты света с длиной волны меньше 1,1 мкм – это так называемая "красная граница" фоточувствительности для чистого кремния. С другой стороны, видимый свет с длиной волны, существенно меньше 1,1 мкм, уже сильно поглощается кремнием. Из-за этого, если *p*-область кремния относительно толстая, свет так и не доходит до *p-n*-перехода. Поэтому для того, чтобы кремниевые фотодиоды имели высокую чувствительность и в видимой области спектра, *p*-область кремния надо делать очень тонкой.

Фотодиоды, которые должны быть чувствительны к свету из ближней инфракрасной области спектра с длиной волны от 1,2 до 2 мкм, делают из германия, а чувствительные к свету средней и далекой инфракрасной (ИК) области – из еще более "узкозонных" полупроводников (*PbS*, *PbSe*, *InSb*, *CdHgTe*, ...). Из-за узкой запрещенной зоны темновой ток у таких фотодиодов и дробовой шум при комнатных температурах слишком велики. Поэтому фотодиоды, которые должны работать в средней и далекой ИК области спектра, как правило, приходится охлаждать.

9.2.2. Фотодиоды Шотки

Для обеспечения чувствительности кремниевых фотодиодов также в фиолетовой и ультрафиолетовой областях используют так называемые фотодиоды Шотки (рис. 9.6). Вместо *p-n*-перехода в них формируют т.н. "барьер Шотки", возникающий на границе раздела "металл – полупроводник". Для этого на фоточувствительную область кремния напылением в вакууме наносят очень тонкий слой золота, достаточно прозрачный для видимого и ультрафиолетового света.

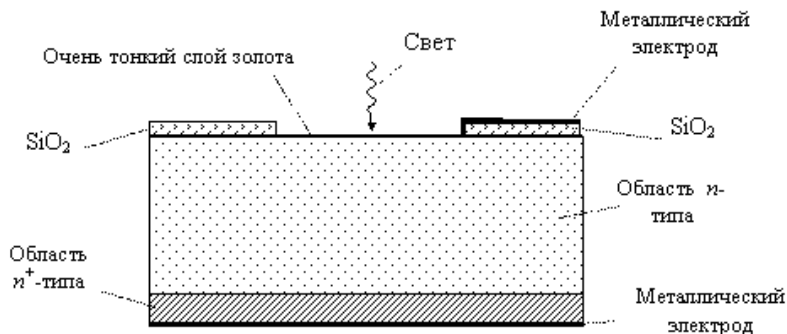


Рис. 9.6. Структура фотодиода Шотки

9.2.3. Схемы включения фотодиодов

Различают несколько режимов работы фотодиодов. Один из них – фотовольтаический (режим измерения фото-ЭДС), обозначенный на рис. 9.4 слева рабочим участком 1. Наклон этого участка определяется большим внутренним сопротивлением прибора или схемы, измеряющей напряжение на фотодиоде. Поскольку сопротивление очень велико, то через фотодиод в этом режиме протекает совсем незначительный ток. Каждому значению светового потока Φ соответствует свое измеренное напряжение U .

Намного чаще в фотодиодных сенсорах света используют электронную схему, показанную на рис. 9.7. Одним из преимуществ такой схемы является то, что в ней напряжение на фотодиоде почти не меняется, благодаря чему сводятся к минимуму потери на перезарядку входной емкости. С помощью операционного усилителя и резистора обратной связи R фототок превращается в выходное напряжение со значительным усилением мощности. Рабочий участок фотодиода в таком режиме, который называют "фотоэлектрическим", представлен слева на рис. 9.4 отрезком 2. Наклон его определяется номиналом

резистора обратной связи R . Ёмкость обратной связи вводят в схему (рис. 9.7) для компенсации сдвига фаз и коррекции частотной характеристики сенсора.

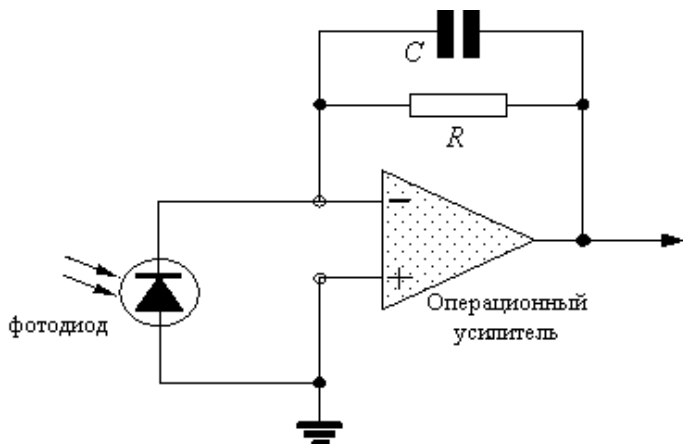


Рис. 9.7. Схема включения фотодиода в фотоэлектрическом режиме

Если требуется максимальное быстродействие, то фотодиод используют в режиме фотопроводимости, в котором на него подается большое обратное напряжение смещения. Это приводит к значительному расширению обедненной зоны возле p -области и к уменьшению собственной емкости фотодиода. Однако надо помнить, что при этом возрастают и темновой ток, и собственный дробовой шум фотодиода. Типичная схема включения фотодиода в таком режиме показана на рис. 9.8.

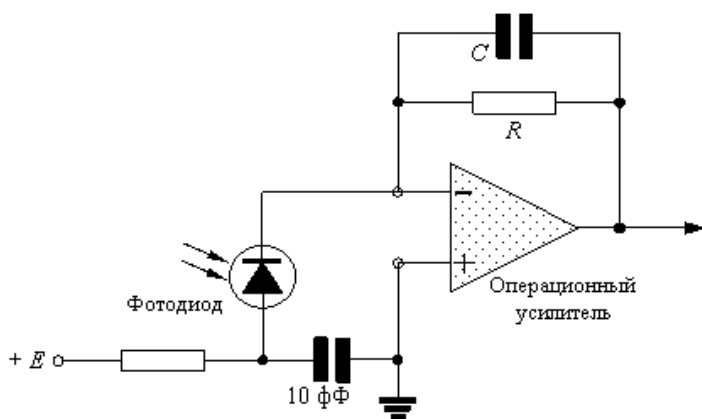


Рис. 9.8. Схема включения фотодиода в режиме фотопроводимости

Соответствующий рабочий участок представлен слева на рис. 9.4 отрезком 3, наклон которого, как и в предыдущей схеме, определяется номиналом резистора обратной связи R . Если этот номинал не слишком велик, то напряжение на фотодиоде меняется мало. Фотосенсор, собранный по такой схеме, может работать на частотах в сотни мегагерц.

Микроэлектронная технология позволила формировать на небольших кристаллах кремния фотодиоды вместе с интегральными схемами усиления фототока, обеспечивая не только высокое быстродействие, но и весьма высокую чувствительность.

9.2.4. Фототранзисторы

Напомним, что биполярный транзистор представляет собой 2 рядом расположенных $p-n$ -перехода и имеет структуру $p-n-p$ или $n-p-n$. Центральную его область называют "базой", другие две – "эмиттером" и "коллектором". Транзистор может работать в трех режимах в зависимости от напряжения на его переходах. В "активном" режиме напряжение на эмиттерном переходе прямое, на коллекторном – обратное. В режиме "отсечки" на оба перехода подано обратное напряжение. Если на оба эти перехода подать прямое напряжение, то транзистор будет работать в режиме "насыщения". Вольтамперная характеристика эмиттерного перехода совпадает с ВАХ полупроводникового диода при прямом токе, а вольтамперная характеристика коллекторного перехода подобна ВАХ диода при обратном токе. Рассмотрим работу транзистора в активном режиме. Если база тонкая, то большинство носителей заряда, инжектированных в неё через открытый эмиттерный переход, попадают в обратно смещенный коллекторный переход и резко усиливают ток через него. Благодаря этому биполярный транзистор можно эффективно использовать как усилитель мощности электрических сигналов.

Часто в оптических сенсорах вместо фотодиода применяют фототранзисторы. Чувствительным к свету элементом является в нем $p-n$ -переход "база – коллектор", на который всегда подается обратное напряжение. Через замкнутую внешнюю электрическую цепь фототок, возникающий под действием света, возвращается на эмиттер, инжектируется из эмиттера в базу и значительно усиливается.

Как правило, фототранзистор имеет только 2 внешних вывода – от эмиттера и от коллектора (транзистор с "плавающей" базой) и включается в усилительно-измерительные схемы так же, как и фотодиод. Благодаря внутреннему усилению фототранзисторы имеют значительно лучшую интегральную чувствительность к свету. Однако они несколько проигрывают фотодиодам в быстродействии. Поэтому им отдают предпочтение там, где световые сигналы очень слабы, а максимальное быстродействие не требуется, например, в люминесцентных сенсорах.

Компания Honeywell на кремниевых фототранзисторах выпускает, например, инфракрасные (ИК) сенсоры положения, небольших перемещений, направления и скорости вращения ферромагнитных объектов (пластмассовых крыльчаток, жетонов, карточек, монет, купюр и т.п.) (см. также сайт <http://content.honeywell.com/sensing/products>). Сенсор состоит из ИК светодиода, фототранзистора и необходимых электронных схем. В сенсорах, работающих "на просвет", светодиод и фототранзистор закреплены так, что "смотрят" навстречу друг другу, а "чувствительное пространство" (от долей мм до десятков мм) находится между ними (рис. 9.9, а). Если в это пространство попадает непрозрачный предмет или его часть, то инфракрасный луч от светодиода к фототранзистору перекрывается, и на выходе сенсора появляется соответствующий сигнал.

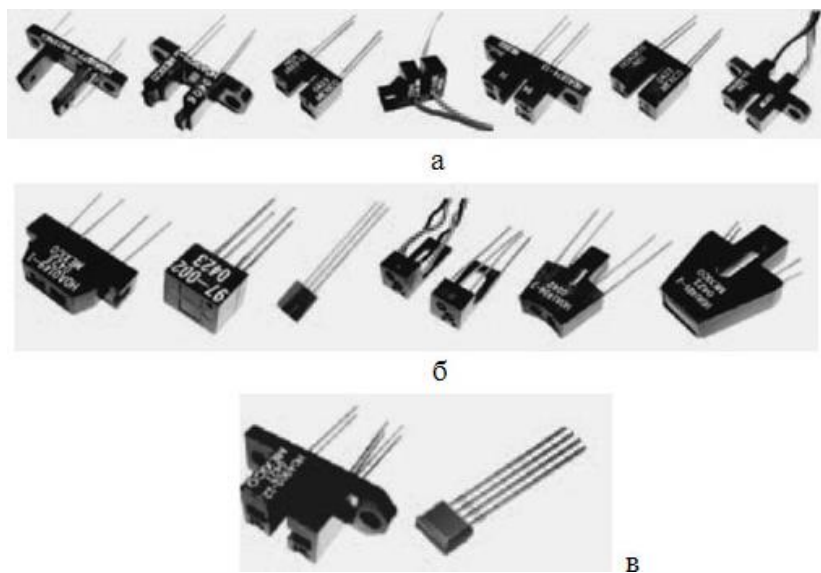


Рис. 9.9. Внешний вид некоторых ИК сенсоров на фототранзисторах: а – работающих "на просвет"; б – "на отражение"; в – ИК сенсоров-энкодеров

В сенсорах, работающих "на отражение", ИК светодиод и фототранзистор закреплены так, что их оптические оси "смотрят" в одну сторону и пересекаются на каком-то расстоянии (рис. 9.9, б). Чувствительная зона находится вблизи точки их пересечения. Если туда попадает предмет, который отражает или рассеивает ИК лучи, то отраженный луч попадает на фототранзистор, и на выходе сенсора появляется соответствующий сигнал.

ИК сенсоры-энкодеры (рис. 9.9, в) состоят из двух ИК светодиодов, двух фототранзисторов и соответствующих электронных схем, интегрированных в одном корпусе. Они используются вместе с кодовым диском или кодовой линейкой, на которых в определенном порядке чередуются светлые и темные участки. Как рассказывалось в "Механические сенсоры перемещения. Принципы работы глобальной системы ориентирования и сенсоры GPS" , анализируя последовательность и подсчитывая количество сигналов от фототранзисторов, энкодер может определять скорость вращения

диска или движения кодовой линейки и их положение (абсолютное или относительно исходного состояния).

В некоторых сенсорах применяют не отдельные фотодиоды или фототранзисторы, а сразу целую линейку или даже матрицу таких элементов. Это позволяет без механических перемещений сразу измерять и фиксировать распределение интенсивности света вдоль одной или двух координат, получая намного больше информации об объекте наблюдения. Примеры применения линеек и матриц фотодиодов мы еще приведем в других разделах. Полупроводниковые диоды и биполярные транзисторы применяют также как чувствительные элементы в сенсорах радиоактивных излучений. Ведь последние в результате ионизации и возбуждения электронных оболочек атомов приводят к образованию в объеме *p-n*-перехода дополнительных носителей заряда, как и при поглощении света. Кремниевые *p-i-n* диоды и биполярные транзисторы применяют для выявления присутствия и измерения интенсивности слабо проникающих видов радиоактивного излучения (α -, β -). Для детектирования сильно проникающих γ - излучений преимущество отдают *p-i-n* детекторам из теллурида кадмия (*CdTe*), поскольку он имеет довольно большую ширину запрещенной зоны (1,47 eV), и составляющие его атомы имеют большие атомные номера (48 и 52).

Краткие итоги

Вольтаические сенсоры классифицируют по природе того фактора, под влиянием которого возникает и изменяется электрический потенциал. Наиболее известными из них являются термопары, пьезоэлектрические датчики и датчики Холла. На не слишком больших интервалах температур ЭДС, возникающая в термопарах из металлов, пропорциональна разности температур между "горячим" и "холодным" спаями. Чтобы уменьшить их собственную теплоёмкость, термопары делают проволочными или пленочными. С помощью миниатюрной пленочной термопары можно измерять температуру даже очень малых тел субмиллиметровых размеров, к которым ее приклеивают.

Материалами для пьезоэлектрических сенсоров являются кристаллы кварца, лангасита и лангатата, пьезоэлектрическая керамика, поливинилиндифторид (PVDF) и его сополимеры. Пьезоэлектрические сенсоры силы широко применяют для тестирования переключателей, кнопок, пружин, для точного дозирования силы затягивания винтовых

соединений, в микроманипуляторах и т.д. Однако они являются чувствительными лишь к меняющимся со временем деформациям и силам, но не позволяют измерять длительно действующие силы. Для этой цели применяют пьезоэлектрический резонатор, в котором поддерживаются незатухающие электрические и механические колебания на его собственной частоте. При воздействии внешней силы частота колебаний изменяется.

Датчики Холла, которые теперь могут быть очень миниатюрными, применяют для измерения магнитных полей в промышленности, автомобилестроении, в научных исследованиях и т.д.

Широко применяют в качестве сенсоров также полупроводниковые диоды и биполярные транзисторы. Наиболее часто их используют для измерений температуры и интенсивности света. Для повышения быстродействия, чувствительности, расширения рабочей области спектра разработаны фотодиоды со сверхтонкой базой, *p-i-n* структуры, фотодиоды Шотки, различные варианты схем включения фотодиодов в схемы усиления. Микроэлектронная технология позволила формировать на небольших кристаллах кремния фотодиоды вместе с интегральными схемами усиления фототока, обеспечивая не только высокое быстродействие, но и весьма высокую чувствительность. Еще более высокую чувствительность обеспечивают кремниевые фототранзисторы, хотя они несколько проигрывают фотодиодам в быстродействии. Полупроводниковые диоды и биполярные транзисторы с успехом используют также для выявления и измерения радиоактивных излучений.

10. Сенсоры на полевых транзисторах и на приборах с отрицательной ВАХ. Газоразрядные сенсоры

10.1. Сенсоры на полевых транзисторах

10.1.1. Структура и физика работы полевого транзистора

Типичная структура полевого транзистора с изолированным затвором показана на рис. 10.1. Над промежутком между двумя областями *n*-типа, сформированными возле поверхности пластины кремния *p*-типа, создан тонкий ($\sim 0,1$ мкм) слой диэлектрика (нитрида или

окисла кремния), на который нанесен металлический электрод вентиля. Остальная поверхность кремния защищена толстым слоем окисла кремния (SiO_2). На нем сформированы металлические электроды, которые через окна в окисле контактируют с n -областями. В процессе работы одну из n -областей соединяют с положительным полюсом источника напряжения. Ее называют "истоком". Другую n -область соединяют с отрицательным полюсом и называют "стоком".

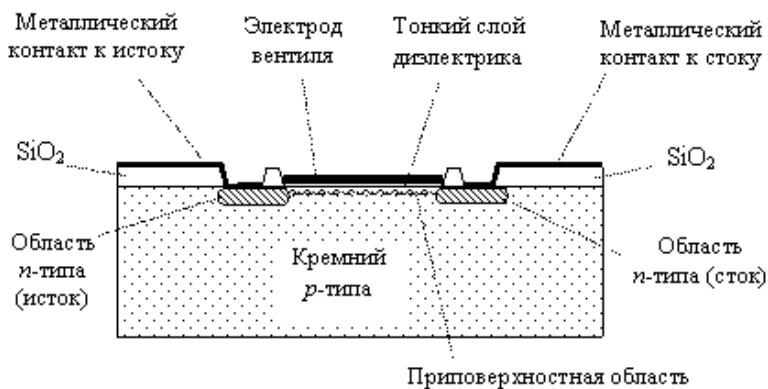


Рис. 10.1. Типичная МДП структура полевого транзистора

Когда в тонком слое диэлектрика электрическое поле отсутствует, ток между истоком и стоком практически равен нулю из-за наличия p - n -перехода, смещенного в обратном направлении. Электрод вентиля, тонкий слой диэлектрика и кремний p -типа в вертикальном разрезе образуют **структуру "металл – диэлектрик – полупроводник"** (сокращенно МДП). Поэтому транзисторы такой структуры называют еще МДП транзисторами.

Если на электроде вентиля появляются положительные электрические заряды, то в тонком слое диэлектрика и в приповерхностной области кремния возникает электрическое поле. Имеющиеся в кремнии свободные электроны проводимости, под действием этого поля притягиваются к диэлектрику, изменяя объемный электрический заряд приповерхностной области. Если напряжение на МДП структуре достигает определенного порогового уровня, то происходит инверсия электропроводности кремния в приповерхностной области, и здесь формируется тонкий канал n -типа проводимости. Его называют

"индуцированным" каналом. Через этот канал от истока к стоку может протекать электрический ток: МДП транзистор "открывается". При дальнейшем возрастании напряжения на МДП структуре канал расширяется, его сопротивление уменьшается, и электрический ток между истоком и стоком возрастает. Металлический электрод этой структуры именно потому и называют "вентилем" или "затвором", что с его помощью, используя совсем незначительную мощность, можно управлять намного более мощным электрическим током от истока к стоку.

Если тонкий слой диэлектрика в структуре полевого транзистора выполнен из окисла, то структуру "**металл–окисел–полупроводник**" сокращенно называют **МОП** структурой, а соответствующий транзистор – МОП транзистором.

МДП транзисторы вышеописанной структуры называют *n*-канальными. На поверхности полупроводника *n*-типа можно создать аналогичную структуру, сформировав приповерхностные области *p*-типа. Образовавшийся полевой транзистор будет *p*-канальным.

Одна из наиболее широко применяемых сейчас технологий изготовления микросхем позволяет одновременно формировать на поверхности кремния как *n*-канальные, так и *p*-канальные транзисторы. Такую технологию называют КМОП(КМДП)технологией, где буква "К" является сокращением от слова "комплементарный" (взаимодополняющий). Микросхемы, образованные из комплементарных *n*-канальных и *p*-канальных транзисторов, оказались удивительно экономичными. С их помощью удалось совместить малое потребление мощности с высоким быстродействием и с очень малыми размерами элементов. А это позволило создавать СБИС (сверхбольшие интегральные схемы) с уровнем интеграции порядка миллиона элементов на одном кристалле.

Из описанной выше физики работы полевого транзистора видно, что его можно использовать как элемент, чувствительный к изменениям электрического заряда или потенциала на вентильном электроде (затворе). А эти последние могут быть обусловлены влиянием разнообразных внешних факторов, которые следует контролировать. Это могут быть, например, химические изменения в веществе, нанесенном на вентильный электрод, или изменения электрохимического потенциала, которые мы рассмотрим дальше.

10.1.2. МДП фоточувствительный элемент

Если на поверхности кремния рядом или над МДП транзистором сформировать фотодиод, то образуется транзисторная структура, чувствительная к внешнему свету. Чаще всего ее используют по схеме, показанной на рис. 10.2.

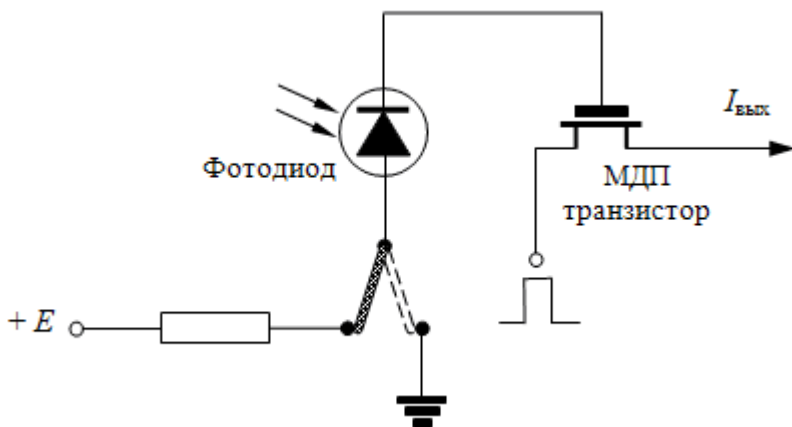


Рис. 10.2. Схема функционирования фоточувствительного элемента из фотодиода и МДП транзистора

Перед началом работы анод фотодиода подключают к источнику напряжения $+E$. Конденсатор, образованный МДП структурой, т.е. затвором, тонким слоем диэлектрика и основой из кремния, заряжается до этого напряжения. Когда анод фотодиода переключают на "землю", фотодиод запирается, электрический ток через него не течет, и электрический заряд, накопленный на затворе, может при отсутствии света сохраняться очень долго. Если фотодиод осветить, то в нем появляется фототок, и часть электрического заряда стекает из вентиляльного электрода на "землю". Чем больше световая "экспозиция", т.е. произведение светового потока на время освещения, тем большая часть начального электрического заряда стекает, и тем меньшим становится потенциал вентиляльного электрода.

10.1.3. Матрица фоточувствительных элементов

Из таких фоточувствительных элементов на поверхности кремния можно сформировать целую матрицу. Для того, чтобы поочередно считывать из фоточувствительных элементов информацию о полученной ими световой экспозиции, надо в каждый из них встроить еще транзисторный ключ. Тогда можно организовать процесс поочередного считывания информации во времени, открывая ключ лишь в нужный момент, когда очередь подошла к данному чувствительному элементу. КМДП технология позволяет сформировать требуемые ключи тоже в виде МДП транзисторов. Таким образом, *каждый элемент простейшей светочувствительной КМДП матрицы для восприятия черно-белых изображений состоит из одного фотодиода и двух МДП транзисторов* (рис. 10.3). МДП транзистор, к затвору которого присоединен фотодиод, мы будем называть "чувствительным"

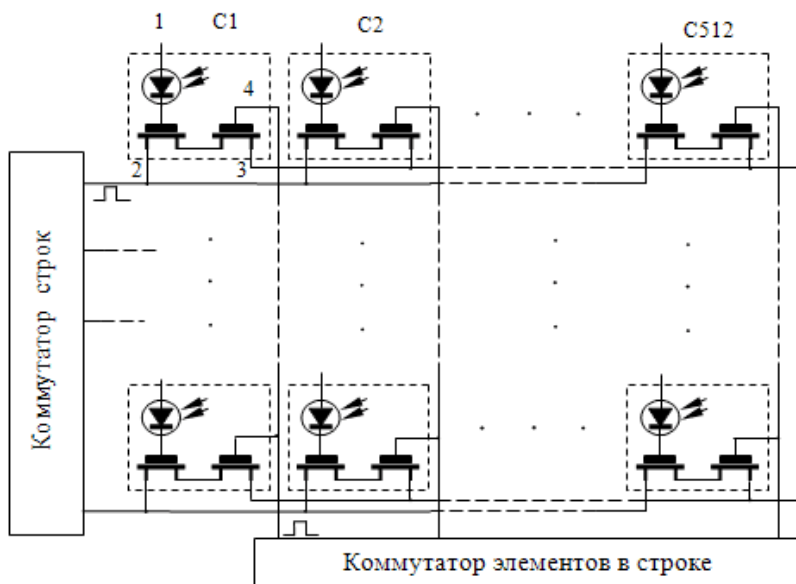


Рис. 10.3. Схема организации считывания информации с простейшей черно-белой светочувствительной МДП матрицы

Отдельные ячейки **светочувствительной матрицы** на рис. 10.3 выделены штриховыми прямоугольными рамками. У левой верхней ячейки выводы пронумерованы. Выводы 1 всех элементов соединяются с коммутатором режима, который для упрощения на рис. 10.3 не показан. Выводы 2 всех элементов в строке матрицы соединяются с горизонтальной шиной, подключенной к соответствующему выходу коммутатора строк. Выводы 3 всех элементов соединены с общим "видеовыходом" матрицы. Он тоже на рис. 10.3 не показан. Выводы 4 всех элементов, расположенных в одном и том же столбце матрицы, соединены с соответствующей вертикальной шиной, подключенной к соответствующему выходу коммутатора элементов в строке.

Функционирует схема так. В самом начале коммутатор режима работы подает на аноды всех фотодиодов напряжение +Е. Это – *режим подготовки* к экспозиции, в ходе которого на затворах МДП транзисторов накапливается положительный электрический заряд. В *режиме экспозиции* этот коммутатор переключает аноды фотодиодов на "землю". На матрицу с помощью высококачественного объектива проецируют изображение, которое надо воспринять и преобразовать в информационный видеосигнал. Под действием света в фотодиодах протекает ток, и часть электрического заряда стекает на "землю". Когда заканчивается время экспозиции, коммутатор отсоединяет аноды фотодиодов от "земли", и ток через изолированные фотодиоды прекращается, даже если на них продолжает действовать свет.

В *режиме считывания видеосигнала* коммутатор строк подает положительный импульс напряжения на истоки чувствительных МДП транзисторов первой строки матрицы, а коммутатор элементов в строке подает положительный импульс напряжения сначала на свой первый выход. Вследствие этого ключевые МДП транзисторы 1-го столбца матрицы (С1) приоткрываются. На видеовыход матрицы при этом может вытекать ток считывания лишь с 1-го элемента 1-й строки. В следующем такте коммутатор элементов в строке подает положительный импульс напряжения на свой 2-й выход, вследствие чего ключевые МДП транзисторы 1-го столбца матрицы закрываются, а во 2-м столбце (С2) открываются. На видеовыход матрицы теперь вытекает ток считывания лишь со 2-го элемента 1-й строки. В следующих тактах аналогично "снимаются" токи считывания последовательно с 3-го, 4-го и т.д. элементов 1-й строки. После того как "снят" ток считывания с последнего элемента 1-й строки, коммутатор строк подает положительный импульс напряжения на

истоки чувствительных МДП транзисторов 2-й строки матрицы, а коммутатор элементов в строке подает положительный импульс напряжения снова на 1-й свой выход. На видеовыход матрицы вытекает ток считывания с 1-го элемента 2-й строки. В следующих тактах коммутатор элементов в строке подает положительный импульс напряжения поочередно на все свои выходы, вследствие чего считывается информация со всей 2-й строки матрицы. И так строка за строкой считывается информация обо всем изображении.

На этом примере Вы можете видеть, как именно наблюдаемое состояние контролируемого объекта преобразуется в сложный информационный сигнал. Ничего таинственного в этом нет. Реальный объект сначала с помощью фотообъектива проецируется в изображение на матрице чувствительных элементов. А цепочка определенным образом организованных электрических процессов приводит к выработке соответствующим способом организованной последовательности электрических сигналов, однозначно описывающей это изображение и позволяющей восстановить его на экране монитора.

10.1.4. Восприятие цветных изображений

Чтобы матрица воспринимала цветные изображения, структура каждого ее элемента ("пикселя") должна быть значительно более сложной. Как известно, человек воспринимает мир разноцветным потому, что имеет в сетчатке глаза 3 разновидности световых рецепторов – "колбочек" – с разной спектральной чувствительностью. *Одни из них особенно чувствительны к красному, другие – к желто-зеленому, третьи – к синему свету. И любой из миллионов различаемых человеком цветовых оттенков составляется из комбинации восприятий этих трёх цветов.* Разработчики цветных светочувствительных матриц использовали это "изобретение" живой природы.

На рис. 10.4, *а* показаны три "пакетика", состоящих из фотодиода и соответствующего цветного светофильтра. Благодаря светофильтрам, один из фотодиодов становится чувствительным только к красному, второй – к желто-зеленому, третий – к синему свету. Из таких "пакетиков" составляется матрица, показанная на рис. 10.4, *б*. Каждый пиксель такой матрицы состоит из 4 светочувствительных элементов

трех типов, как показано на рис. 10.4, в. Один из них чувствителен к красному свету, два – к желто-зеленому, один – к синему.

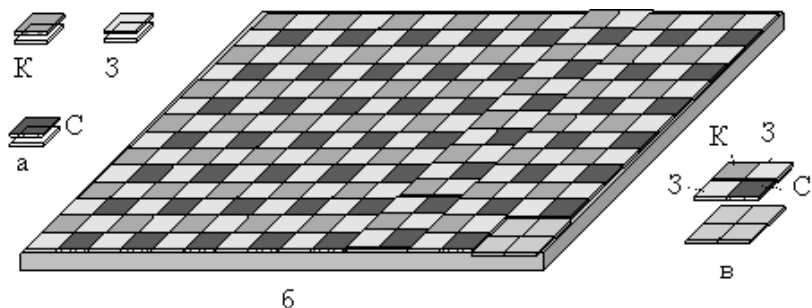


Рис. 10.4. Объяснение конструкции цветной светочувствительной матрицы

Типичная электрическая схема одного пикселя матрицы показана на рис. 10.5. Аноды всех 4-х фотодиодов соединены с выводом 2. Катоды двух "зеленых" фотодиодов соединены с затвором чувствительного транзистора T_1 , катод "красного" фотодиода – с затвором чувствительного транзистора T_2 , катод "синего" фотодиода – с затвором чувствительного транзистора T_3 . МДП транзисторы T_4 , T_5 , T_6 , затворы которых соединены с выводами 3, 4 и 5, являются ключами, позволяющими поочередно считывать информацию с ячеек разного цвета. Они управляются сигналами от коммутатора цвета. Фототоки с их стоков стекаются к истоку МДП транзистора T_7 . Он управляется от коммутатора столбцов и является ключевым транзистором, который позволяет организовать считывание информации с данного пикселя лишь тогда, когда к нему доходит очередь. Таким образом, *типичный* пиксель цветной светочувствительной КМДП матрицы *состоит из 4 фотодиодов, 4 цветных светофильтров и 7 транзисторов.*

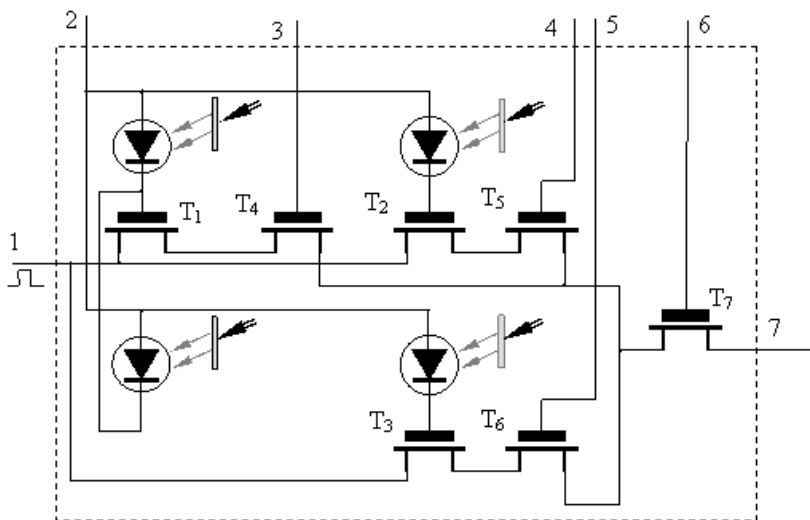


Рис. 10.5. Электрическая схема одного пикселя цветной светочувствительной матрицы

Фотодиоды и МДП транзисторы вместе с системой соединительных проводников, коммутаторами и усилителем выходного сигнала формируют на одной пластине кремния. Пленка с набором цветных светофильтров накладывается сверху.

10.1.5. Примеры цветных фоточувствительных КМДП матриц

На рис. 10.6 показан внешний вид одной из современных мегапиксельных цветных светочувствительных КМДП матриц типа MT9M413C36STC фирмы *Micron Technology Inc.* Она состоит из 1280x1024 цветных пикселей размером 12x12 мкм каждый. Рабочий размер кадра 15,36 x 12,29 мм. Матрица может работать на тактовой частоте 66 МГц от источника напряжения +3,3 В при температуре внешней среды от -5 deg C до +60 deg C. Для повышения быстродействия 1280 строк разбиты на 10 секций, информация с которых считывается параллельно через 10 портов. Тактовый генератор и схемы управления считыванием информации интегрированы на том же кристалле, что и матрица. При частоте считывания 60 кадров/с схема потребляет мощность меньше 150 мВт. Допустима также скорость считывания до 500 кадров/с; потребляемая

мощность, правда, возрастает при этом до 500 мВт [<http://www.micron.com>].

Это, как и умные быстродействующие микрокомпьютеры, является настоящим чудом современных высоких технологий. Фирма IBM сообщила о сотрудничестве с фирмой *Kodak* для совместной разработки и выпуска уже 3- и 5-мегапиксельных светочувствительных цветных КМОП матриц на основе технологического КМОП процесса с разрешением 0,18 мкм и с формированием на поверхности кремния медных проводников. Сложный многослойный пакет медных проводников получился приблизительно на треть тоньше, чем при использовании традиционных алюминиевых проводников. Новая технология позволила формировать светочувствительные матрицы с высокой точностью передачи цвета, с незначительными шумами, способные работать и в условиях недостаточной освещенности [<http://www.ibm.com/news/ru/ru/2005/07/0708.html>].

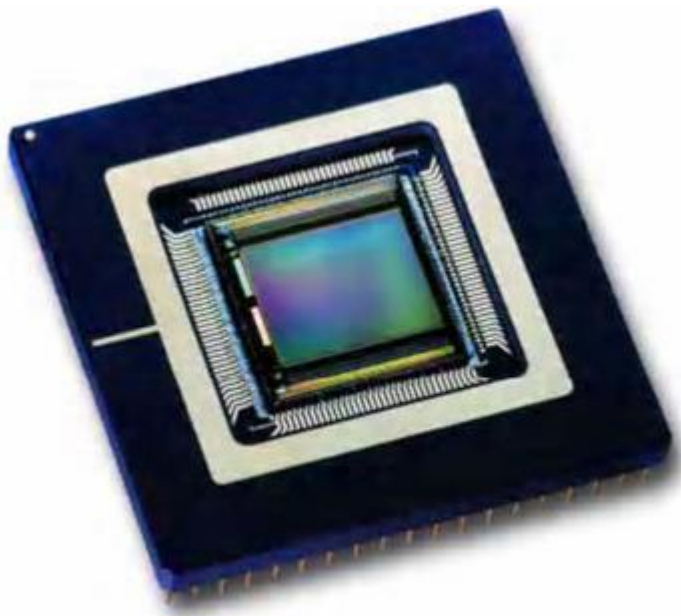


Рис. 10.6. Вид цветного матричного КМДП фотосенсора типа MT9M413C36STC

Разработчики американской компании *Foveon* предложили другую интересную технологию изготовления цветных светочувствительных КМДП матриц (<http://www.foveon.com/>). Она основана на том, что кремний поглощает видимый свет тем сильнее, чем короче длина его волны. Поэтому самый коротковолновый синий свет поглощается уже тонким слоем вблизи поверхности кремния, желто-зеленый проникает несколько глубже, еще глубже проникает красный свет. Разработчики компании *Foveon*, используя эпитаксиальное наращивание слоёв кремния, разместили кремниевые фотодиоды на трёх уровнях. Самый нижний из них находится на глубине проникновения красного света, средний – на глубине проникновения желто-зеленого, верхний – на глубине проникновения синего света. Разделение света по цвету происходит естественным путем. Благодаря этому отпадает необходимость в применении сложного цветного светофильтра из миллионов элементов, изготовление которого требует до 24 отдельных технологических операций. Это значительно удешевило производство цветных светочувствительных матриц. Заметно уменьшилась также и площадь, которую занимает каждый пиксель на кристалле, благодаря чему повысилась разрешающая способность матрицы.

В содружестве с компанией *National Semiconductor* фирма *Foveon* на основе 0,18-микронной КМДП технологии организовала массовое производство X3 матриц (так названы матрицы только что описанного типа) в двух вариантах. Одна – это 1,3-мегапиксельная X3 матрица, имеющая такую же разрешающую способность, как нынешние 2-мегапиксельные обычные матрицы, а вторая – 3,5-мегапиксельная X3 матрица для особо высококачественной и поэтому дорогой видеотехники.

10.1.6. Матрицы из приборов с зарядовой связью

В течение двух предыдущих десятилетий, когда не было еще такого прогресса КМДП технологии, широко использовались светочувствительные линейки и матрицы на основе так называемых "**приборов с зарядовой связью**" (сокращенно "**ПЗС**"). Структура таких светочувствительных элементов показана на рис. 10.7. Каждый из них представляет собой конденсатор со структурой "металл–окисел–полупроводник". Если на металлические электроды 1, 4, 7 и т.д. подать положительное напряжение относительно основы из кремния и осветить соответствующие области, то в кремнии будут возникать свободные носители заряда – электроны и "дырки". Последние под

действием электрического поля будут отталкиваться от положительно заряженных электродов, а электроны будут притягиваться к ним. Поэтому под электродами накапливается отрицательный электрический заряд – тем больший, чем больше экспозиция падающего света. Под электродами, на которых нет напряжения, заряд не накапливается.

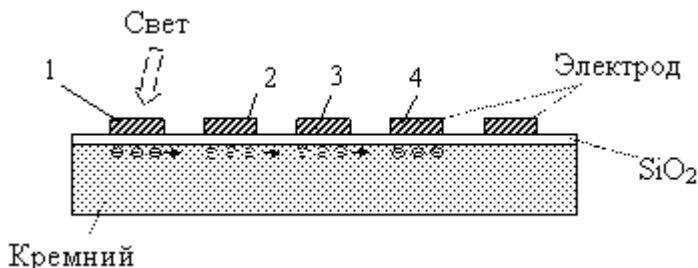


Рис. 10.7. Структура линейки (матрицы) ПЗС и объяснение принципа их действия

Как оказалось, накопленный электрический заряд можно перемещать между электродами. Если, например, подать положительное напряжение на электроды 2, 5, 8, ... , одновременно снимая его с электродов 1, 4, 7, ... , то под действием электрического поля отрицательный заряд из-под электрода 1 переместится под электрод 2. Заряд из-под электрода 4 переместится под электрод 5, из-под электрода 7 – под электрод 8 и т.д. В следующем такте подают положительное напряжение на электроды 3, 6, 9, ... , одновременно снимая его с электродов 2, 5, 8, Электрические заряды перемещаются под электроды 3, 6, 9, Цикл работы такой светочувствительной ПЗС структуры состоит из трех фаз, благодаря которым накопленный заряд можно перемещать вдоль линейки в обоих направлениях и в конце концов считывать полученный видеосигнал. Один пиксель черно-белого изображения состоит здесь из трех ПЗС. Кстати, электроды 1, 2, 3, ... могут быть не обязательно из металла, а, например, из легированного поликристаллического кремния. "Распознавание" цветов в ПЗС сенсорах достигается, как и КМДП матрицах, за счет использования цветных светофильтров. ПЗС сенсоры, благодаря своей простой элегантной структуре и хорошо отработанной технологии изготовления до сих пор удерживают еще свои позиции на рынке видеосенсоров. Дешевизна

светочувствительных ПЗС матриц сделала возможным еще один вариант получения цветного изображения. В этом варианте используется сразу 3 ПЗС матрицы, на каждую из которых проецируется то же самое изображение, но через свой цветной светофильтр. Особенно часто этот вариант применяют в массовых камерах видеонаблюдения, о которых будет идти речь в следующей лекции. Однако высшие достижения сместились уже в пользу КМДП сенсоров.

10.2. Сенсоры на элементах с отрицательной ВАХ

Известен целый ряд полупроводниковых элементов, вольтамперная характеристика (ВАХ) которых имеет участок с отрицательным наклоном.

10.2.1. Туннельные диоды

Это, например, туннельные диоды и тиристоры. ВАХ туннельного диода показана на рис. 10.8. Участок АВ с отрицательным наклоном возникает в нём вследствие того, что на узкой границе раздела вырожденных областей полупроводника p^+ - и n^+ -типа при определенных условиях у свободных электронов появляется возможность прямого туннельного перехода из одной области в другую. Одним из этих условий является подача на туннельный диод достаточно большого обратного напряжения.

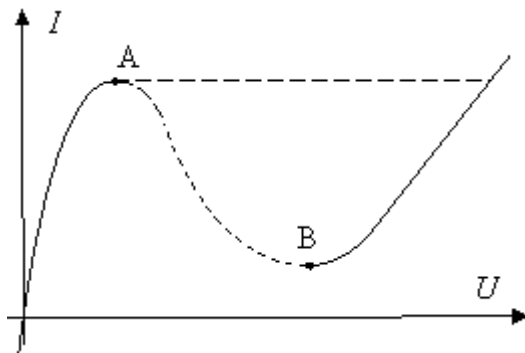


Рис. 10.8. Вид ВАХ туннельного диода

Такой сенсор может быть чувствительным ко всем внешним факторам, которые влияют на создание условий переключения. Особенно чувствительным он становится вблизи критической рабочей точки А. В частности, туннельные диоды в состоянии, близком к точке А, применяют для выявления слабых электромагнитных колебаний (1-10 мВ) с частотами до сотен ТГц. Благодаря наличию отрицательного участка ВАХ одновременно с обнаружением происходит и значительное усиление таких сигналов за счет внешнего источника энергии.

10.2.2. Тиристоры

Тиристор – это четырехслойная полупроводниковая *p-n-p-n*-структура с двумя или тремя выводами, показанная на рис. 10.9, а. Участок ВАХ с отрицательным наклоном (рис. 10.9, б) возникает благодаря специфическому взаимодействию трех рядом расположенных *p-n*-переходов. В неактивном состоянии (на участке О – А) тиристор ведет себя как полупроводниковый диод, включенный в обратном направлении, поскольку всегда один из *p-n*-переходов смещен в обратном направлении. Но, если напряжение на тиристоре превысит критическое значение $U_{\text{пер}}$, то в обратно смещенном *p-n*-переходе начинается управляемый электрический пробой. Ток через тиристор возрастает, в результате чего при замкнутой электрической цепи происходит инжекция носителей заряда в обратно смещенный *p-n*-переход из рядом расположенного открытого *p-n*-перехода. Тиристор "открывается", его сопротивление резко падает. Он переходит на ветвь 2 вольтамперной характеристики и остается на ней, пока ток через него не станет меньше так называемого "тока удержания" $I_{\text{уд}}$.

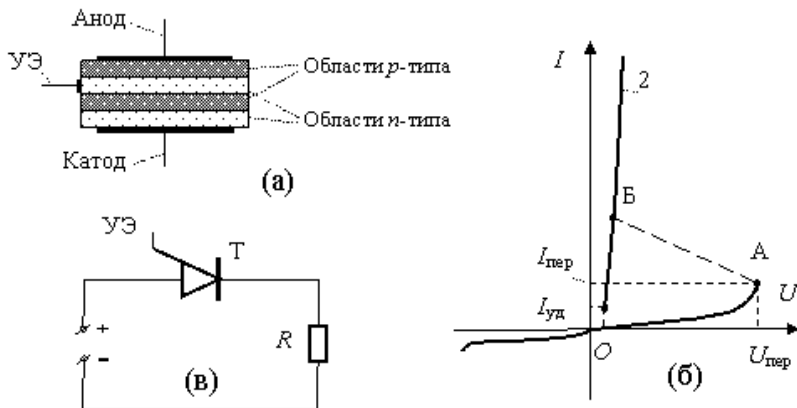


Рис. 10.9. а) Структура тиристора; УЭ – управляющий электрод; б) вольтамперная характеристика; в) типичная схема применения

На рис. 10.9, в показана типичная схема применения тиристора. Если напряжение на тиристоре близко к напряжению переключения $U_{пер}$, то он становится очень чувствительным к влиянию ряда внешних факторов. Он может, например, открыться вследствие воздействия внешнего света (такие сенсоры называют фототиристорами), под действием ионизирующей радиации, при повышении температуры или при появлении на его управляющем электроде слабого электрического сигнала.

10.2.3. Z-резисторы

В ряде работ рассматриваются полупроводниковые сенсоры на основе так называемых Z-резисторов. Их функционирование основано на явлении "управляемой прыжковой электропроводности", открытом в конце 1980-х г.г.. Оно приводит к тому, что Z-резисторы имеют L-подобную ВАХ, показанную на рис. 10.10. На участке 1 полупроводниковый Z-резистор ведет себя как обычный резистор. Электрический ток в нем распределяется по всему объему. Но, когда напряжение достигает критического значения U_n , то в наиболее узких участках между островками начинается электрический пробой, и весь ток стягивается в "шнур" вдоль цепочки наиболее близко расположенных локальных "островков" с повышенной концентрацией носителей заряда. Величина сопротивления и напряжение на Z-резисторе резко падают. Он переходит в режим 2. Увеличение силы

тока в этом режиме в результате локального разогрева приводит к пропорциональному увеличению поперечного сечения токового "шнура" при практически неизменном падении напряжения.

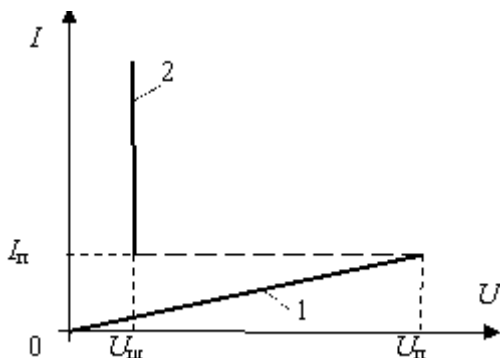


Рис. 10.10. ВАХ полупроводниковых Z-резисторов: 1 – обычный омический режим; 2 – режим "шнурования"; U_p и I_p – напряжение и ток переключения; $U_{ш}$ – падение напряжения в режиме шнура

Если Z-резистор находится в режиме 1 под напряжением, близким к напряжению переключения, то он становится очень чувствительным к влиянию разных внешних факторов и может быть использован как чувствительный сенсор со значительным внутренним усилением сигналов.

На этой основе созданы, например, высокоэффективные температурные сенсоры – так называемые "Z-термисторы", которые в диапазоне температур от -40 deg C до $+120 \text{ deg C}$ можно довольно просто настроить на разные режимы работы: амплитудный, частотный, импульсный или пороговый. Это позволяет реализовать чувствительные и экономичные устройства контроля и регулирования температуры в очень компактном исполнении. Для примера на рис. 10.11 слева показано увеличенное изображение Z-термистора размером 0,2 мм в миниатюрном теплоизолирующем керамическом зажиме.

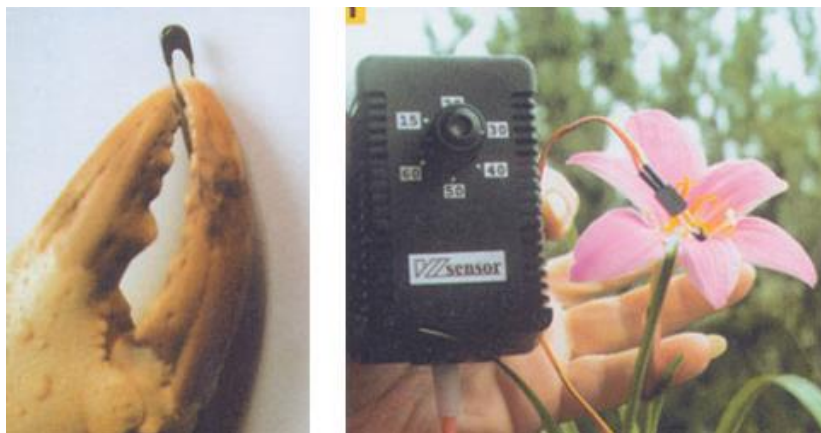


Рис. 10.11. Примеры применения Z –термисторов

Если таким крохотным температурным сенсором провести по телу человека, то можно зарегистрировать изменения температуры в десятые и даже в сотые доли градуса. Это – настоящая находка для врачей при термодиагностике щитовидной и молочной желез, артритов, остеохондрозов и т.п. При лечении детского энуреза сенсор на ночь приклеивают на область мочевого пузыря ребенка. Когда пузырь наполняется, температура его несколько повышается. Сигнал от Z-термистора включает миниатюрный пьезоэлектрический зуммер, прикрепляемый к уху, который своевременно будит ребенка.

На рис. 10.11 справа показан пример применения Z-термистора для экспериментальных исследований физиологических процессов в цветах растений.

Созданы также **Z-сенсоры**, чувствительные к магнитному полю, к ультрафиолетовому излучению, и т.д..

10.3. Газоразрядные сенсоры

Свои электрические свойства под действием внешних воздействий могут изменять не только твердые тела, но и газы. Известно, что электропроводность газов очень зависит от степени их ионизации. Поэтому электропроводность газов особенно чувствительна, прежде всего, к тем внешним факторам, которые изменяют степень их

ионизации. На рис. 10.12 показана упрощенная принципиальная электрическая схема первых *газовых сенсоров ионизирующей радиации*.

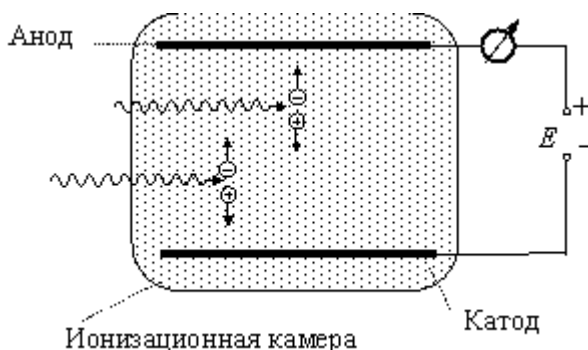


Рис. 10.12. Упрощенная принципиальная электрическая схема газового сенсора ионизирующей радиации

В заполненной газом ионизационной камере имеются 2 электрода, на которые подано напряжение. Если под действием ионизирующей радиации в газовой среде появляются ионы и электроны, то положительно заряженные ионы летят к катоду, а отрицательно заряженные ионы и электроны – к аноду. В электрической цепи возникает ток, величина которого измеряется прибором, откалиброванным в единицах интенсивности радиации.

Напряжение между электродами выбирается таким, чтобы практически все ионы вытягивались на электроды, не успевая рекомбинировать.

В так называемых "пропорциональных счетчиках", предназначенных для выявления и измерения интенсивности мягкого рентгеновского и нейтронного излучений, создается значительно более высокая напряженность электрического поля между электродами. Она выбирается такой, чтобы образовавшийся ион или электрон на пути своего свободного пробега в газе успел настолько ускориться электрическим полем, чтобы при следующем столкновении с нейтральной молекулой или с атомом газа он ионизировал их. При таких условиях возникает лавина электронов, электрический ток быстро нарастает и усиливается в тысячи раз. Такие газовые сенсоры работают в импульсном режиме.

Еще более широко известны так называемые "счетчики Гейгера-Мюллера" – сенсоры для подсчета числа ионизирующих частиц, пролетающих сквозь счетчик за единицу времени. На рис. 10.13 показано, как устроен такой сенсор.

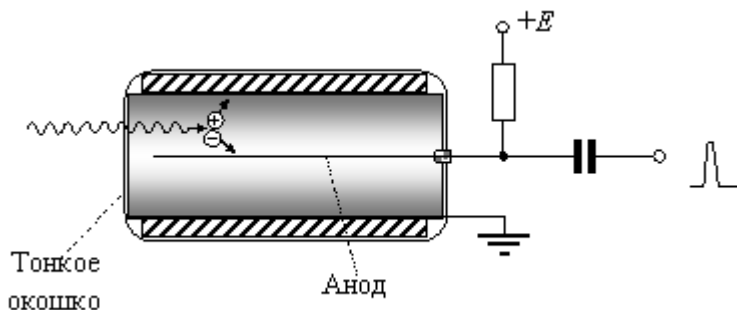


Рис. 10.13. Структура счетчика Гейгера-Мюллера

Как правило, он имеет форму металлической трубки, на оси которой расположена металлическая проволока – анод. Трубка помещена в баллон с инертным газом. Электрическое поле внутри трубки еще сильнее, чем в пропорциональных камерах. Поэтому, когда через тонкое окошечко в трубку проникает ионизирующая частица, ионизирует атомы газа, и возникают носители заряда, то очень быстро (за наносекунды) развивается лавинный процесс, и на выходе схемы появляется импульс тока. Чтобы импульсы были короткими, и их можно было подсчитывать с высокой частотой, к инертному газу прибавляют органические молекулы, которые способствуют быстрому "гашению" лавинного процесса. А к источнику высокого напряжения подключают резистор большого номинала, на котором при возникновении импульса тока падает большое напряжение, в результате чего напряжение на аноде трубки снижается и становится недостаточным для продолжения лавинного пробоя.

Краткие итоги

Устройство и физика работы полевого транзистора позволяют использовать его как элемент, чувствительный к изменениям электрического заряда или потенциала на вентильном электроде (затворе). Эти изменения могут быть обусловлены влиянием

разнообразных внешних факторов, которые нужно контролировать. КМДП (КМОП) технология группового изготовления на одном кристалле кремния "комплементарных" (взаимно дополняющих) n -канальных и p -канальных транзисторов позволила совместить малое потребление мощности с высоким быстродействием, с очень малыми размерами элементов и создавать интегральные схемы с уровнем интеграции порядка миллиона элементов на одном кристалле. Совместное применение фотодиодов и МДП транзисторов позволило создать и организовать массовый промышленный выпуск высокоразрешающих, быстродействующих светочувствительных КМДП матриц для восприятия черно-белых и цветных изображений, содержащих до 3-5 млн. пикселей. Для восприятия цветных изображений используют фотодиоды с красным, желто-зеленым и синим светофильтрами либо разницу в поглощении кремнием света разных длин волн. Благодаря этому фотодиоды, сформированные в кремнии на разной глубине, преимущественно воспринимают свет разных длин волн и позволяют хорошо различать цвета даже без светофильтров.

Благодаря своей простой структуре, отработанной технологии изготовления и вытекающей из этого сравнительной дешевизне на рынке видеосенсоров до сих пор еще удерживают свои позиции также и светочувствительные линейки и матрицы на приборной связью (ПЗС).

Хорошие возможности для применения в качестве сенсоров предоставляют полупроводниковые приборы, имеющие участки с отрицательным наклоном ВАХ – туннельные диоды, тиристоры, Z-резисторы и др. При работе вблизи точки переключения они становятся очень чувствительными к влиянию ряда внешних факторов и могут, например, переключиться при воздействии внешнего света, под действием ионизирующей радиации, при повышении температуры или при появлении на управляющем электроде слабого электрического сигнала.

Продолжают применяться и электрические газовые сенсоры, особенно для выявления и измерения радиоактивных ионизирующих излучений (счетчики Гейгера-Мюллера, пропорциональные счетчики) и дешевые газоразрядные сенсоры.

11. Цифровые фотоаппараты и видеокамеры, тепловизоры, дактилоскопические сенсоры

11.1. Цифровые фотоаппараты

Широко известными интеллектуальными электрическими сенсорами являются цифровые фотоаппараты. Изображение снимаемого объекта проектируется в них с помощью фотообъектива не на фотопленку, как это было в течение предыдущих веков, а на светочувствительную ПЗС или КМДП матрицу. Встроенный микропроцессор организует считывание информации из светочувствительной матрицы, преобразование считанной информации в цифровую форму, запоминание. А, когда это требуется пользователю, то производится быстрая перезапись видеoinформации на внешний компьютер, где полученное изображение может быть воспроизведено на мониторе или распечатано на цветном принтере. Микропроцессор может обеспечивать также автоматическое регулирование диафрагмы и экспозиции, включение дополнительных источников света в случае недостаточной освещенности, автоматическую наводку на резкость, корректирование полученного изображения и другие сервисные функции.

Для иллюстрации на рис. 11.1 показан внешний вид одного из современных цифровых фотоаппаратов высшего класса – "полупрофессиональной" зеркальной камеры EOS 20D фирмы Canon. По своим возможностям она уже превзошла все фотопленочные зеркальные камеры высочайшего класса. Светочувствительная КМОП матрица состоит из 8,5 млн. пикселей и имеет размер чувствительной поверхности 22,5x15 мм. Перед каждым чувствительным элементом установлена своя высококачественная микролинза, которая в несколько раз увеличивает световой поток и повышает качество изображения.



Рис. 11.1. Цифровой фотоаппарат EOS 20D фирмы Canon

Сменные фотообъективы обеспечивают разрешающую способность камеры 1752x1168 точек (наименьшая), 2544x1696 (средняя) и 3504x2336 (самая высокая). Встроенный микропроцессор DIGIC и пакет микропрограмм Digital Photo Professional обеспечивают высокую скорость обработки данных, точность передачи цветов, малое время подготовки камеры к съемкам, возможность съемок до 5 кадров за секунду при высочайшем качестве и до 23 кадров/с в серийных съемках при меньшем качестве. Автоматическая фокусировка возможна одновременно по 7-9 точкам, которые выбираются программой или указаны пользователем. Оптимальная световая экспозиция тоже вычисляется автоматически с усреднением по всем точкам фокусировки или по указанной пользователем приоритетной точке. Полученное изображение автоматически выводится на встроенный цветной жидкокристаллический дисплей из 118 тыс. пикселей. Программный пакет позволяет редактировать изображения: регулировать динамический диапазон, баланс белого, цветовой тон, осуществлять компенсацию экспозиций, преобразование данных в разные видеоформаты (RAW, TIFF, JPEG) и т.д. Обеспечиваются

автоматическое управление фотовспышкой, которое учитывает фактическую освещенность и расстояние до объекта, автоматическая фиксация даты и времени съемки и т.п. Имеется и возможность автоспуска через заданный пользователем интервал времени или от дистанционного электронного пульта. Размеры фотоаппарата EOS 20D – 144x105,5x71,5 мм, масса 685 г. Объем памяти, требуемый для одного фотоснимка высочайшего качества (3504x2336) в самом компактном формате, составляет 3,6 Мб. Поэтому для хранения десятков фотоснимков используют карты памяти на сотни мегабайт.

Еще более высокую разрешающую способность имеет цифровой фотоаппарат той же фирмы CANON EOS 5D: 13,3 млн. пикселей с фотокадрами 4368x2912 элементов. Им можно управлять с удаленного компьютера, причем практически всю съемку фотоаппарат выполняет автоматически. Заложена и функция активной фокусировки в темноте. Для этого встроенный в камеру светодиод излучает короткие импульсы инфракрасного света, чувствительный к этому свету элемент воспринимает отраженный свет, по времени запаздывания отраженного сигнала автоматически определяется расстояние до объекта съемки и вычисляется расстояние до объектива до матрицы, необходимое для точной фокусировки. На рис. 11.2 показан один из цифровых мини-фотоаппаратов марки Genius G-Shot P611 массой всего лишь 82 г. Несмотря на маленькие размеры и массу, он имеет разрешающую способность 2032x1520 элементов, встроенный цветной жидкокристаллический дисплей на 61,6 тыс. пикселей (показан справа), память на 16 Мб, которая может быть расширена за счет дополнительных карт памяти, а также возможность записи коротких видеороликов.



Рис. 11.2. Цифровой мини-фотоаппарат Genius G-Shot P611

Если при съемке на фотопленку для того, чтобы увидеть результат, надо было эту пленку химически проявить, высушить, а потом изготовить фотографии, то при съемке цифровым фотоаппаратом результат можно увидеть сразу. При съемке на фотопленку исправить неудачный результат было проблематично, а часто и совсем невозможно. При пользовании цифровым фотоаппаратом неудачный результат можно исправить на месте, не отходя от объекта съёмки.

Фотоснимок, сделанный цифровым фотоаппаратом в Киеве, можно менее чем за полчаса увидеть в Берлине, Лондоне, Северной Америке, Австралии, если переслать соответствующий цифровой файл через сеть Интернет.

Цифровая фотография и экономически выгодна. Не надо тратить на фотопленку и ее химическую обработку. Бракованные кадры немедленно можно стереть. Одну и ту же карту памяти можно использовать тысячи раз. Она значительно удобней, компактней, надёжней для хранения, чем экспонированные фотопленки.

11.2. Цифровые видеокамеры

Еще одним чудом современной техники и одновременно видом интеллектуальных электрических сенсоров являются цифровые видеокамеры – сенсоры для восприятия динамически изменяющихся изображений, для преобразования их в последовательности видеосигналов с целью последующего хранения, передачи, обработки и воспроизведения на экране. Поскольку изменения визуальных картин могут происходить очень быстро, то задачи, которые надо здесь решать, значительно сложнее, чем в случае цифровых фотоаппаратов. Если там экспозиция одного кадра может длиться до 1 с и более, то в видеокамере на это отводится не больше 20 мс, а желательно и значительно меньше. Поэтому светочувствительные матрицы и организация считывания и обработки полученных сигналов должны иметь здесь значительно более высокое быстроедействие.

Значительно выше становятся здесь и требования к объему встроенной памяти. Если в цифровых фотоаппаратах достаточно объема памяти в десятки-сотни мегабайт, то в видеокамерах, где каждую секунду надо фиксировать несколько десятков кадров, речь идет уже о гигабайтах памяти.

На рис. 11.3 слева показан внешний вид одной из типичных представительниц таких сенсоров – видеокамеры SONY DCR-VX2100E.



Рис. 11.3. Слева – видеокамера SONY DCR-VX2100E; справа – "карманная" видеокамера

Она считается "полупрофессиональной", т.е. предназначена как для специалистов, так и для широкого круга опытных любителей. Светочувствительными элементами в ней являются матрицы ПЗС на 400 тыс. пикселей. Изображение на чувствительной поверхности матрицы формируется высококачественным объективом Carl Zeiss Vario-Sonnar. Его светосилы хватает для работы даже при освещенности лишь в 1 люкс. Встроенный микрокомпьютер не только организует все процессы кадрового считывания информации из матриц ПЗС, ее аналого-цифрового преобразования и кодирования в стандартном формате, параллельной цифровой записи звуковых сигналов, фиксации записи на жесткий диск или CD, видеокассету или на карты памяти. Он может также выполнять автоматическую фокусировку изображения, регулирование световой экспозиции, оптическую стабилизацию изображения. Микрокомпьютер обеспечивает также возможность вывода полученной видеoinформации на встроенный цветной жидкокристаллический экран с 5 миллионами пикселей, двустороннюю связь с внешней сетью по стандарту iLINK DV. Основной корпус видеокамеры имеет массу

1,5 кг и габаритные размеры 120x159x393 мм. При питании от аккумулятора NP-F960 его ресурса хватает на 9 часов автономной работы.

На рис. 11.3 справа показана миниатюрная ("карманная") видеокамера Panasonic SDR-S150. Размером 80x50x97 мм и массой 240 г, она вмещается на ладони и вместе с тем имеет систему из трех светочувствительных матриц на 800 тыс. пикселей каждая, автофокусировку, оптический стабилизатор изображения, автоматическую коррекцию белого, встроенный цветной жидкокристаллический дисплей на 210 тыс. пикселей. Карты памяти SDHC на 4 Гбайта хватает для высококачественной видеозаписи продолжительностью до 50 мин.

А "на очереди" уже цифровые видеокамеры с X3 светочувствительными матрицами (см. "Сенсоры на полевых транзисторах и на приборах с отрицательной ВАХ. Газоразрядные сенсоры", п. 10.1.5). Если для обработки одного цветного пикселя в "обычных" матрицах микропроцессор должен выполнить порядка 100 вычислительных операций, то здесь – значительно меньше. Это позволяет существенно повысить скорость обработки изображений, снизить затраты энергии аккумуляторов, повысить качество "гибридных" цифровых камер, которые объединяют в себе цифровой фотоаппарат и видеокамеру одновременно. Такое объединение имело иногда и ранее, но цифровые фотоаппараты не могут обеспечить приемлемое качество видеофильмов, а видеокамеры позволяли получать лишь посредственные фотоснимки.

Еще одно преимущество, которое дают X3 светочувствительные матрицы, это возможность в случае необходимости "на ходу" повышать свою чувствительность за счет объединения групп отдельных пикселей (2x2, 3x3, 4x4 и так далее) в "большие" искусственные пиксели. Чувствительность при этом будет возрастать в 4, 9, 16 раз соответственно, а разрешающая способность или размеры снимка будут уменьшаться лишь в 2, 3, 4 раза.

11.3. Камеры видеонаблюдения

Черно-белые и цветные светочувствительные матрицы стали основой для разработки разнообразных камер видеонаблюдения, предназначенных для визуального наблюдения за событиями,

происходящими в интересующих пользователя зонах. Уже промышленно выпускаются и применяются многие десятки типов таких камер, отличающихся своим назначением, конструктивным исполнением, размерами и техническими возможностями. Различают следующие группы таких камер: предназначенные для видеонаблюдения на улице и в помещениях; для видеонаблюдения за относительно небольшой локальной зоной и для широкоугольного и даже панорамного видеонаблюдения; предназначенные для кратковременного видеонаблюдения и для видеозаписи происходящих событий с целью их долговременного хранения (регистрационные).

11.3.1. Уличные камеры видеонаблюдения

Камеры видеонаблюдения, устанавливаемые на улице, должны быть рассчитаны на работу в широком диапазоне климатических условий: в жару и в мороз, в сухую погоду и при 100%-й влажности, в яркий солнечный день и в ночное время. Они должны быть защищены от ливней и обледенений, зачастую и от вандализма. Для защиты камер от погодных условий применяют козырьки, кожухи, иногда кожухи с обогревателями, поддерживающими температурный режим работы камеры даже в лютый мороз. Для защиты от вандализма применяют толстые ударопрочные стекла. Для работы в ночное время часто используют встроенную светодиодную подсветку. Перед светодиодами устанавливают мини-линзы, обеспечивающие направленность излучаемого света именно в просматриваемую зону пространства. При этом, как правило, используют тот факт, что кремниевые фотодиоды чувствительны к ближнему инфракрасному (ИК) свету с длиной волны до 1,1 мкм. Поэтому для подсветки в темноте применяют светодиоды, излучающие свет в указанной области спектра. Это называют "ИК подсветкой". Во-первых, она выгодна энергетически, поскольку энергия квантов ИК света меньше, чем видимого. А, во-вторых, человеческий глаз не воспринимает свет с длиной волны больше 0,75 мкм и поэтому не ощущает "ИК подсветку".

Некоторые примеры уличных камер видеонаблюдения приведены на рис. 11.4. Герметичная уличная камера видеонаблюдения AVC-211 (рис. 11.4, а) со встроенным объективом и кронштейном предназначена для установки на стену. Специальная технология герметизации корпуса гарантирует работу камеры в диапазоне температур от -50 до $+50$ deg C при любой влажности и даже после кратковременного пребывания под водой. Разрешающая способность видеокамеры 420

ТВЛ ("телевизионных линий", т.е. строк). В цветном режиме она может работать при минимальной освещенности 0,5 лк (люкс), а в черно-белом – даже при 0,01 лк. Её габариты 50x85x200 мм.

Цилиндрическая черно-белая камера видеонаблюдения AVC-245 (рис. 11.4, б) не требует установки в термокожух, имеет чувствительность 0,003 лк разрешающую способность тоже 420 ТВЛ и встроенный магистральный усилитель, обеспечивающий передачу видеосигнала по коаксиальному кабелю РК-75-2 на расстояние до 1500 м.



Рис. 11.4. Примеры уличных камер видеонаблюдения

Камера видеонаблюдения AVC-201 с конструкцией "шар в стакане" диаметром 60 мм и длиной 70 мм показана на рис. 11.4, в. Сферообразное исполнение и поворотный объектив позволяют направлять объектив практически в любую сторону, не меняя положение врезной части корпуса самой камеры. Камера имеет встроенную ИК подсветку – через мелкие отверстия в сфере.

Цветная камера видеонаблюдения СТ-315С (рис. 11.4, *з*) имеет диаметр 62 мм, длину 125 мм и встроенную направленную ИК подсветку, которая автоматически включается при освещенности ниже 3 лк и обеспечивает просмотр пространства до 15 м.

Цветная поворотная камера DD53CBW-X (рис. 11.4, *д*) может вращаться в своём корпусе на 360 deg по горизонтали со скоростью от 0,1 до 80 угловых градусов за секунду в "ручном" режиме, когда поворотом управляет оператор с центрального пульта, до 150 deg /с в режиме "турбо", когда камера вращается автоматически, осуществляя круговой обзор. С центрального пульта управления оператор может изменять также угол наклона камеры по отношению к горизонту от +2 deg до -92 deg. Камера имеет и "трансфокатор", который за счет изменения фокусного расстояния объектива может обеспечивать дистанционное изменение масштаба изображения до 23 раз. Кроме того, возможно еще и 10-кратное "цифровое" увеличение.

Внешняя скоростная купольная камера видеонаблюдения AI-SD85 (рис. 11.4, *е*) благодаря встроенным нагревателям может работать при сверхнизких температурах, обеспечивая стандарт защиты от окружающей среды IP66. Скорость вращения в режиме "турбо" – до 300 deg /с. Трансфокатор обеспечивает возможность 27-кратного оптического приближения наблюдаемых объектов. Камера может обеспечить отображение на панораме меток сектора и позиции наклона, "негативное" изображение, "замирание изображения", 3D-сканирование, автоматическое "вырезание" из получаемого панорамного изображения до 8 программируемых конфиденциальных зон, автоматическое периодическое сканирование до трёх программируемых "маршрутов просмотра", включая заданные изменения наклона объектива и оптического увеличения (120 с на каждый "маршрут").

На рис. 11.5 показана панорамная камера видеонаблюдения AXIS 212, оснащенная объективом типа "рыбий глаз" и 3-мегапиксельной светочувствительной матрицей. Благодаря этому она обеспечивает автоматическое видеонаблюдение за всем окружающим ее пространством в секторе 105 deg в горизонтальном и 140 deg – в вертикальном направлениях. Изображения передаются через канал связи в виде общей панорамы или (по указанию пользователя) в виде отдельных зон с разрешающей способностью 640x480 пикселей каждая. Т.е. панорамная камера, оставаясь неподвижной, выполняет

роль виртуальной поворотной видеокамеры, которая может осуществлять автоматическое визуальное "патрулирование" всей зоны.



Рис. 11.5. Панорамная камера видеонаблюдения AXIS 212

В ее состав входят также чувствительный микрофон, интеллектуальные детекторы движения и вновь появившихся звуков, двусторонняя аудиосвязь, позволяющая в случае необходимости поддерживать голосовой контакт отдаленного оператора с человеком, находящимся в зоне наблюдения. В случае заранее определяемых угрожающих ситуаций соответствующим видеосообщениям автоматически присваивается наивысший приоритет. В памяти процессора сохраняется ряд программных механизмов, которые гарантируют надежную защиту от несанкционированного доступа и защиту информации от фальсификации.

Уличные камеры "внешнего" видеонаблюдения всё шире и шире используются сейчас для охраны общественного порядка на вокзалах и в аэропортах, в учебных заведениях и на стадионах, в других местах массового скопления людей, на автомагистралях и на перекрестках оживленных городских улиц, на въездах и по периметрам охраняемых территорий. Неусыпно наблюдая за обстановкой и регистрируя её в памяти очень большой ёмкости, они в случае необходимости помогают быстрее и объективнее разобраться в деталях произошедших событий. Нарушителям общественного порядка при наличии таких камер становится всё труднее остаться незамеченными и избежать ответственности.

11.3.2. Камеры "внутреннего" видеонаблюдения

Промышленность выпускает сейчас также десятки типов камер видеонаблюдения внутри помещений. Приведем лишь некоторые примеры. На рис. 11.6 показана высококачественная цветная камера видеонаблюдения STC-2008.



Рис. 11.6. Цветная камера видеонаблюдения STC-2008. Размеры 42x42x86,5 мм.

Эта камера работает в широком динамическом диапазоне освещенностей – до 120 дБ, имеет чувствительность до 0,03 лк, автоматическую регулировку усиления и компенсацию встречной засветки. Это позволяет камере формировать максимально качественное изображение при различных условиях освещения. Такие камеры целесообразно устанавливать в вестибюлях, на въездах в подземные гаражи, для наблюдения за зрителями в театрах, кинотеатрах, цирках, спортзалах, где ярко освещена только сцена, экран или арена, в дискотеках, в казино и ночных клубах, а также при иных условиях сложного неоднородного освещения. Диапазон рабочих температур – от -10 до $+50$ deg C, потребляемая мощность – 2 Вт.

Современная технология позволила создать *миниатюрные* камеры видеонаблюдения, примеры которых приведены на рис. 11.7. Все они легко встраиваются в предметы интерьера, оставаясь малозаметными, а то и практически незаметными.

Камера КРС-190DV с чувствительностью 0,05 лк устанавливается в двери вместо обычного "глазка" и обеспечивает разрешающую способность 420 ТВЛ. Если она установлена, то Вам уже не обязательно подходить к двери и выглядывать через оптический

глазок. Посетителя Вы можете хорошо разглядеть на мониторе. В Ваше отсутствие камера может регистрировать всё происходящее перед Вашей дверью – непрерывно или эпизодически, например, в течение нескольких минут после нажатия посетителем кнопки звонка.

Камеру КРС-S20P4 размером 20x20 мм используют как для открытого, так и для скрытого ближнего наблюдения. Камера КРС-EX190B1 имеет диаметр 19 мм и длину 48 мм. А видекамера WATEC LCL-619 по своим размерам меньше спичечного коробка. Она формирует кадры хорошего качества в диапазоне освещенностей объекта наблюдения от 10 000 до 1 люкса.



Рис. 11.7. Примеры миниатюрных камер видеонаблюдения

Выпускаются и бескорпусные камеры видеонаблюдения типа показанной на рис. 11.7 вверху справа. Показанная внизу справа беспроводная камера видеонаблюдения имеет мини-объектив, замаскированный под шляпку винта. Она идеально подходит для скрытого видео-аудио наблюдения, передает цветное изображение и звук на расстояние до 200 м в зоне прямой радиовидимости. Может

быть подключена к любому устройству, имеющему аудио-видео вход, например, к телевизору, видеомагнитофону, ноутбуку или компьютеру.

11.3.3. Сетевые камеры видеонаблюдения

Следующим шагом в совершенствовании цифровых видеокамер стало т.н. " IP видеонаблюдение ". Были созданы т.н. " сетевые видеокамеры ", способные не только фиксировать видеоизображение, но и посылать его на любые расстояния по сети Интернет, а также по локальным сетям или беспроводным сетям Wi-Fi. Сетевые видеокамеры называют также "IP видеокамерами", а интегрированные в сеть Интернет – "веб-камерами" ("web-камерами" или сокращенно "веб-кам").

Для обеспечения передачи видеоинформации в сеть в состав сетевой видеокамеры введены блок компрессии и встроенный сервер. Блок компрессии выполняет сжатие оцифрованного видеосигнала в один из стандартных форматов представления изображений в сетях, благодаря чему, часто довольно существенно, сокращается размер видеокadra. Это необходимо для ускорения передачи видеоизображений по сети. В принципе компрессия может быть выполнена программно на микрокомпьютере. Это было бы даже дешевле. Однако при этом трудно вложиться в жесткие временные рамки работы в online режиме. Поэтому большинство производителей выпускают веб-камеры с аппаратной реализацией сжатия. Функции сервера обычно выполняет сам встроенный микрокомпьютер, используя специально записанную для этого микропрограмму.

Передаваемое сетевой видеокамерой изображение можно просмотреть на любом устройстве (персональный компьютер, ноутбук, КПК, мобильный телефон), имеющем доступ в Интернет или в соответствующую локальную сеть. Возможны разные режимы просмотра – в зависимости от записанной в микрокомпьютер камеры программы. В режиме непрерывного просмотра видеокамера непрерывно передает в сеть воспринимаемые текущие изображения контролируемого пространства. Чтобы его просматривать, надо через соответствующую сеть соединиться с видеокамерой по её индивидуальному сетевому электронному адресу. Если связь двусторонняя, то камерой можно и управлять: поворачивать в нужном направлении, менять оптическое увеличение и т.д. В режиме периодического просмотра видеокамера через заданные промежутки времени фиксирует изображение или целые видеосюжеты в своей

памяти и выдает их по запросам в сеть. В режиме работы по запросу камера ведет передачу видеоизображений только в ответ на запрос пользователя и столько времени, сколько ему нужно.

Несколько примеров сетевых видеокамер представлено на рис. 11.8.



Рис. 11.8. Примеры сетевых видеокамер

IP камера AVIOSYS 9060A-SL предназначена для использования внутри помещений. Её масса 114 г, габаритные размеры – 58x28x108 мм. Она обеспечивает уровни разрешения 160x120, 320x240 и 640x480 с частотой до 30 кадров/с. Одиночные кадры передаются в формате JPEG, динамические видеосюжеты – в формате Motion-JPEG (AVI). Камера оснащена аналоговым аудио входом для подключения микрофона с целью передачи не только изображения, но и звука. В ее состав входит чувствительный программированный детектор движения. Если в зоне его видеонаблюдения появляется подвижный объект, то детектор сразу обнаруживает это, автоматически отсылает по заданному электронному адресу сообщение об этом и начинает передачу изображений через локальную информационную сеть или через Интернет. Передача изображений может производиться также по расписанию. В случае недостаточного освещения автоматически включается дополнительный источник света. Если это предусмотрено программой, то может быть автоматически включена и звуковая сирена. В камеру встроена защита паролем от несанкционированного доступа. Имеется возможность фильтрации нежелательных посетителей. При наличии двусторонней связи возможно дистанционное изменение уровней яркости, контрастности, масштабирование, поворот и зеркальное отражение изображения,

отображение текущего времени. Флэш-память позволяет обновлять программное обеспечение камеры. Камера легко устанавливается: достаточно подключить её к информационной сети и присвоить ей IP адрес.

Профессиональная сетевая камера AXIS 210A размерами 88x38x146 мм предназначена для передачи видеоинформации с объекта и передачи звука в двух направлениях. Она может одновременно передавать видеопоток в форматах MotionJPEG и MPEG-4 совместно со звуком и автоматически оптимизирует качество передаваемого изображения и полосу пропускания в сети. Благодаря встроенному веб-серверу, доступ к AXIS 210A возможен через обычный веб-браузер. Информацию с неё могут одновременно просматривать по сети до 20 пользователей при передаче в формате MotionJPEG и неограниченное количество пользователей в формате MPEG-4. Для предотвращения несанкционированного доступа по сети данная камера, как и предыдущая, имеет защиту паролем, поддерживает функцию фильтрации IP адресов, имеет настраиваемый детектор движения, тревожный вход для подключения охранного датчика и релейный выход для подключения внешнего управляемого устройства. Она также может настраиваться на срабатывание по расписанию.

Сетевая видеокамера JVC VN-V686U оснащена бесшумным поворотным устройством с высокой точностью позиционирования, которое обеспечивает вращение видеокамеры со скоростью от 0,04 до

400 /с и наклон в пределах от минус 5 deg до +185deg. Имеет 36-кратный трансфокатор, дополняемый 32-кратным цифровым увеличением. Благодаря подвижному ИК фильтру, сетевая видеокамера передает видео круглосуточно, а ее чувствительность "днем" и "ночью" составляет 0,5 и 0,04 лк, соответственно. Видео в формате MPEG-4 рекомендуется использовать для локального просмотра "живой" картинки и ее передачи удаленным пользователям, а в формате M-JPEG – для записи на ПК или на сетевой видеорегистратор. При необходимости камера VN-V686U может управляться дистанционно вручную с помощью джойстика. Эта сетевая видеокамера имеет функцию "Auto Tracking" – автоматического слежения за подвижным объектом. При активации этой функции и наличии движущегося объекта камера VN-V686U автоматически поворачивается вслед за ним и таким образом "держит" его в поле зрения неограниченное время. Для соблюдения

конфиденциальности можно назначить до 8 зон в кадре, скрытых для записи. Сетевая камера запоминает размер и расположение масок и при повороте сохраняет эти зоны скрытыми.

Сетевые видеокamеры предоставили пользователям множество новых возможностей. Будучи, например, в командировке, Вы через Интернет можете посмотреть, что делается на Вашем рабочем месте, в Вашем доме, в ином интересующем Вас месте. Установив сетевую видеокamеру, например, в детской комнате, Вы можете на любом расстоянии, даже с другого континента наблюдать, как играет, учится, отдыхает Ваш ребенок, проконтролировать поведение няни, проверить её квалификацию, отношение к вашему ребенку.

Зайдя, например, на Интернет-сайт <http://www.cannobio.net/webcam.asp>, Вы можете, благодаря установленной там веб-камере, увидеть обстановку в уютном курортном городке Каннобио, расположенном на границе Италии и Швейцарии на берегу огромного красивейшего горного озера Лаго Мажжоре.

Две сетевых видеокamеры, установленные одна – у Вас, другая – у Ваших партнеров – позволяют легко организовать видеоконференции. Этот перечень можно продолжить.

11.3.4. Специальные камеры видеонаблюдения

На рис. 11.9 слева показан общий вид т.н. "**камеры глобального наблюдения**" CA-ZOOM PTZ компании Everest VIT.



Рис. 11.9. глобального видеонаблюдения CA-ZOOM PTZ

Она предназначена для обследования и контроля изнутри состояния внутренних элементов цистерн, котлов, баков, подземных хранилищ, продуктопроводов и других больших труднодоступных резервуаров, имеющих входное отверстие размером от 100 мм. Интеллектуальная выносная видеокамера, показанная в увеличенном виде справа, крепится к штанге, которую вводят внутрь резервуара и могут "наращивать", насаживая дополнительные звенья, до длины 100 м и больше. Видеокамера соединяется с системой дистанционного управления кабелем длиной до 150 м. По командам от пульта управления выносная камера может свободно вращаться вокруг вертикальной и горизонтальной осей, внимательно "осматривая" всю внутреннюю картину резервуара. Она автоматически поддерживает нужный уровень освещения, выполняет фокусировку, выбор масштаба изображения (оптическое – до 25х, цифровое – до 12х) и экспозиции, передает видеоинформацию через кабель. Она может работать в загазованной и запыленной атмосфере, погруженная в воду, бензин, аммиак или другую жидкость на глубину до 45 м, при температуре от – 18 deg C до +66 deg C. Она также является радиационно стойкой,

выдерживает интенсивности облучения до 5000 рад/ч и поэтому применяется в ядерной энергетике для контроля за состоянием ядерных реакторов, каналов транспортирования ядерного горючего, бассейнов с отработанным топливом, емкостей для хранения радиоактивных отходов, систем охлаждения реакторов и т.п. Благодаря возможности делать измерения параллельными лазерными лучами, разрешающая способность этой видеокамеры такова, что позволяет различить проволочку диаметром 13 мкм на расстоянии 1,8 м.

11.4. Тепловизоры

До сих пор мы рассматривали интеллектуальные электрические сенсоры, предназначенные для восприятия и обработки изображений в видимой области спектра, т.е. в спектральной области, которую воспринимают и глаза человека. Теперь мы рассмотрим интеллектуальные сенсоры, которые делают то, на что не способен человеческий глаз. Эти сенсоры умеют видеть во тьме, воспринимать тепловое излучение предметов! В обиходе их называют тепловизорами. Речь идет о формировании, восприятии и обработке изображений в средней инфракрасной области спектра.

11.4.1. Физические основы работы

Как мы уже отмечали, фотодиоды из кремния воспринимают ИК свет с длиной волны до 1,1 мкм. Для того, чтобы воспринимать ИК свет с большей длиной волны, на поверхности КМДП матриц эпитаксиально выращивают пленки "узкозонных" полупроводников (с меньшей шириной запрещенной зоны). Чаще всего для этого используют сейчас эпитаксиальные пленки КРТ (кадмий – ртуть – теллур). Они позволяют сформировать матрицы фотодиодов, способных воспринимать ИК свет в так называемых "окнах прозрачности" атмосферы – между 2,1 мкм и 2,4 мкм, между 3 мкм и 5,5 мкм и между 8 мкм и 14 мкм, в том числе и чисто тепловое излучение объектов с температурой от -50 deg C до $+500 \text{ deg C}$.

Известно, что любое тело излучает ИК свет, спектральное распределение которого зависит от абсолютной температуры тела T . Интегральная интенсивность теплового излучения Φ пропорциональна четвертой степени этой температуры (закон теплового излучения Стефана-Больцмана):

$$\Phi = \sigma T^4 \quad (11.1)$$

где $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Чем выше температура тела, тем при меньшей длине волны лежит максимум спектрального распределения. В соответствии с законом смещения Вина эта длина волны обратно пропорциональна абсолютной температуре тела:

$$\lambda_{\text{макс}} = B/T \quad (11.2)$$

где $B = 2,9 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина. Максимум спектрального распределения теплового излучения тел с температурой -50 degC лежит при длине волны $\lambda_{\text{макс}} = 13 \text{ мкм}$, а тел с температурой $+500 \text{ deg C}$ – при $\lambda_{\text{макс}} = 3,75 \text{ мкм}$

Поскольку тела вокруг нас имеют разную температуру, то в инфракрасном свете создается своеобразная "картина" теплового излучения окружающих тел. Чувствительные к этому свету матрицы способны уловить разность температур в десятые и даже в тысячные доли градуса.

Инфракрасный свет значительно меньше, чем видимый, рассеивается, например, в тумане, в задымленном, запыленном воздухе, во время дождя, снегопада. Поэтому при таких условиях тепловизор позволяет "видеть" значительно дальше.

11.4.2. Примеры цифровых тепловизоров

На рис. 11.10 показан внешний вид (с двух сторон)

"профессиональной" ИК видеокамеры FLIR ThermaCAM P640. Ее размеры 120x145x220 мм, масса 1,7 кг (вместе с объективом и батареей аккумуляторов питания).



Рис. 11.10. Профессиональная ИК видеокамера FLIR ThermoCAM R640: слева – вид со стороны объектива в закрытом виде; справа – вид с противоположной стороны с раскрытым ЖК дисплеем

Высококачественные сменные объективы таких камер – телеобъектив и широкоугольный объектив, объектив ближнего фокуса – изготовлены из материалов, прозрачных в ИК области спектра, например, из плавленного кварца, сапфира, германия. Последний в видимом свете выглядит как металл, но, как это ни покажется парадоксальным, в ИК области спектра он является довольно прозрачным. Минимальное расстояние съемки этой камерой с объективом ближнего фокуса составляет 30 см, разрешающая способность – 2 угловых минуты.

Чувствительная к ИК свету матрица имеет 640x480 пикселей, работает в диапазоне длин волн от 7,5 мкм до 13 мкм и обеспечивает температурную чувствительность 0,08 deg C при 30 deg C. Встроенный микропроцессор с пакетом микропрограмм не только организует считывание и обработку информации от матрицы с частотой 30 кадров/с, ее занесение и хранение в картах памяти объёмом до 2 Гб или передачу в канал связи. Он обеспечивает также наглядное воспроизведение полученного ИК изображения на встроенном цветном дисплее с размером диагонали 142 мм (1024x800 пикселей). На этот же дисплей выводится меню для управления режимами работы прибора. Пользователь может указать на поле наблюдения до 10 точек. И микропроцессор по интенсивности теплового излучения из каждой такой точки автоматически рассчитает температуру соответствующего объекта с точностью 1 deg C. Диапазон определяемых температур может быть от -40 deg C до +500 deg C и даже до +2000 deg C. При этом учитываются: расстояние до объекта, температура и влажность воздуха, температура оптики и промежуточного, прозрачного для ИК

излучения, защитного окна, если оно есть между объектом и объективом. Может быть учтен реальный коэффициент теплового излучения, если пользователь задает его или указывает материал, из которого сделан объект. Микропроцессор автоматически находит в поле зрения точки с максимальной и с минимальной температурами, и все эти значения температуры выводит на дисплей. По указанию пользователя могут быть рассчитаны и выведены на дисплей средние значения температуры в выделенном круге или квадрате, изотермические кривые, профиль температуры в заданном направлении. Процессор может автоматически сигнализировать о том, что температура в каких-то точках пересекает заданную верхнюю или нижнюю границу. Значения температуры могут выводиться в удобных для пользователя единицах (градусах Цельсия, Кельвина, Фаренгейта и т.п.). Автоматически фиксируются дата и время съемки.

Само собой разумеется, что инфракрасное изображение на дисплее тепловизора формируется как видимое. При преобразовании ИК изображения в видимое возможно использование разных "палитр". В черно-белой палитре каждая точка изображения выглядит тем светлей, чем выше температура соответствующей точки объекта. В палитре цветов накаливания наиболее холодные места выделяются черным или темно-фиолетовым цветом, места с более высокой температурой – вишневым, красным, оранжевым, желтым цветом по мере повышения температуры, наиболее "горячие" места (с наиболее высокой температурой) – белым цветом. Можно применять и другие специальные палитры, указанные пользователем.

Встроенный микрофон позволяет вводить в память вместе с тепловой видеоинформацией голосовой комментарий к ней продолжительностью до 30 с или письменный комментарий, – выбираемый из списка. Встроенный AlGaIn лазерный светодиод, излучающий красный свет с длиной волны 635 нм с очень малым угловым расхождением, можно использовать как дистанционную указку. Прибор автоматически ориентирует изображение так, чтобы образованное этой указкой на объекте красное пятнышко находилось в левом нижнем углу кадра.

На рис. 11.11 показан внешний вид некоторых портативных тепловизоров, работающих в диапазоне длин волн от 8 мкм до 14 мкм. Они измеряют температуры теплового излучения от -20 deg C до $+600 \text{ deg C}$ с точностью 2% от соответствующей абсолютной температуры и

обеспечивают температурную чувствительность лучше 0,1 К. Они имеют встроенный жидкокристаллический цветной дисплей размером 12,7 см по диагонали, на который, кроме изображения, выводятся значения температуры в заданных точках, термограммы (по указанию пользователя), температурная шкала, меню пользователя. Имеется и встроенная лазерная "указка", и память на 1000 ИК фотоснимков и термограмм.

HOT SHOT		FLUKE
LT	XL	Ti40/45 // Ti50/55
		
160x120	160x120	320 x 240

Рис. 11.11. Внешний вид некоторых портативных цифровых тепловизоров

На рис. 11.12 показана еще одна компактная тепловизионная камера массой лишь 550 г, размером 243x81x103 мм.



Рис. 11.12. Тепловизионная цифровая видеокамера InfraCAM фирмы FLIR

11.4.3. Применения цифровых тепловизоров

Область применения тепловизоров довольно широка. В жилищно-коммунальном хозяйстве они служат в качестве эффективного средства выявления тепловых пороков жилищ и внедрения энергосберегающих технологий. С помощью тепловизора легко выявляются, например, недоработки в теплоизоляции при приёмке в эксплуатацию новых домов и самые главные недостатки уже эксплуатируемых домов при разработке планов улучшения их теплоизоляции и герметичности.

Для иллюстрации на рис. 11.13, а приведен ИК снимок зоны стыка между горизонтальной панелью потолка (слева вверху) и вертикальной панелью стены с оконным проемом (внизу). Вдоль линии стыка между панелями видна темная полоса. Самая холодная точка в ней, помеченная крестиком, имеет температуру $14,9 \text{ deg C}$, показанную в верхнем левом углу кадра. Эта недоделка строителей должна быть ликвидирована путем надлежащей дополнительной герметизации и теплоизоляции зоны стыка.

На рис. 11.13, б приведен ИК снимок окна с плохой тепловой изоляцией в уже эксплуатируемом доме. Светлые полосы над верхним краем окна и под правой частью нижнего края окна указывают на недопустимые утечки тепла.

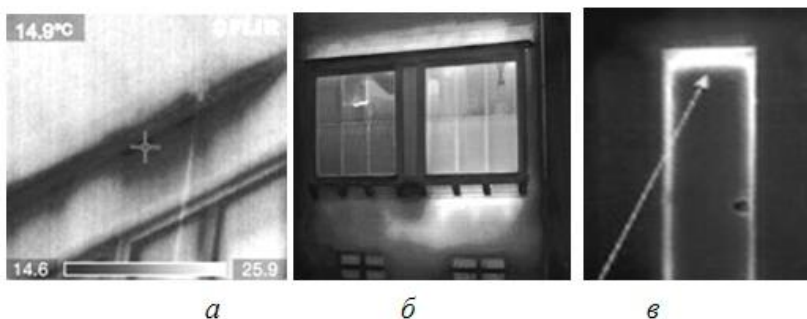


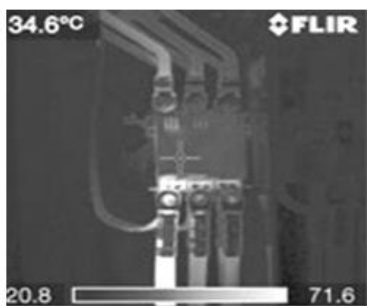
Рис. 11.13. Примеры ИК снимков элементов зданий, наглядно демонстрирующих недостатки в теплоизоляции жилищ: а) на стыке панелей потолка и стены с окном; б) в конструкции окна; в) в конструкции двери

На рис. 11.13, *в* видно места утечки тепла через неплотно прилегающую дверь, особенно в её верхней части.

С помощью тепловизора можно быстро оценить состояние теплоизоляции теплотрасс – как открытых, так и подземных, выявить места утечки горячей воды или пара. Даже очень осторожные оценки показывают, что эффективная проверка теплоизоляции и уплотнений теплотрасс и домов с помощью интеллектуальных тепловизионных сенсоров могут привести к снижению коммунальных энергозатрат минимум на 10%.

Тепловизоры могут помочь в своевременном выявлении источников электроопасности как в быту, так и в промышленности. Для иллюстрации на рис. 11.14, *а* показано ИК изображение электросчетчика, на котором четко выделяются недопустимо перегруженный нижний левый контакт и шина с током, температура которых достигает уже 70 deg C.

На рис. 11.14, *б* на ИК изображении верхней части левого высоковольтного трансформатора яркое белое пятно указывает на угрожающий дефект высоковольтного изолятора. Такие дефекты могут уже вскоре привести к обесточиванию линии или даже к возникновению пожара.



а



б

Рис. 11.14. Примеры ИК снимков электрооборудования, которые обнаруживают источники электроопасности: а) ИК снимок электросчетчика; б) ИК снимок верхней части высоковольтных трансформаторов

Тепловизоры уже становятся действенным средством охраны государственных, бизнесовых, промышленных, культурных объектов, транспортных, энергетических и санитарных инфраструктур. Уникальными особенностями этой техники являются возможность ее применения при любых погодных условиях (туман, дождь, снегопад, задымленность), а также полная скрытность, – ведь эти камеры, если они ведут только пассивное наблюдение, никак себя не обнаруживают.

На рис. 11.15, *а* показано ИК изображение группы людей, полученное в условиях полной темноты и густого тумана благодаря тепловому излучению их тел.

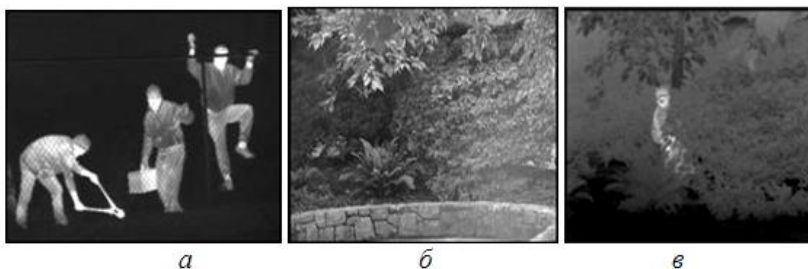


Рис. 11.15. Примеры ИК снимков людей: а) в полной темноте в условиях тумана; б) снимок днем обычной видеокамерой; в) ИК снимок того же сюжета (расстояние примерно 150 м)

На рис. 11.15, *б* показано изображение участка, на котором за деревом и кустами спрятался посторонний человек-наблюдатель. Изображение получено от обычной видеокамеры. Благодаря умелой маскировке увидеть этого человека в видимом свете практически невозможно. На рис. 11.15, *в* показано изображение того же участка в ИК свете. Тепловое излучение тела человека позволяет здесь четко увидеть присутствие постороннего, который ведет скрытое наблюдение за охраняемой зоной. Расстояние, на котором тепловизоры позволяют выявить присутствие посторонних, составляет от 200 м до 600 м.

Для охраны больших территорий – аэропортов, запретных зон, заповедников, морских портов, сухопутных и морских границ, нефтегазовых месторождений, терминалов, АЭС и т.п. – разработаны мощные тепловизионные сенсоры типа показанного на рис. 11.16.

Расстояние, на котором они позволяют контролировать ситуацию, достигает 25 км.



Рис. 11.16. Интеллектуальный комбинированный сенсор видеонаблюдения ThermoVision

В состав такого сенсора входит как высококлассная видеокамера, которая работает в видимом свете с возможностью оптического увеличения до 25 раз, так и видеокамера, чувствительная к ИК излучению разных длин волны в "окнах прозрачности" атмосферы. В сенсор встроены точный лазерный измеритель расстояний и углов с двусторонней радиосвязью с автономными контрольными устройствами. Сенсор установлен на прецизионной поворотной платформе, которая по командам микропроцессора точно ориентирует его на заданные азимут и угол наклона к горизонту. Такой сенсор способен держать под непрерывным визуальным контролем в любую погоду, днем и ночью территорию диаметром до 50 км. Через надежные каналы связи он обменивается информацией со всей системой охраны. Сенсор легко обнаруживает появление в зоне контроля источников теплового излучения, открытого огня, отслеживает движение транспортных средств, людей и теплокровных животных.

11.5. Дактилоскопические сенсоры

11.5.1. Принципы дактилоскопии

Еще одним относительно новым видом интеллектуальных электрических сенсоров являются дактилоскопические сенсоры. Известно, что пальцы человека имеют уникальный папиллярный узор,

неизменный на протяжении всей жизни. Вероятность его повторения у другого человека меньше, чем 10^{-9} . Он является разным даже у однойцовых близнецов с одинаковым набором хромосом и потому давно уже стал своеобразным "удостоверением" для идентификации личности. Вероятность повторения у другого человека папиллярных узоров одновременно двух соседних пальцев уже меньше 10^{-18} .

В раскопках дохристианских времен в Китае, Вавилоне, Ассирии найдены глиняные печати владык и членов правительства, на которых зафиксированы отпечатки пальцев. В старинных рукописях говорится о том, что такие отпечатки воспринимались как удостоверение личности или как собственноручная подпись человека, а также о том, что китайские матери выучивали, прекрасно знали и могли уверенно опознавать отпечатки пальцев своих детей.

Папиллярный узор формируется из небольших (высотой 0,1-0,4 мм, шириной 0,2-0,7 мм) выступов кожи и мини-каналов между ними шириной 0,1-0,3 мм. На рис. 11.17, *а, б, в* показаны три основных типа папиллярных узоров – дуговые, петлевые, завитковые. За сотни лет развития дактилоскопии они хорошо детализированы, классифицированы; разработаны методы их индивидуализации и идентификации. Типы папиллярного узора – это т.н. "детали 1-го уровня". Для более точной идентификации рассматривают и проверяют как минимум еще детали 2-го и 3-го уровня. "Детали 2-го уровня" – это виды окончаний папиллярных линий, их разветвлений, соединений, сечений, зарубцеваний и т.п. (рис. 11.17, *г*).

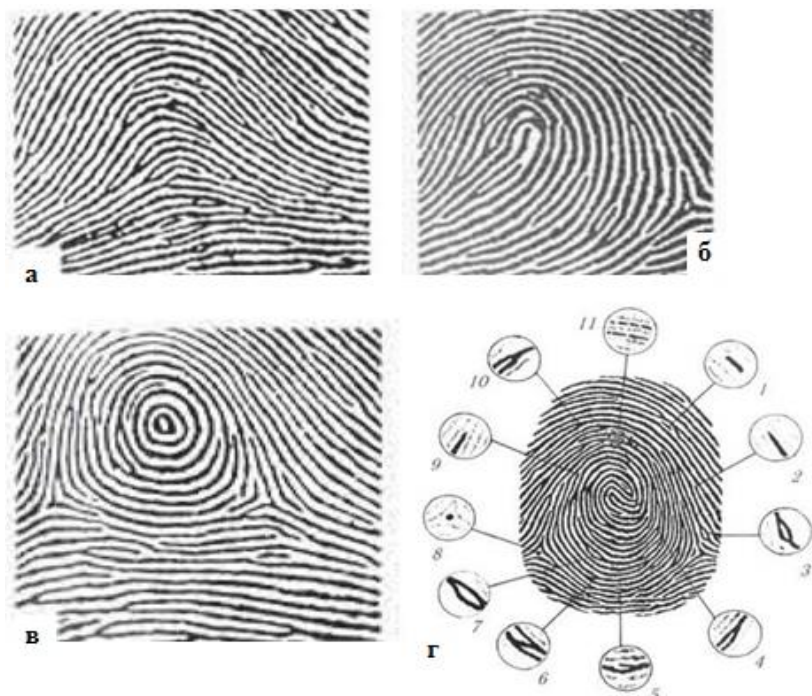


Рис. 11.17. Основные типы папиллярных узоров

На одном пальце насчитывают порядка 100 таких деталей. Детали 3-го уровня – это детали каждой отдельной папиллярной линии: ее изгибы, сужения и расширения, отклонения от периодичности, различия между выступами и т.д. Выявляются и фиксируются еще много более мелких деталей: выходы потовых желез, микроскопические дыхательные поры в коже и т.п.

11.5.2. Интеллектуальные дактилоскопические сенсоры

С развитием вычислительной техники были разработаны детальные алгоритмы и компьютерные программы идентификации отпечатков пальцев. Созданы специализированные компьютерные сканеры отпечатков пальцев и методы представления их в цифровом виде. Но в течение длительного времени для обработки получаемой информации требовались слишком большие вычислительные ресурсы и применение

дорогих сверхбыстродействующих компьютеров. Однако бурное развитие технологии, математики и информатики привело к тому, что стало возможным создание компактных интеллектуальных тактильных сенсоров. Иногда их называют также "биометрическими". Чувствительным узлом таких сенсоров является узел сканирования, в котором папиллярному узору одного, двух или нескольких пальцев ставится в соответствие последовательность электрических сигналов. Наиболее распространены сейчас емкостные, потенциальные, тепловые и фоточувствительные сканеры.

Принцип действия емкостных сканеров объясняет рис. 11.18. Поперек рядов плоских микроэлектродов 1 надо провести два-три пальца своих рук (рис. 11.18, а). На рис. 11.18, б эта ситуация показана в вертикальном сечении при значительном увеличении. Емкость между парой близких микроэлектродов в том случае, когда над ней находится выступ кожи, оказывается значительно больше, чем в случае, когда над ней находится канавка. Поэтому, измеряя емкость или переменный ток, который течет через соответствующую пару микроэлектродов, можно однозначно определить, какой элемент папиллярного узора находится в данный момент над ней.

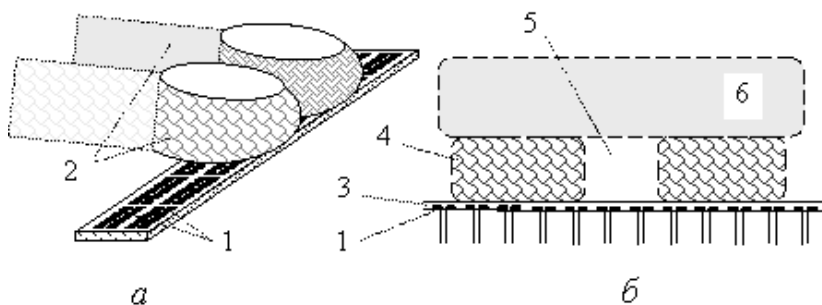


Рис. 11.18. Принцип действия емкостного узла сканирования: а) 1 – линейки из пар микроэлектродов; 2 – пальцы, которые протягивают над ними; б) 1 – пара микроэлектродов, 3 – тонкий слой изолятора, 4 – выступ кожи, 5 – канавка между выступами, 6 – основная толщина пальца

Действие потенциальных сканеров основано на том, что из-за рельефа кожи электрические потенциалы ее выступов и канавок несколько отличаются. Чтобы выявить и зафиксировать это различие используют одну или несколько линеек МДП транзисторов. В предыдущей лекции

было показано, что ток через такой транзистор существенно зависит от потенциала на его затворе. А этот потенциал изменяется при переходах от выступов к канавкам и обратно. Когда один, два или три пальца скользят над линейками МДП транзисторов, то ток через каждый из них зависит от того, какая деталь папиллярного узора находится в данный момент над ним, – выступ или канавка. На 0,1 мм узора может приходиться от 2 до 10 чувствительных к потенциалу МДП транзисторов. На том же кристалле с использованием КМДП технологии формируют схемы считывания, фильтрации, предварительной обработки сигналов и их запоминания.

В *тепловых сканерах* используется тот факт, что тепловое излучение от канавок и впадин кожи несколько отличается. И это отличие "улавливают" ряды элементов, чувствительных к тепловому излучению, над которыми скользят пальцы.

В *фоточувствительных сканерах* увеличенное изображение папиллярного узора оптически проецируется с увеличением на линейку или матрицу фотоприемников, которые превращают его в последовательность электрических сигналов.

Микропроцессор, входящий в состав дактилоскопического сенсора, не только организует считывание и фильтрацию информации о папиллярном узоре пальцев, но и обрабатывает ее, приводит к стандартной форме. Он же осуществляет сравнение с образцами типовых узоров, хранящихся в его долговременной памяти, и по заданным критериям решает, каким образцам соответствуют исследуемые пальцы. Т.е. он автоматически выполняет ту сложную работу, которую в течение предыдущих столетий могли выполнить лишь высококвалифицированные эксперты.

11.5.3. Применения интеллектуальных дактилоскопических сенсоров

Дактилоскопические сенсоры нашли целый ряд применений. Компания Sharp, например, применила биометрический сенсор AT77C101B FingerChip TM в своем мобильном планшетном персональном компьютере Sharp Mebius Muramasa PC-TN1-H1W *для контроля доступа*. Контроль этот основан на оперативной проверке отпечатков пальцев пользователя. Компания считает, что биометрический сенсор "обеспечивает пользователю высокий уровень защиты частной,

бизнесовой и другой закрытой информации, невозможность несанкционированного использования компьютера при сохранении удобства". Для доступа к операционной системе и к базе данных зарегистрированному пользователю достаточно провести пальцем по сенсору AT77C101B FingerChip ТМ. В этом сенсоре применяется тепловой сканер размером 26,6x9,8x1,5 мм, изготовленный с использованием КМОП технологии с разрешающей способностью 20 точек/мм. Утверждается, что "тепловая технология" хорошо работает даже при таких неблагоприятных условиях, как повышенная влажность, загрязненность, жир на пальцах, жара или мороз. Компания CardMedia выпустила на рынок флеш-брелки StoreGuard емкостью 128, 256, 512 Мб и 1 Гб со встроенным дактилоскопическим сенсором, который открывает доступ к записанной информации лишь хозяину после анализа папиллярного узора его пальцев. Время проверки составляет около 0,25 с. Дактилоскопически защищенные флеш-устройства памяти выпускают и предлагают также другие производители. Компания Microsoft, чтобы освободить пользователя от необходимости запоминать и держать в своей памяти много логинов и паролей для доступа к разным компьютерным и Интернет ресурсам, применила так называемое "устройство биометрической идентификации" MS Fingerprint Reader. Это – тоже специализированный интеллектуальный дактилоскопический сенсор, который после анализа папиллярного узора пальцев автоматически вводит необходимые в конкретной ситуации логин и пароль. Чувствительный сканер сенсора встраивается в клавиатуру компьютера или в "мышку" (рис. 11.19). Устройство MS Fingerprint Reader имеет возможность регистрировать и обслуживать не одного, а нескольких пользователей офисного компьютера.



Рис. 11.19. Компьютерные "мышки" со встроенным чувствительным сканером дактилоскопического сенсора

Компактные сканеры для дактилоскопических сенсоров выпускают японская компания Fujitsu (емкостный сенсор MBF300, 20 точек/мм), американская компания AuthenTec (светочувствительный сенсор EntrePad площадью лишь 6,5 мм²), компании Precise Biometrics, Applied Biometrics Products, Mytec и прочие. Эти компактные сканеры предназначены для применений с целью идентификации хозяина в фирменных мобильных телефонах, органайзерах, ноутбуках и в других важных мобильных устройствах.

Компания BioLink Technologies разработала и предлагает интеллектуальный сенсор контроля доступа BioLink OBE Module DDK (On-Board Extraction Module Design Development Kit). В нем используется оптическое устройство с площадью сканирования 24x16 мм и ПЗС матрица. В памяти сенсора могут храниться образцы отпечатков пальцев до 150 разных лиц. Такие сенсоры могут устанавливаться на входе в помещение или на территорию, куда разрешен доступ лишь точно определенным лицам, и выполнять функции неподкупного электронного сторожа или контролера-учетчика рабочего времени. Их уже устанавливают как основное средство защиты от несанкционированного доступа на некоторые модели сейфов, банковские депозитарные ячейки, на банкоматы и кассовые терминалы, на дверцы энергетических щитов, узлов информационных соединений, автомобилей и т.д.

Ради истины надо отметить, что уже несколькими исследователями продемонстрирована возможность обмана дактилоскопических сенсоров. Для этого следует раздобыть отпечатки нужных пальцев, оставленные доверенным лицом на какой-нибудь поверхности. Затем, воспользовавшись этим образцом, надо изготовить из пластика и желатина искусственный палец с нужным папиллярным узором. Тщательно изготовленные с применением микросистемной технологии искусственный "палец" или желатиновая накладка на свой палец, как оказалось, способны обмануть от 70% до 95% дактилоскопических сенсоров.

Но ради той же истины надо сказать, что, зная принцип действия, механизм принятия решений, можно обмануть и любые другие сенсоры, живые существа и даже человека. Было продемонстрировано, например, что с помощью маски доверенного лица, соответствующей одежды, грима можно обмануть как автоматическую систему видеонаблюдения, так и опытного человека-сторожа. Тепловизору

можно представить, например, искусственный тепловой портрет лося, за которым будет прятаться человек. Тем не менее, это отнюдь не приуменьшает достижения в создании интеллектуальных сенсоров, а лишь нацеливает на их дальнейшее усовершенствование.

Краткие итоги

Уже широко известными интеллектуальными электрическими сенсорами являются цифровые фотоаппараты. Изображение снимаемого объекта с помощью светочувствительной ПЗС или КМДП матрицы и встроенного микропроцессора преобразуется в цифровую форму, запоминается, по желанию пользователя перезаписывается на внешний компьютер, где может быть воспроизведено на мониторе или распечатано на цветном принтере. Микропроцессор может обеспечивать также автоматическое регулирование диафрагмы и экспозиции, включение дополнительных источников света в случае недостаточной освещенности, автоматическую наводку на резкость, корректирование полученного изображения и другие сервисные функции.

Еще одним чудом современной техники является такой вид интеллектуальных электрических сенсоров, как видеокамеры – сенсоры для восприятия динамически изменяющихся изображений, для преобразования их в последовательности видеосигналов с целью последующего хранения, передачи, обработки и воспроизведения на экране. Поскольку изменения визуальных картин могут происходить очень быстро, то задачи, которые надо здесь решать, значительно сложнее, чем в случае цифровых фотоаппаратов. В видеокамере на экспозицию одного кадра отводится не больше 20 мс, а желательно и значительно меньше. Поэтому светочувствительность матриц должна быть здесь значительно выше, а считывание и обработка полученных сигналов должны производиться значительно быстрее. Требуется и значительно больший объем встроенной памяти (гигабайты).

Всё более широкое применение находят и такие интеллектуальные электрические сенсоры, как камеры видеонаблюдения. Промышленно выпускаются и применяются сотни типов таких камер, отличающихся своим назначением, конструктивным исполнением, размерами и техническими возможностями. "Уличные" камеры видеонаблюдения рассчитаны на работу в широком диапазоне климатических условий: в жару и в мороз, при 100%-й влажности, в яркий солнечный день и в

ночное время. Они защищены от ливней и обледенений, зачастую и от вандализма. Для работы в ночное время часто используют встроенную подсветку просматриваемой зоны пространства. Для подсветки применяют светодиоды, излучающие свет в ближней ИК области спектра, которую прекрасно чувствуют кремниевые фотодиоды. Это называют "ИК подсветкой".

Современная технология позволила создать миниатюрные камеры видеонаблюдения, которые легко встраиваются в предметы интерьера, оставаясь малозаметными, а то и практически незаметными.

Сетевые видеокамеры (IP видеокамеры, веб-камеры), способные не только фиксировать видеоизображение, но и посылать его по локальным сетям, беспроводным сетям Wi-Fi или даже на любые расстояния по сети Интернет, сделали возможным т.н. "IP видеонаблюдение". Передаваемое изображение можно просмотреть на любом устройстве, имеющем доступ в Интернет или в соответствующую локальную сеть, находясь даже на другом континенте. Для этого надо через соответствующую сеть соединиться с видеокамерой по её индивидуальному сетевому электронному адресу. Если связь двусторонняя, то камерой зачастую можно и управлять: поворачивать в нужном направлении, менять оптическое увеличение и т.д.

Эпитаксиальные пленки из "узкозонных" полупроводников (чаще всего кадмий–ртуть–теллур) позволили формировать матрицы, воспринимающие ИК свет в "окнах прозрачности" атмосферы, в том числе и чисто тепловое излучение объектов с температурой от -50 deg C до $+500 \text{ deg C}$. С их применением созданы цифровые тепловизоры, формирующие на встроенном цветном дисплее наглядные изображения тепловой картины зоны наблюдения с указанием температуры соответствующих объектов, изотермические кривые, профиль температуры в заданном направлении. Тепловизор может автоматически сигнализировать о том, что температура в каких-то точках пересекает заданную верхнюю или нижнюю границу и т.д. В жилищно-коммунальном хозяйстве тепловизоры являются эффективным средством выявления тепловых пороков жилищ и внедрения энергосберегающих технологий. Они помогают своевременно выявить источники опасности как в бытовых, так и в промышленных электросетях, даже в скрытой электропроводке, стали действенным средством охраны государственных, промышленных,

культурных, частных объектов, транспортных, энергетических и санитарных инфраструктур.

Электрические сенсоры сделали возможным создание компактных интеллектуальных дактилоскопических устройств. Чувствительным узлом таких сенсоров является узел сканирования, в котором папиллярному узору одного, двух и более пальцев ставится в соответствие последовательность электрических сигналов. Сейчас применяют емкостные, потенциальные, тепловые и фоточувствительные сканеры. Дактилоскопические сенсоры нашли целый ряд применений для контроля доступа на охраняемые объекты, к сейфам, банковским депозитарным ячейкам, банкоматам и кассовым терминалам, энергетическим щитам, узлам информационных соединений, к автомобилям, к разным компьютерным и Интернет ресурсам и т.д.

12. Магнитные сенсоры. Сенсоры на сквидах. Индуктивные сенсоры

12.1. Необходимые сведения из физики

К классу **электромагнитных** мы относим сенсоры, в которых первичные сигналы об исследуемом объекте или явлении возникают в виде изменения магнитного поля или в виде сигналов электромагнитной индукции, и именно эти изменения или сигналы воспринимаются, анализируются и используются для получения информации.

Напомним коротко физическую суть лишь тех известных понятий, которые будут использованы в данном разделе.

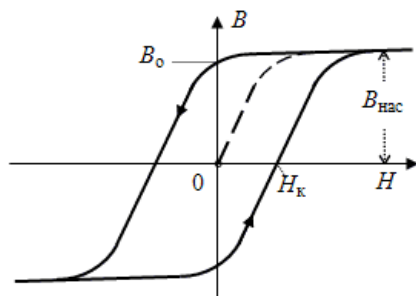
Магнитное поле – это силовое поле, которое действует на физические тела, имеющие собственный магнитный момент, на подвижные электрические заряды и на проводники с током. Магнитное поле в каждой его точке характеризуют вектором магнитной индукции B , величину которого выражают в системе СИ в "теслах" ($Tл$). Из-за того, что атомы, ионы и электроны, из которых составлено вещество, имеют собственные магнитные моменты, то при взаимодействии с магнитным полем они стремятся повернуться в направлении этого поля и, как правило, усиливают его. Коэффициент усиления

магнитного поля в веществе называют "магнитной проницаемостью вещества". Она является безразмерной величиной и обычно обозначается греческой буквой μ .

Ряд веществ, которые называют "ферромагнетиками", имеют большую магнитную проницаемость ($\mu=100$ и больше) из-за того, что магнитные моменты атомов, из которых они состояются, относительно велики. И если они имеют возможность поворачиваться в пространстве, то все спонтанно (сами по себе, поскольку это выгодно энергетически) ориентируются в одном направлении. При температурах ниже так называемой "точки Кюри" такая спонтанная намагниченность "замораживается". Образуются так называемые "домены" – области однородной намагниченности, которые под влиянием внешнего магнитного поля перемагничиваются как единое целое.

Типичная "кривая намагничивания" ферромагнитных материалов типа железа показана на рис. 12.1. Это – зависимость магнитной индукции B внутри ферромагнитного материала от напряженности H внешнего магнитного поля, создаваемого, например, внутри соленоида.

Штрихами выделена так называемая "кривая первого намагничивания". Сначала B почти линейно возрастает с увеличением H . Угол наклона этого участка тем больший, чем больше магнитная проницаемость материала μ . Однако затем скорость роста B с увеличением H уменьшается, и в конце концов магнитная индукция практически перестает зависеть от H . Это происходит потому, что при таких значениях B уже все магнитные домены сориентированы в направлении внешнего магнитного поля. Соответствующее значение $B_{\text{нас}}$ называют магнитной индукцией насыщения.



Типичная кривая перемагничивания ферромагнитных материалов:
 B_0 – остаточная магнитная индукция; $B_{нас}$ – магнитная индукция насыщения;
 H_K – коэрцитивная сила.

Рис. 12.1.

В дальнейшем ход кривой перемагничивания становится зависимым от предыстории и направления изменения внешнего магнитного поля. Когда последнее уменьшается и спадает до нуля, ферромагнитный материал остается еще намагниченным в прежнем направлении. Величину B_0 называют остаточной намагниченностью. Под действием возрастающего внешнего магнитного поля противоположного направления величина намагниченности уменьшается до нуля, а затем ферромагнетик перемагничивается уже в новом направлении. Напряженность внешнего магнитного поля H_0 , при которой индукция магнитного поля в ферромагнетике становится равной нулю, называют коэрцитивной силой. В целом кривая медленного перемагничивания ферромагнетика имеет вид симметричной относительно начала координат замкнутой линии, которую называют "петлей гистерезиса".

Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов и другие их свойства зависят не только от состава, но и от их микроструктуры, технологии обработки, температуры. Кривая гистерезиса зависит еще и от частоты перемагничивания и от характера изменения внешнего магнитного поля.

Магнитное поле тесно связано с электрическим. Источниками магнитного поля являются не только объекты с собственным магнитным моментом, но и движущиеся электрические заряды, и электрический ток.

Переменное магнитное поле порождает электрическое. В частности, в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, который его пронизывает, возникает электродвижущая сила (ЭДС) и протекает электрический ток. Это явление называют электромагнитной индукцией. Направление индукционного тока таково, что создаваемое им магнитное поле противодействует изменению магнитного потока сквозь площадь контура.

Из-за тесной связи магнитного поля с электрическим их рассматривают как единое "электромагнитное" поле, поведение которого в классическом приближении описывается известными уравнениями Максвелла.

В магнитных сенсорах часто используют уже упомянутый выше соленоид – свёрнутый в спираль проводник, через который протекает электрический ток (рис. 12.2). Магнитное поле, которое создается внутри соленоида с током, является практически однородным, а векторы магнитной индукции направлены параллельно оси. Магнитная индукция пропорциональна силе тока и числу витков. Извне соленоида конфигурация магнитного поля подобна конфигурации поля постоянного стержневого магнита.

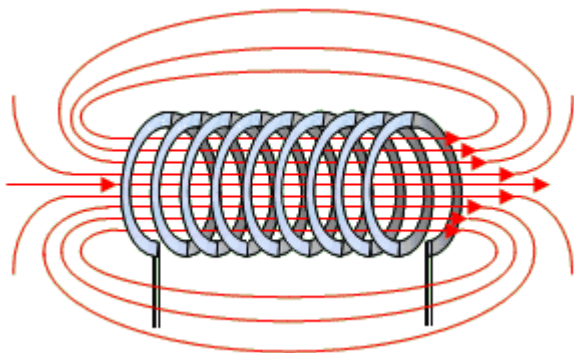


Рис. 12.2. Изображение соленоида и конфигурации его магнитного поля

Соленоид с размещенным внутри него ферромагнитным сердечником становится электромагнитом, сила притяжения которого пропорциональна силе тока.

Если электрический ток через соленоид быстро изменяется, то быстро изменяется и магнитный поток, который его пронизывает. Поэтому в соленоиде возникает дополнительная ЭДС ("ЭДС самоиндукции"), пропорциональная скорости изменения тока. Коэффициент пропорциональности называют индуктивностью, а сам соленоид – "катушкой индуктивности". Индуктивность соленоида довольно велика и пропорциональна числу витков в нем. ЭДС самоиндукции направлена так, что противодействует изменению тока в катушке. И этим явление самоиндукции подобно явлению инерции в механике. Из-за этого в цепях переменного электрического тока сила тока в катушке индуктивности отстает от изменений напряжения на четверть периода.

Если две катушки индуктивности пронизывает общий магнитный поток, то образуется "трансформатор". Изменение тока в одной из катушек приводит к возникновению ЭДС индукции в другой катушке – и тем большей, чем больше в ней число витков. Катушки могут быть гальванически развязаны (электрически изолированы одна от другой), а передача электроэнергии между ними происходит через общее переменное магнитное поле. Чтобы уменьшить потери энергии, обусловленные рассеянием магнитного поля (т.е. тем, что некоторая часть магнитных силовых линий проходит мимо другой катушки), катушки индуктивности в трансформаторах соединяют замкнутым магнитным сердечником – "магнитопроводом", в котором и сосредоточены практически все силовые линии (весь магнитный поток).

Если катушку индуктивности электрически соединить с конденсатором, то образуется электрический колебательный контур, в котором могут происходить свободные электромагнитные колебания. Во время таких колебаний энергия, накопленная в конденсаторе в виде энергии электрического поля, периодически перекачивается в энергию магнитного поля тока в катушке индуктивности, а потом – наоборот. Такой контур может играть роль эффективного частотного фильтра, который "откликается" в основном на электромагнитные колебания с "резонансной" частотой, т.е. с частотой собственных колебаний контура. Это широко используют в электротехнике и радиотехнике, в том числе и при построении сенсоров.

Если электрические силовые линии внутри конденсатора или магнитные силовые линии внутри соленоида не замыкаются, а выходят наружу, то часть энергии колебаний излучается в пространство в виде

"электромагнитных волн". Последние со скоростью света могут распространяться в пространстве на очень большие расстояния. Напомним, что между скоростью распространения c , частотой f и длиной волны λ электромагнитных волн существует известное соотношение:

$$c = \lambda f \quad (12.1)$$

В зависимости от частоты колебаний электромагнитные волны называют радиоволнами (при частотах $10^3 \dots 10^{12}$ Гц), инфракрасным излучением (при частотах $10^{12} \dots 3,75 \times 10^{14}$ Гц), видимым светом (при частотах $3,8 \dots 7,5 \times 10^{14}$ Гц), ультрафиолетовым (при частотах $7,5 \times 10^{14} \dots 10^{16}$ Гц), рентгеновским (при частотах $10^{16} \dots 10^{20}$ Гц) и гамма-излучением (при частотах $> 10^{20}$ Гц).

Радиоволны, в свою очередь, разделяют по длине волны на диапазоны:

- длинных волн (ДВ, длина волны 1...10 км, соответственно частота 300...30 кГц);
- средних волн (СВ, длина волны 100...1000 м, частота 3...0,3 МГц);
- коротких волн (КВ, длина волны 10...100 м, частота 30...3 МГц);
- ультракоротких или метровых волн (УКВ, длина волны 1...10 м, частота 300...30 МГц, англ. VHF - Very High Frequency);
- дециметровых волн (англ. UHF - Ultra High Frequency, длина волны 1...10 дм, частота 3000...300 МГц);
- сантиметровых волн (длина волны 1...10 см, частота 30...3 ГГц);
- миллиметровых волн (длина волны 1...10 мм, частота 300...30 ГГц).

Характер распространения радиоволн в атмосфере Земли существенно зависит от диапазона. Если длинные и средние волны легко огибают поверхность Земли и поэтому принимаются радиоприемниками практически в любой точке земного шара, то распространение коротких и особенно ультракоротких волн существенно зависит от состояния тропосферы. Дециметровые и сантиметровые волны принимаются в основном лишь в пределах прямой видимости.

12.2. Магнитные сенсоры

12.2.1. Магнитодиагностические сенсоры

Уже в 20-х годах XX века начали использовать **магнитодиагностику** железных, стальных, чугунных и других изделий из ферромагнитных материалов. Дело в том, что как механические, так и магнитные свойства этих материалов прямо определяются их микроструктурой. Поэтому, измеряя их магнитные свойства – магнитную проницаемость, коэрцитивную силу, магнитную индукцию насыщения и т.д., – можно контролировать соблюдение технологических режимов их изготовления, микроструктуру и механические свойства.

Функциональная схема одного из возможных интеллектуальных магнитных сенсоров для такого контроля показана на рис. 12.3.

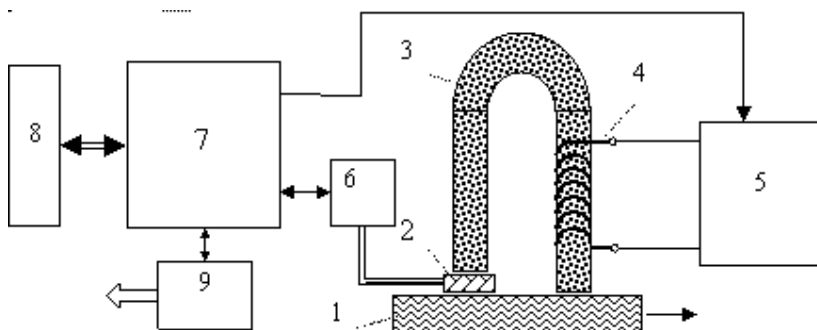


Рис. 12.3. Функциональная схема интеллектуального сенсора для магнитного контроля качества ферромагнитных материалов: 1 – контролируемая деталь; 2 – магниточувствительный элемент; 3 – магнитопровод; 4 – соленоид; 5 – регулируемый источник тока; 6 – схема усиления и обработки сигналов; 7 – микропроцессор; 8 – блок взаимодействия с пользователем; 9 – интерфейс к внешнему компьютеру или компьютерной сети

В режиме магнитной дефектоскопии, когда надо обнаруживать невидимые дефекты изделий, связанные с нарушениями однородности материала (пустоты, трещины, посторонние включения), контролируемая деталь 1 протягивается рядом с магнитопроводом 3.

Дефекты выявляются по изменению магнитного поля в промежутке, где расположен магниточувствительный элемент 2, так как указанные дефекты сопровождаются уменьшением магнитного потока через контролируемую деталь. Магниточувствительным элементом могут быть датчики Холла или магниторезисторы, описанные в предыдущем разделе.

В режиме магнитоструктурного анализа через соленоид 4 пропускают постоянный ток, задаваемый источником 5. Величина тока программно регулируется микропроцессором 7. Индукция магнитного поля, которая измеряется чувствительным элементом 2, зависит от магнитных свойств детали 1. Сигналы от чувствительного элемента 2 усиливаются, обрабатываются электронной схемой 6 и поступают в микропроцессор 7.

Постепенно изменяя силу и направление электрического тока в соленоиде, микропроцессор может измерить и построить всю кривую гистерезиса или заданный ее участок, вычислить магнитную проницаемость и коэрцитивную силу материала детали, найти магнитную индукцию насыщения и т.п. Основываясь на этих данных, он может выдавать и определенные диагностические выводы. Блок 8 обеспечивает взаимодействие с пользователем: принимает от него команды относительно режимов работы, запросы, указания, а также выводит на экран дисплея результаты контроля и другие сообщения. Узел интерфейса 9 обеспечивает возможность обмена информацией с внешним компьютером или с компьютерной сетью.

Сенсоры для магнитодиагностики материалов описаны в литературе довольно полно, поэтому более детально мы их рассматривать не будем.

12.2.2. Магнитные считывающие головки

Известными магнитными сенсорами являются магнитные считывающие головки, которые сначала применяли в магнитофонах, а потом – для считывания данных с других магнитных носителей информации (с магнитных лент, дисков, барабанов, карточек и т.п.). Магнитные считывающие головки на своем входе всегда имеют дело с сигналами, информацией, закодированными в виде переменного магнитного поля на поверхности носителя.

В течение длительного времени в считывающих головках, как и в записывающих, применяли принцип магнитной индукции, и головки были индуктивными. Но, начиная с 90-х годов XX ст., для считывания все шире применяют *магниторезистивные головки*, которые стали меньше, чувствительнее, надёжней.

На рис. 12.4, *а* показана традиционная магнитная головка, которая и до сих пор применяется в магнитофонах, считывателях с магнитных карточек и т.п. А на рис. 12.4, *б, в* показаны изображения современной магнитной считывающей головки, созданной японской фирмой NEC на основе так называемого "экстраординарного магниторезистивного эффекта" (ЭМР) для сверхбыстрой и сверхбольшой магнитной памяти. Изображения получены при помощи сканирующего электронного микроскопа: слева – вид головки сверху, справа – вид под углом 30 deg. Размер головки, изготовленной с применением нанолитографии, – около 200 нм.

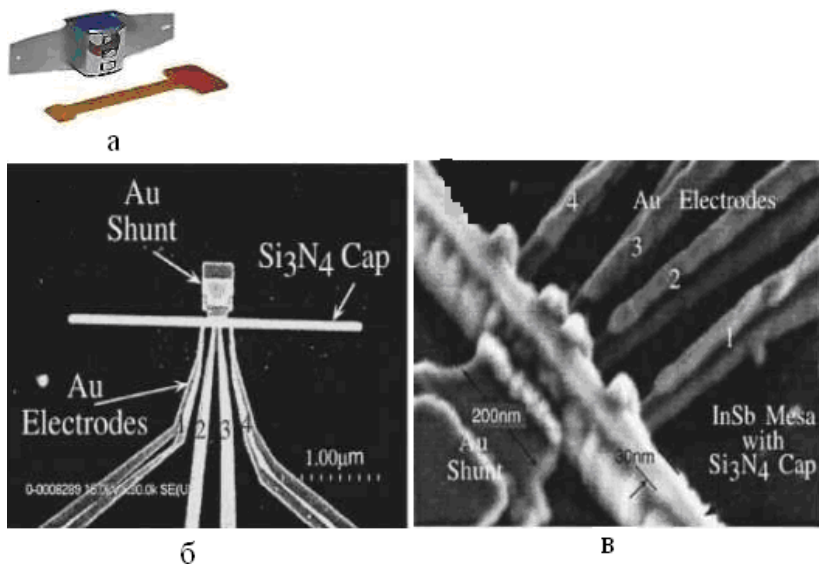


Рис. 12.4. Магнитные считывающие головки: а – традиционная индуктивная; б, в – ЭМР магнитная головка (снято в сканирующем электронном микроскопе)

Магнитное поле измеряется в головке 4-зондовым методом. На 2 зонда, контактирующих с поверхностью полупроводникового магниторезистора, подается напряжение, а с двух других снимается электрический ток. На снимках хорошо видны золотые электроды 1, 2, 3, 4, ведущие к зондам. Чувствительность головки составляет порядка 150 Ом/Тл. Она может обеспечивать считывание информации, записанной с плотностью выше 100 Гб/дюйм². Разработчики указывают на возможность достижения плотности записи даже свыше 10¹⁵ бит/дюйм².

12.2.3. Некоторые интеллектуальные магнитные сенсоры

Магнитные считывающие головки – это простые магнитные сенсоры. А функционально завершенные считывающие устройства на их основе, в которых применены микрокомпьютеры для автоматического управления процессом считывания, точным позиционированием головок на поверхности носителя, усилением сигналов, для цифровой фильтрации сигналов, для компенсации возможных ошибок считывания, форматирования считанной информации и т.д., – такие устройства являются интеллектуальными магнитными сенсорами. К этому виду интеллектуальных сенсоров можно отнести большинство устройств магнитной памяти, аудио- и видеомагнитофоны и т.п.

Другим хорошо известным примером интеллектуальных магнитных сенсоров являются устройства для считывания информации с магнитных дорожек пластиковых карточек. Один из них – считыватель МПС 1023 (размеры 150x45x43 мм, масса 180 г) – показан на [рис. 12.5](#). Для считывания информации карточку надо провести сквозь щель.



Рис. 12.5. Устройство МПС 1023 для считывания информации с магнитных дорожек пластиковых карточек в стандарте ISO

Если с подвижным объектом кинематически связать постоянный магнит так, чтобы при перемещении объекта магнит смещался относительно неподвижного магниточувствительного элемента, то его движение будет приводить к изменению магнитного поля и сигнала от этого элемента. Если подвижный объект сделан из ферромагнитного материала, то постоянный магнит может тоже быть неподвижным. Перемещение детали будет изменять конфигурацию магнитного поля и его величину в зоне магниточувствительного элемента. На этом принципе строятся сотни видов разнообразных магнитных сенсоров пространственного положения и приближения объектов, сенсоров ориентации, сенсоров перемещения, сенсоров угла поворота подвижных деталей механизмов. Среди них есть и интеллектуальные, которые, отслеживая положение и перемещение поршней, зубчаток, гидроприводов и других деталей, автоматически регулируют режимы работы так, чтобы обеспечить оптимальное функционирование сложных мощных машин, т.е. выступают как интеллектуальные сенсоры-регуляторы.

12.3. Сверхчувствительные магнитные сенсоры на сквидах

12.3.1. Сверхпроводимость, эффекты Джозефсона и сквид

Наиболее чувствительные магнитные сенсоры используют явление сверхпроводимости и т.н. "*эффекты Джозефсона*". Напомним, что при очень низких температурах, ниже т.н. критической температуры (она для каждого материала своя), ряд металлов и сплавов становятся сверхпроводящими. В сверхпроводящем состоянии они не оказывают никакого сопротивления протеканию электрического тока. Сверхпроводимость обусловлена квантовомеханическим взаимодействием между электронами с противоположно направленными "спинами" (собственными вращательными моментами). Благодаря этому взаимодействию при определенных условиях электроны объединяются в устойчивые пары, которые в честь первооткрывателя часто называют "куперовскими парами". Каждая куперовская пара ведет себя как квазичастица с нулевым спином и с электрическим зарядом вдвое больше, чем заряд одного электрона.

Для перехода в другое разрешенное энергетическое состояние им нужна значительная энергия. Поэтому спаренные электроны не могут рассеиваться на атомах, ионах, дефектах кристаллической решетки, из-за чего и пропадает электрическое сопротивление. Если плотность тока

остается ниже критической, то в замкнутом контуре из сверхпроводников электрический ток может циркулировать довольно долго при отсутствии всякой сторонней ЭДС.

Известно, что на частицы с целым спином не распространяется принцип Паули. Все они могут находиться в одном и том же квантовом состоянии, описываются общей волновой функцией, иначе говоря, являются когерентными. Макроскопическая квантовая интерференция волновых функций всех куперовских пар приводит к тому, что суммарный магнитный поток, который пронизывает контур, (он состоит из магнитного потока, обусловленного электрическим током в контуре, и потока, обусловленного внешним магнитным полем) может принимать лишь дискретные значения, кратные величине

$$\Phi_0 = h/(2e) = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Вб} \quad (12.2)$$

где h – известная постоянная Планка, e – электрический заряд электрона. Эту величину называют *квантом магнитного потока*.

Очень чувствительный к изменениям магнитного поля элемент, так называемый "*квантовый интерферометр*" или "сквид" (от англ. названия "Super-conducting Quantum Interference Device", сокращенно SQUID), представляет собой электрический контур из сверхпроводников, разделенных одним или двумя переходами Джозефсона (ПД) и Интернет-сайт <http://www.superconductors.org/>. В качестве сверхпроводников чаще всего используют ниобий и его соединения. ПД могут быть нескольких типов. Чаще всего это очень тонкий (толщиной около 2 нм) слой окисла между двумя металлическими пленочными сверхпроводниками, – переход типа SIS (сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник). Другой тип имеет структуру SNS (сверхпроводник – нормальный металл – сверхпроводник). Слой нормального металла может иметь толщину больше, чем слой изолятора – порядка 10 нм. Третий тип это т.н. "мостик" – узкая перемычка между двумя относительно широкими пленочными сверхпроводниками.

Пары связанных электронов могут проходить сквозь тонкий ПД благодаря туннельному эффекту – явлению, которое объясняет квантовая механика. Джозефсон обнаружил, что, если ток через переход не превышает некоторое критическое значение I , то сверхпроводимость не разрушается, и падение напряжения на переходе равно нулю. Вследствие макроскопической интерференции между

волновыми функциями куперовских пар с двух сторон ПД устанавливается постоянная разность фаз φ , которая и определяет величину сверхпроводящего электрического тока через ПД:

$$I = I_c \sin \varphi \quad (12.3)$$

Если величина электрического тока через ПД превышает критическое значение, то на ПД появляется не нулевое напряжение U , которое синусоидально зависит от магнитного потока, пронизывающего сквид.

Если к ПД в сверхпроводящем состоянии приложить постоянное напряжение U , то через ПД течет переменный ток с частотой, пропорциональной приложенному напряжению:

$$\omega = 2e U / \hbar \approx 483,6 \text{ (МГц/мкВ)} \cdot U \quad (12.4)$$

12.3.2. Сверхпроводящие магнитометры

Типичная функциональная схема сверхпроводящего магнитометра с использованием сквида показана на рис. 12.6, а. На нём 1 – это условное изображение сверхпроводящего квантового интерферометра (сквида).

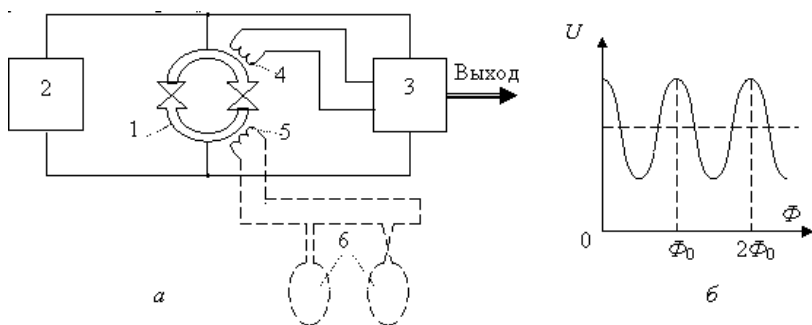


Рис. 12.6. а) Функциональная схема сверхпроводящего магнитометра: 1 – сквид, 2 – источник постоянного тока, 3 – измерительный узел, 4 – катушка обратной связи, 5 – трансформатор магнитного потока, 6 – входные рамки. б) Зависимость напряжения на сквиде от магнитного потока

Через сквид 1 от источника 2 пропускают постоянную составляющую электрического тока ("транспортный ток"). Поэтому такие магнитометры называют "магнитометрами на сквидах постоянного тока". Когда транспортный ток превышает критическое значение I , то на ПД появляется напряжение U , которое измеряет узел 3. Зависимость этого напряжения от магнитного потока, пронизывающего сквид, показана на рис. 12.6, б. Из неё видно, что, измеряя напряжение на сквиде 1 с помощью электронного узла 3, можно определять величину магнитного потока с точностью до малых долей магнитного кванта. Регулируя постоянный ток от источника 2, можно подбирать средний уровень напряжения на сквиде, а с помощью катушки подмагничивания 4, можно выбрать наиболее удобное расположение рабочей точки на шкале магнитного потока или пропорциональной ему магнитной индукции.

Используют и вариант работы, когда на катушку 4 от узла 3 подается небольшой модулированный переменный ток. Тогда напряжение на выходе сквида пульсирует с той же частотой, а амплитуда пульсаций зависит от потока магнитной индукции сквозь контур сквида. При фиксированной площади сквида это будет зависимость от проекции вектора магнитной индукции на нормаль к его плоскости.

Магнитная индукция может измеряться и в отдаленном от сквида месте с помощью входной рамки 6 и трансформатора магнитного потока 5, показанных на рис. 12.6, а штриховыми линиями. Изменения магнитного потока, который пронизывает рамку 6, приводят к соответствующему изменению тока через контур 5 и связанного с ней магнитного потока через контур сквида. Если использовать две одинаковые рядом расположенные рамки 6 и включить их в электрическую цепь трансформатора 5 навстречу одна другой, как это показано на рис. 12.6, а, то сигнал на выходе сенсора становится пропорциональным градиенту магнитного поля в месте расположения рамок 6.

Чувствительность магнитометров характеризуют минимальным изменением магнитного потока, которое можно зафиксировать, отнесенным к единичной полосе частот. Чувствительность наилучших сверхпроводящих магнитометров достигает $10^{-6} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}} \approx 2 \times 10^{-21} \text{ Вб} / \sqrt{\text{Гц}}$. Чувствительность по магнитной индукции достигает 10^{-13} Тл. И очень важно, что эта чувствительность не зависит от уровня постоянной

составляющей магнитного поля, т.е. совсем небольшие изменения можно измерять на фоне сильного постоянного магнитного поля.

Несколько меньшую чувствительность имеют *магнитометры на сквидах переменного тока*, принцип действия которых показан на рис. 12.7.

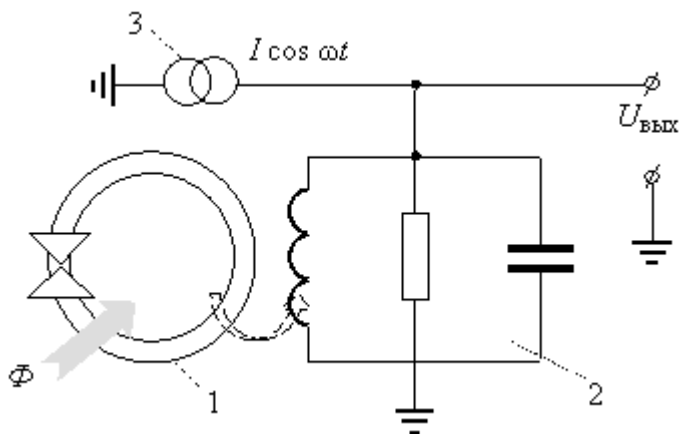


Рис. 12.7. Схема магнитометра переменного тока на сквиде: 1 – сквид с одним ПД; 2 – колебательный электромагнитный контур; 3 – генератор переменного тока

Здесь используют сквид 1 с одним ПД, возле которого размещают колебательный контур 2. Между ними возникает индуктивная связь, показанная на рис. 12.7 штриховой стрелкой. На колебательный контур от генератора 3 подают переменный ток с частотой, близкой к резонансной частоте контура. В этом случае импеданс контура 2 становится очень чувствительным к изменениям внешнего магнитного потока Φ , пронизывающего сквид. Выходным сигналом являются падения переменного напряжения на контуре.

12.3.3. Магнитокардиографический сенсор на сквидах

На базе сверхчувствительных магнитометров создан целый ряд интеллектуальных сенсоров. В "От простых сенсоров - к интеллектуальным" мы упоминали о магнитокардиографах – интеллектуальных сенсорах, позволяющих отслеживать

незначительные изменения магнитного поля, связанные с работой сердца, и делать на основе этого важные диагностические медицинские выводы. В качестве примера, опишем коротко магнитокардиографический информационно-вычислительный комплекс "Кардиомаг". Функциональная схема этого комплекса показана на рис. 12.8. Многоканальный (7 каналов) магнитометр 1 на сквидах воспринимает в четырех точках вертикальную компоненту периодических изменений магнитного поля, обусловленных работой сердца пациента, а также все три пространственные компоненты фонового магнитного поля, усиливает их и передает в электронный блок 2.

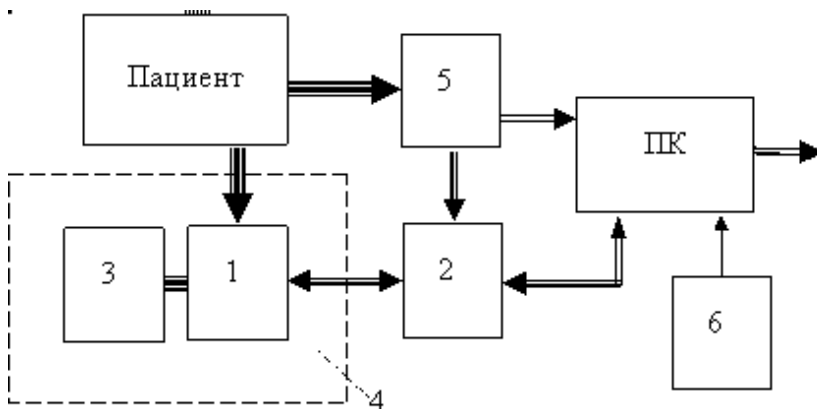


Рис. 12.8. Функциональная схема интеллектуального магнитокардиографического сенсора "Кардиомаг": 1 – многоканальный магнитометр на сквидах; 2 – электронный блок; 3 – криостат с жидким гелием; 4 – криогенный модуль; ПК – персональный компьютер; 5 – электрокардиограф; 6 – программное обеспечение

Детали работы и конструкции магнитометра описаны в. Блок 2, в состав которого входят микропроцессор и мультиплексор, руководит порядком считывания сигналов от разных сквидов, обрабатывает полученные сигналы и передает данные в виде цифровых кодов персональному компьютеру (ПК). Все сквиды находятся при температуре ниже критической. Необходимая температура поддерживается с помощью криостата 3 с жидким гелием. Одной

заправки криостата (11 л жидкого гелия) хватает для непрерывной работы магнитометра в течение пяти суток, т.е. на всю рабочую неделю.

Криостат 3 и многоканальный магнитометр 1 конструктивно объединены в криогенный модуль 4. Пациент спокойно лежит на кровати, которую можно перемещать так, чтобы точно установить сквиды в нужную позицию относительно сердца пациента. С целью получения опорных сигналов электрокардиограф 5 регистрирует стандартную электрокардиограмму. Опорные сигналы ЭКГ поступают в ПК и в электронный блок 2, где используются для определения моментов считывания магнитных сигналов, связанных с работой сердца. Электронный блок 2 автоматически компенсирует внешнее магнитное поле, контролирует уровень жидкого гелия в криостате. Он же вырабатывает стандартные сигналы, с помощью которых можно проверять работу и характеристики каждого из каналов, регулировать их.

Программное обеспечение системы состоит из двух автономных пакетов программ, работа которых разделена во времени. Первый пакет используют во время проведения измерений, а второй – после обследований всей группы пациентов – с целью дальнейшего детального анализа полученных результатов. Программные модули первого пакета обеспечивают прием информации от электронного блока 2, контроль ее качества и размещение в базе данных, цифровую фильтрацию полученных сигналов, прием и анализ ЭКГ сигналов, формирование и выдачу на экран ПК магнитокардиограмм, синхронизированных с электрокардиограммой. Они поддерживают также обратную связь с блоком 2 с целью автоматической оптимизации условий измерения в зависимости от конкретных обстоятельств и особенностей организма пациента. Они также выполняют усреднение полученных данных по нескольким последовательным сердечным циклам, обеспечивают возможность редактирования полученных данных квалифицированным специалистом, организуют работу с базой данных и т.п.

Второй программный пакет содержит модули анализа пространственно-временных изменений магнитного поля сердца, построение их изображений на экране монитора. Другие модули вычисляют ряд заданных медико-диагностических параметров, которые характеризуют динамику работы участков сердца, нарушение

сердечных ритмов и т.п. В этот пакет программ входят также модули, которые численно решают так называемую "обратную задачу" теории поля: "исходя из пространственного распределения магнитного поля, найти распределение его источников". По этим данным строятся и выводятся на экран монитора изображения источников магнитного поля (электрических токов) в соответствующем сечении сердечной мышцы в разных фазах сердечного цикла, определяется локализация в сердце аритмогенных зон и т.д.

Интеллектуальный магнитокардиографический сенсор "Кардиомаг" уже много лет успешно работает в Национальном научном центре "Институт кардиологии им. академика М.Д. Стражеско" АМН Украины, что позволило создать и отработать ряд важных медицинских методик обследования пациентов и высококачественной диагностики заболеваний сердца. С его применением обследованы тысячи пациентов, уточнены их диагнозы, оптимизированы методики лечения.

По аналогичному принципу построены также *магнитоэнцефалографические* сенсоры, которые позволяют регистрировать слабые переменные магнитные поля, связанные с работой мозга человека, обнаруживать имеющиеся там нарушения активности и сверхактивные зоны, локализовать места нарушений.

Перспективы магнитокардиографов и магнитоэнцефалографов на сквидах в последнее время значительно возросли благодаря появлению высокотемпературных сверхпроводников. Для работы таких сенсоров уже не нужен жидкий гелий, применяют значительно более дешевый жидкий азот.

12.3.4. Сканирующий микроскоп на сквидах

Другим примером интеллектуальных сенсоров на сквидах является сканирующий сквид-микроскоп. Его общая функциональная схема показана на рис. 12.9 слева.

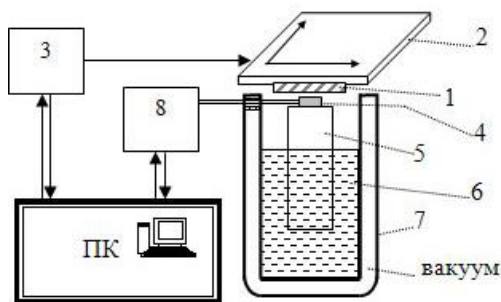


Рис. 12.9. Слева – функциональная схема сканирующего сквид-микроскопа: 1 – исследуемый образец; 2 – координатный стол; 3 – управление столом; 4 – чувствительные элементы на сквидах; 5 – хладопровод; 6 – жидкий азот; 7 – криостат; 8 – электронный блок; справа – сквид-микроскоп ССМ-77

Исследуемый образец 1 устанавливают на прецизионный координатный стол 2, работой которого управляет узел 3. Рядом с образцом, на минимальном расстоянии от него, находятся микроминиатюрные магниточувствительные элементы 4 на сквидах. Чтобы поддерживать температуру ниже критической, они установлены на хладопроводе 5, конец которого погружен в жидкий азот 6, залитый в криостат 7. Сигналы от магниточувствительных элементов подаются в электронный блок 8, где усиливаются, фильтруются, обрабатываются и в виде цифровых кодов передаются в ПК. По команде оператора компьютер организует перемещения координатного стола, на котором установлен образец, вдоль координат X и Y и измерение в каждом положении, т.е. в каждой точке поверхности образца, проекций вектора индукции магнитного поля и/или его градиента.

Таким способом на экране монитора формируется увеличенное в десятки-сотни раз двух- или трёхмерное изображение магнитного поля объекта. На рис. 12.9 справа показано фото криогенной части сканирующего микроскопа на сквидах марки ССМ-77, созданного на физическом факультете МГУ. На его основе в ИЗМИРАН России с использованием высокотемпературных сквидов создан сканирующий сквид-микроскоп ССМ-300, который уже может исследовать объекты, находящиеся при обычной комнатной температуре до 300 К (см. Интернет страницу <http://perst.issph.kiae.ru/Inform/HiTech/squid.htm>).

По сравнению с традиционными методами магнитной, ультразвуковой и радиографической дефектоскопии *сквид-микроскопия*, благодаря сверхвысокой чувствительности, позволяет обнаруживать скрытые, значительно меньшие по размерам, глубоко погруженные в материал дефекты, даже под защитным слоем. Она позволяет также обнаруживать очень слабые коррозионные и вихревые электрические токи, протекающие в образце, снимать карты токов, которые текут в многослойных электронных платах и в микросхемах. С ее помощью тестируют самые ответственные детали турбин, ракет, самолетов, осуществляют магнитные исследования геологических, минералогических, археологических образцов и проверяют, например, подлинность купюр или важнейших документов, на которые специальными магнитными чернилами нанесены скрытые знаки, и т.п. На таком микроскопе можно проводить не только пассивные, но и активные исследования, когда в исследуемом образце гальваническими, индукционными или другими методами специально возбуждают электрические или магнитные поля и изучают реакции объекта на них.

12.4. Индуктивные сенсоры

В индуктивных сенсорах используют свойства катушек индуктивности. Принцип действия так называемого *"поперечного"* индуктивного сенсора показан рис. 12.10.

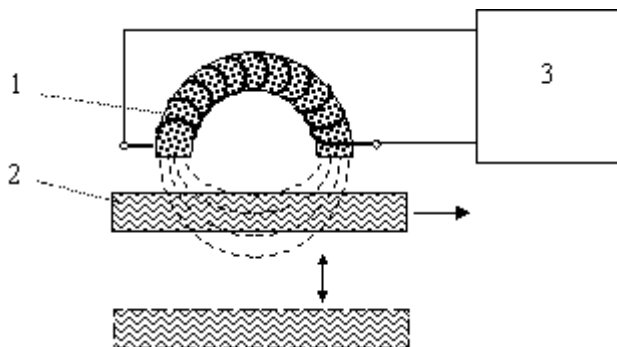


Рис. 12.10. Принцип действия поперечного индуктивного сенсора: 1 – катушка индуктивности с ферритовым сердечником; 2 – объект из ферромагнитного материала; 3 – измеритель индуктивности

Чувствительная катушка индуктивности 1 намотана на половине тороида или кольца из феррита. Когда через катушку пропускают электрический ток, то статическое магнитное поле, выходящее из открытых торцов полукольца, пронизывает часть близлежащего пространства. Если в это чувствительное пространство попадает объект 2 из ферромагнитного материала, то он влияет на конфигурацию магнитного поля. Вследствие этого изменяется индуктивность катушки 1, что фиксируется измерителем 3. Чем ближе объект к сердечнику, тем лучше замыкает он магнитный поток, тем больше индуктивность катушки. Такого рода сенсоры с успехом применяют, например, для восприятия закрывания/открывания дверей, ворот, крышек, приближения объектов из ферромагнитных материалов и т.д. К этому виду сенсоров относятся и некоторые традиционные индуктивные головки для считывания информации с магнитных носителей.

На рис. 12.11 показан принцип действия индуктивных сенсоров с "дифференциальным трансформатором". Такой трансформатор состоит из первичной обмотки L_0 и двух вторичных L_1 и L_2 из одинакового числа витков, намотанных навстречу друг другу. На первичную обмотку подают переменное синусоидальное напряжение $\sim U_{ВХ}$. Оно наводит во вторичных катушках тоже переменное напряжение. Когда между катушками нет никаких объектов, первичную катушку регулируют так, чтобы переменные напряжения во вторичных катушках были одинаковыми. Тогда напряжение на выходе дифференциального трансформатора получается равным нулю.

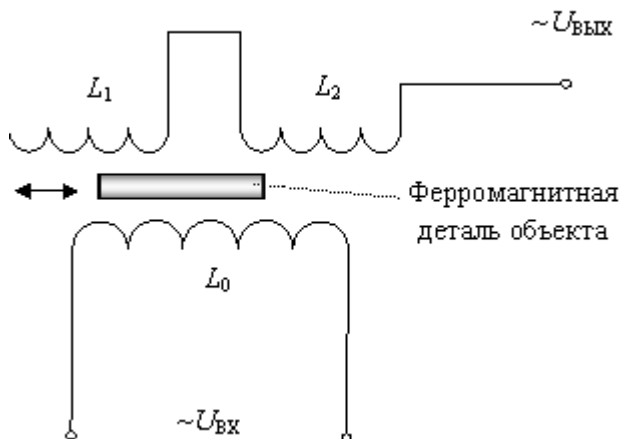


Рис. 12.11. Принцип действия индуктивных сенсоров с дифференциальным трансформатором

Если в пространство между катушками попадает ферромагнитная деталь (это может быть и не сам объект наблюдения, а кинематически связанная с ним деталь, например, соединённая с помощью тросика), то индуктивная связь первичной катушки с вторичными изменяется. Напряжения во вторичных катушках становятся разными, и на выходе дифференциального трансформатора появляется напряжение, отличающееся от нуля. Его величина и фаза являются функциями от координаты ферромагнитной детали. В других вариантах сама первичная катушка индуктивности является подвижной, кинематически связанной с объектом наблюдения.

Если есть два объекта и надо контролировать симметрию их взаимного положения, то вторичные обмотки кинематически связывают с каждым из них, а первичная катушка остается неподвижной.

Принцип действия индуктивных сенсоров третьего типа ("вихревых") иллюстрирует рис. 12.12.

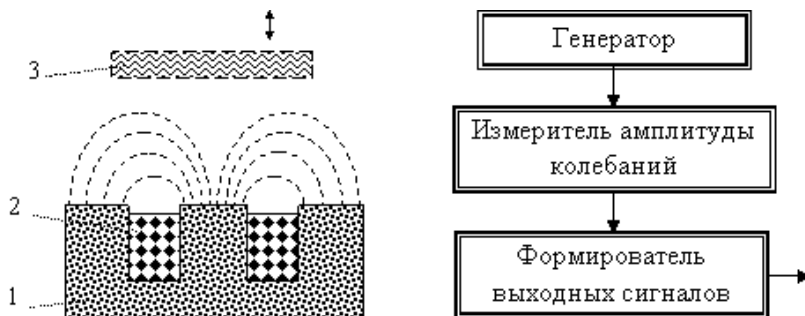


Рис. 12.12. Слева – конструкция "вихревого" индуктивного сенсора: 1 – ферромагнитный сердечник, 2 – катушка индуктивности, 3 – металлический объект. Справа – блок-схема сенсора

Слева в поперечном сечении показан круглый ферритовый сердечник 1, в который вставлена катушка индуктивности 2. Справа показана функциональная схема сенсора. Катушка индуктивности 2 является составной частью колебательного контура генератора незатухающих электромагнитных колебаний. В катушке возникают колебания магнитного поля, которые из открытой стороны ферритового сердечника выходят наружу. Они остаются довольно сильными до расстояний порядка радиуса сердечника.

Если в эту "зону чувствительности" попадает какой-либо металлический или другой предмет, проводящий ток, то в нем индуцируются вихревые электрические токи, которые отбирают часть энергии колебательного контура. Из-за этого амплитуда колебаний в нем уменьшается. Это уменьшение можно измерять и формировать выходные сигналы, зависящие от расстояния до предмета, от его размеров и от его электропроводности. На этом принципе можно строить сенсоры приближения предметов, не обязательно ферромагнитных, а из любых электропроводящих материалов. Можно также измерять толщину этих материалов, их электрическое сопротивление, обнаруживать дефекты в металлических изделиях и т.д.

Ныне серийно выпускаются уже сотни видов индуктивных сенсоров. Фотоснимок на рис. 12.13 иллюстрирует серии индуктивных сенсоров приближения фирмы Wachendorff Elektronik.



Рис. 12.13. Экранированные индуктивные сенсоры фирмы Wachendorff Elektronik

Выполненные в корпусах из нержавеющей стали или из никелированной латуни, они являются стойкими даже к воздействию наводок от электросварки, производимой на расстоянии нескольких метров. Диаметр наименьших индуктивных сенсоров – 3 мм, наибольших – 30 мм. Расстояния, на которых сенсоры дистанционно срабатывают, охватывают диапазон от 0,4 мм до 40 мм. Частота переключений может быть до 5 кГц [<http://www.megasensor.com>].

На рис. 12.14 показаны некоторые из индуктивных сенсоров фирмы Klaschka Gmb & Co. KG, рассчитанные на работу в жестких промышленных условиях, в том числе и особых условиях. Они сконструированы для концевых реле, реле переключения и защиты, для работы на микроконтроллеры и информационные шины. Среди них – металлоискатели, сенсоры распознавания цветных металлов и т.п.



Рис. 12.14. Разные виды "вихревых" индуктивных сенсоров

На рис. 12.15 показана функциональная схема индуктивного сенсора скорости вращения и углового положения вала.

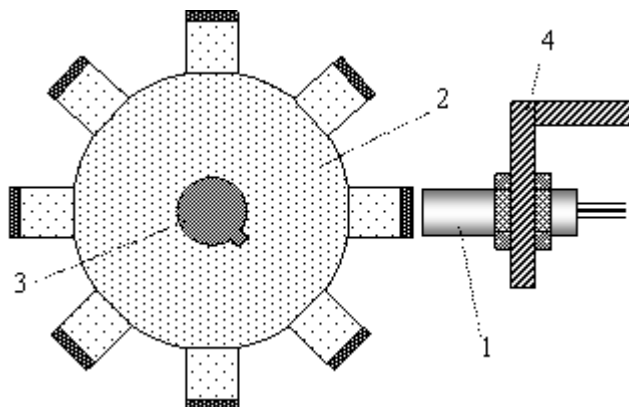


Рис. 12.15. Сенсор углового положения и скорости вращения вала: 1 – индуктивный сенсор приближения; 2 – измерительный диск; 3 – контролируемый вал; 4 – кронштейн, на котором укреплен сенсор 1

На вал 3, который надо контролировать, насаживают пластмассовый измерительный диск 2. На его выступах размещены металлические пластины. Когда во время вращения вала они проходят мимо сенсора приближения 1, на его выходе появляется сигнал. Если пластины имеют разную толщину, размеры или сделаны из разных металлов, то сенсор приближения выдает разные сигналы. Электронная схема, на которую поступают эти сигналы, распознает их и выдает в заданном формате информацию об угловом положении, направлении и скорости вращения вала.

Миллионы индуктивных сенсоров для всех областей автоматизации выпускают фирмы Pepperl+Fuchs GmbH, Balluff, Turck, российское предприятие "Сенсор", украинское "Гейзер"

[<http://www.geyser.dp.ua/auto/sensor/>] и многие другие.

Краткие итоги

Механические и магнитные свойства железных, стальных, чугуновых и других изделий из ферромагнитных материалов прямо определяются их составом и микрокристаллической структурой. Поэтому, измеряя их магнитные свойства – магнитную проницаемость, коэрцитивную силу, магнитную индукцию насыщения, кривую гистерезиса и т.д., можно контролировать соблюдение технологических режимов их изготовления и механические свойства. На этом основана магнитодиагностика указанных материалов. В режиме магнитной дефектоскопии обнаруживают невидимые дефекты изделий (внутренние пустоты, трещины, посторонние включения). В режиме магнитоструктурного анализа по кривым гистерезиса определяют состав и мелкокристаллическую структуру, делают диагностические выводы.

Известными магнитными сенсорами являются магнитные считывающие головки для считывания данных с магнитных носителей информации (с магнитных лент, дисков, барабанов, карточек и т.п.). Ныне для считывания все шире применяют магниторезистивные головки, которые стали меньше, чувствительнее, надежнее. Особенно большие возможности открыл т.н. "экстраординарный магниторезистивный эффект", который используют в головках для сверхбыстрой, сверхбольшой и сверхплотной магнитной памяти.

Наиболее чувствительные магнитные сенсоры используют явление сверхпроводимости и эффекты Джозефсона. Чувствительность наилучших сверхпроводящих магнитометров по магнитному потоку достигает $10^{-6}\Phi_0/\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}\approx 2\times 10^{-21}\text{Вб}/\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}$, а по магнитной индукции – 10^{-13} Тл. И эта чувствительность не зависит от уровня постоянной составляющей магнитного поля, т.е. совсем небольшие изменения можно измерять на фоне сильного постоянного магнитного поля. Такие магнитометры строят на сквидах (сверхпроводящих квантовых интерферометрах) постоянного и переменного тока. На их основе построены и уже успешно функционируют такие интеллектуальные магнитные сенсоры, как магнитокардиографы, магнитоэнцефалографы и сканирующие сквид-микроскопы.

Индуктивные сенсоры, использующие свойства катушек индуктивности, строят с использованием "поперечного" или "вихревого" принципа действия либо по схеме "дифференциального трансформатора". Промышленность серийно выпускает миллионы индуктивных сенсоров (концевые реле, реле переключения и защиты, металлоискатели, сенсоры приближения и распознавания цветных металлов и т.п.) для всех областей автоматизации.

13. Радиосенсоры и радиолокаторы

13.1. Радиоприемники

Сквозь окружающее нас пространство всегда проходят миллионы радиоволн – электромагнитных колебаний с длиной волны от 0,3 мм до 3 км. Мы, люди, практически их не ощущаем. Воспринимать их, разобраться в них, получить из них ценную информацию нам помогают радиосенсоры. К этой группе интеллектуальных сенсоров принадлежат, в первую очередь, *радиоприемники*.

За столетие от изобретения радиосвязи они в своем развитии прошли впечатляющий путь от первых малочувствительных детекторных и ламповых радиоприемников к высококачественным современным. Двести лет назад люди и вообразить себе не могли, что можно слушать музыку, которую играют, или сказку, которую рассказывают детям, – вообще запросто слушать то, что происходит за сотни и тысячи километров от нас. Сегодня же это стало настолько привычным, что никого уже не удивляет.

Задача, возлагаемая на радиоприемники, не из легких: из миллионов разных радиоволн всех диапазонов и частот, поляризаций, фаз, способов модуляции, направлений распространения надо поймать слабые радиосигналы лишь требуемого пользователю радиоканала. Надо усилить их, отделить от других радиосигналов и разнообразных помех, осуществить демодуляцию, превратить в четкие высококачественные звуковые волны.

13.1.1. Аналоговые радиоприемники

Чтобы справиться с этой задачей, радиоприемники почти с самого начала уже должны были проектироваться как умные, "интеллектуальные" радиосенсоры. Чувствительным их элементом является антенна, в которой электромагнитные волны наводят переменное электрическое напряжение с амплитудой часто лишь в микровольты.

Выбор и наладка антенн, принципы работы радиоприемников, усиления, селекции, демодуляции сигналов, способы подавления помех и т.д. – это предмет целой самостоятельной науки – "радиотехники". Эти принципы многократно и хорошо описаны в сотнях учебников и книг. И повторять их мы не будем. Обратим Ваше внимание лишь на то, что на протяжении почти всей истории своего развития и совершенствования радиоприемники были аналоговыми.

Популярнейшим из радиодиапазонов среди населения является поддиапазон ультракоротких волн с частотой 64 - 108 МГц и длиной волны 2,8-4,7 м ("FM диапазон"). Именно в этом диапазоне работает большинство коммерческих радиоканалов. Здесь можно обеспечить высокое качество радиоприема, стереофоническое вещание. Популярным является также поддиапазон средних волн с частотой 520-1610 кГц и длиной волны 185-580 м ("AM диапазон"), хотя качество приема здесь заметно ниже. Большинство бытовых радиоприемников рассчитано именно на эти диапазоны радиоволн.

На рис. 13.1 слева представлена фотография типичного современного аналогового радиоприемника PANASONIC RF-2400 размером 234x122x82 мм и массой 670 г, предназначенного для приема радиопередач в FM и AM диапазонах. Он имеет телескопическую антенну, автоматическую регулировку усиления (АРУ) и автоматическое слежение за частотой выбранной радиостанции,

возможность регулирования тембра, светодиод для точного подбора частоты наилучшего приема. Слушать радиопередачи и музыку можно как через динамик, так и через наушники.

Близкий по своим возможностям к описанному аналоговый радиоприемник "карманного" размера RF-P50EG-S с выходной мощностью динамика 0,15 Вт, размером 117x70x30 мм, показан на рис. 13.1 справа.



Рис. 13.1. Аналоговые радиоприемники PANASONIC RF-2400 и RF-P50EG-S

13.1.2. Цифровые радиоприемники

Лишь в последнее десятилетие радиоэлектронные фирмы начали массово производить и выпускать на широкий рынок цифровые радиоприемники – интеллектуальные сенсоры, в состав которых входит микропроцессор. Они намного удобнее аналоговых. При пользовании ими не нужно каждый раз крутить ручку настройки, искать интересующий Вас радиоканал. Достаточно найти его один раз и занести параметры настройки в память. После этого цифровой радиоприемник сам автоматически отыскивает и выделяет заданный радиоканал. Он значительно лучше следит за частотой избранного радиоканала, а также может выполнять немало дополнительных функций.

На рис. 13.2 показан цифровой радиоприемник PHILIPS AE2380, размером 225x15x55 мм, который работает в FM, MW (средние волны, 550–1600 кГц) и LW (длинные волны, 150–350 кГц) диапазонах, запоминает настройки до 30 избранных Вами радиостанций, имеет громкоговоритель с выходной мощностью 0,4 Вт. Для настройки на другой радиоканал достаточно нажать соответствующую кнопку.



Рис. 13.2. Цифровой радиоприемник Philips AE-2380

Радиоприемник обеспечивает регулирование тембра, воспроизведение стереозвука и возможность прослушивания радиопередач через наушники. Он имеет в своем составе также sleep-таймер, цифровые часы с автоматическим регулированием по радиосигналам точного времени, а также будильник с автоматическим включением радиоприемника или звукового сигнала по Вашему выбору и в заданное Вами время (<http://www.consumer.philips.com/>). Питание радиоприемника возможно как от стандартной электросети, так и от батареек или аккумуляторов. Поэтому он одинаково хорошо может служить Вам как дома, так и в дороге, на природе, в путешествиях.

На рис. 13.3 слева показан карманный цифровой радиоприёмник Philips AE6775/00 размерами 80x78x18 мм и массой лишь 65 г.



Рис. 13.3. Слева – карманный цифровой радиоприемник Philips AE6775/00; справа – спутниковый радиоприемник Delphi MyFi

Цифровой радиоприемник Philips AE6775/00 работает в FM и MW диапазонах, имеет память на 10 радиостанций, обеспечивая отличное стереозвучание с выходной мощностью 2x5 мВт. Радиопередачи можно прослушивать также через стереонаушники. Имеется динамическое усиление нижних частот.

Передача и прием стереозвуча обеспечивают тем, что звуки, воспринимаемые двумя пространственно разнесенными микрофонами, передаются по двум отдельным радиоканалам (или по двум разным подканалам одного радиоканала). В радиоприемнике они разделяются и воспроизводятся двумя разными, пространственно разнесенными динамиками, что и создает эффект стереофонического звучания.

Справа рис. 13.3 показан портативный спутниковый радиоприемник Delphi MyFi, с помощью которого владелец может прослушивать радиопередачи и музыку, находясь в любой точке земного шара. Благодаря встроенной памяти с помощью этого приемника можно записать и потом воссоздавать до 5 часов высококачественной музыки и другой аудиоинформации.

13.1.3. Радиоприемники для цифрового радиовещания

Цифровые радиоприемники стали также "прокладывать дорогу" для перехода на *цифровое радиовещание*. Это – технология радиовещания, при которой звуковые сигналы с самого начала представляются и передаются в цифровой форме и которая, благодаря этому, может обладать более высокой помехоустойчивостью и обеспечить гораздо более высокое качество передачи звуковых сигналов. Эта технология при использовании цифровой компрессии сигналов позволяет также передавать по одному радиоканалу несколько независимых потоков аудиоинформации и других данных, расширяя палитру предоставляемых пользователям услуг.

Уже в цифровых приемниках аналоговых радиосигналов появилась возможность наряду с приемом и воспроизведением аналоговых звуковых сигналов через отдельный подканал принимать параллельно передаваемые цифровые коды и воспроизводить на своем дисплее "бегущую" текстовую строку. В этой строке могут сообщаться, например, название радиоканала и наименование ведущейся радиопередачи, имена авторов, исполнителей, ведущих, сопроводительная информация. Могут передаваться срочные сообщения и предупреждения, сведения о погоде, о пробках на дорогах, рекламные сообщения, сведения, дополняющие звуковые сообщения (адреса, номера телефонов, цены и проч.).

В 90-х гг. стало совершенно очевидно, что наличие в радиоприемнике микроконтроллера позволяет принимать, обрабатывать и воспроизводить также и звук, представленный в цифровой форме. А переход на цифровую форму передачи звуковой информации потенциально может обеспечить возможность её надежной защиты от шумов и помех, значительное "уплотнение" передачи, а значит, и возможность мультивещания по одному радиоканалу, другие преимущества. Это делает цифровое радиовещание весьма перспективным.

Уже разработаны и практически опробованы несколько различных технологий и стандартов цифрового радиовещания. На европейском континенте пока лидируют технология "Eureka-147", которую именуют также "DAB", и технология "DRM". Стандарт цифрового аудиовещания DAB (Digital Audio Broadcasting) Eureka-147 используется, например, в Великобритании. Технологию "DRM"

продвигает некоммерческий международный консорциум DRM (Digital Radio Mondiale), созданный в 1998 г., в состав которого сейчас входит более 80-ти компаний. Свои программы передают в этом формате уже более 60 радиокomпаний. DRM предназначен для использования в диапазонах радиоволн с частотой ниже 30 МГц. Эти диапазоны по дальности распространения могут конкурировать со спутниками. Дальнодействие особенно актуально для России с ее огромными пространствами и низкой плотностью населения. Сигнал DRM, в отличие от DAB, можно передавать с помощью уже существующих аналоговых передатчиков, в которых меняется только модулятор. В DRM заложены возможности использования как более ранних, так и последних, наиболее эффективных систем компрессии сигналов, предусмотрены гибкие возможности помехоустойчивого кодирования. Для повышения надежности предполагается также использовать многочастотное вещание. В этом случае одна и та же передача ведется сразу на нескольких частотах. А радиоприемник автоматически настраивается на волну с оптимальным сигналом.

В 2006 г. на региональной конференции радиосвязи в Женеве было принято решение о том, что все страны Европы до 2015 г. должны перейти на цифровое телерадиовещание.

На рис. 13.4 вверху представлена функциональная схема радиоприемника для цифрового радиовещания. Чувствительным элементом здесь, как и в других радиоприемниках, является антенна *A*. Наводимые в ней электрические колебания поступают в радиоприемный тракт *РПТ*, где из них выделяются колебания, вызванные радиоволнами только выбранного пользователем канала. Они там усиливаются, демодулируются и превращаются в последовательность импульсов цифровой информации.

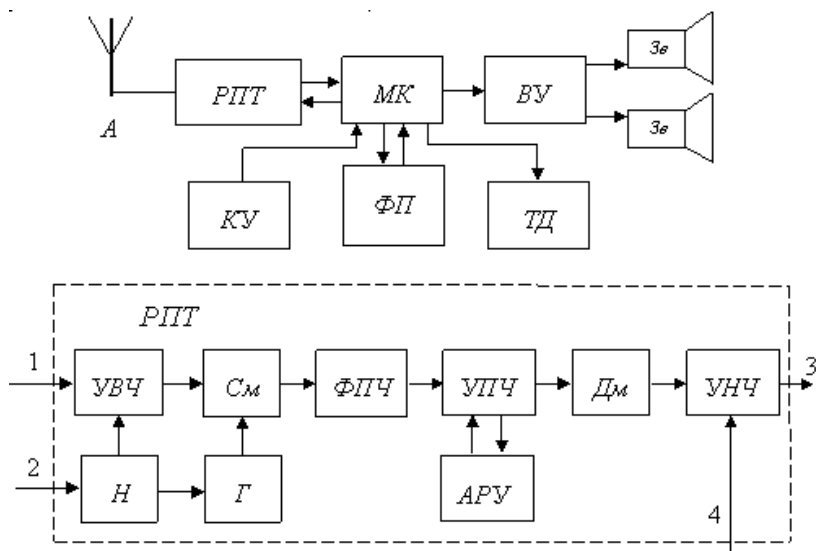


Рис. 13.4. Вверху – функциональная схема радиоприемника для цифрового радиовещания; внизу – типовая функциональная схема радиоприемного тракта

Эта последовательность импульсов поступает в микроконтроллер *МК*, который в соответствии с установленным протоколом связи выделяет из неё потоки данных, нужных пользователю. Он осуществляет их цифровую фильтрацию, декодирует их, формирует аудиосигналы и информацию для отображения на текстовом дисплее *ТД*.

Аудиосигналы поступают на выходной усилитель *ВУ*, а с него – на звуковые колонки *Зв*. По желанию пользователя текстовая или аудиоинформация могут запоминаться во флэш-памяти *ФП* и потом воспроизводиться радиоприемником по указанию пользователя. Для того, чтобы пользователь мог управлять работой радиоприемника, используются клавиши или кнопки управления *КУ*.

Типовая функциональная схема радиоприемного тракта *РПТ* представлена на рис. 13.4 внизу. Она, в принципе, такая же, как и в большинстве аналоговых и цифровых радиоприемников. Сигнал от антенны через вход 1 поступает в усилитель высокой частоты *УВЧ*. Он содержит высокочастотный колебательный контур, благодаря чему из широкого спектра колебаний выделяются лишь сигналы нужной частотной полосы. Резонансная частота устанавливается с помощью

узла настройки H . Этот узел обычно состоит из переключателя радиодиапазонов, который подключает в контур катушки индуктивности разных номиналов, и варикапов (конденсаторов переменной емкости). В аналоговых радиоприемниках настройка на нужный радиоканал производится вручную с помощью ручек грубой и точной настройки, используя шкалу длин волн (частот) и светодиодный индикатор настройки. В цифровых радиоприемниках настройка производится микроконтроллером через вход 2. Выделенные и усиленные сигналы нужной пользователю частоты поступают в смеситель S_m , на который подаются также сигналы опорной частоты от гетеродина G . Это – генератор незатухающих электромагнитных колебаний небольшой амплитуды, частота которых тоже регулируется узлом настройки H так, чтобы разность между ней и частотой выделенных высокочастотных колебаний оставалась постоянной. При смешивании выделенных сигналов нужной пользователю частоты и опорного сигнала от гетеродина на выходе смесителя S_m появляется сигнал разностной частоты, которую называют "промежуточной". Она остается одной и той же при настройке УВЧ на любую радиостанцию.



Рис. 13.5. Фотографии двух образцов радиоприемников для цифрового радиовещания

Сигналы промежуточной частоты отфильтровываются фильтром промежуточной частоты $ФПЧ$ от помех и усиливаются в усилителе промежуточной частоты $УПЧ$. Узел автоматической регулировки

усиления АРУ обеспечивает оптимальную амплитуду выходного сигнала промежуточной частоты, поступающего на демодулятор D_m . Последний выполняет действия, обратные тем, которые производятся в модуляторе передающей радиостанции. В случае амплитудной (частотной, фазовой) модуляции D_m выполняет амплитудную (соответственно частотную, фазовую) демодуляцию. Благодаря этому на выходе D_m появляются сигналы звуковой частоты или последовательности цифровых импульсов. Они усиливаются в усилителе низкой частоты УНЧ. В аналоговых и в цифровых радиоприемниках получаемый на выходе 3 аналоговый звуковой сигнал воспроизводится в звуковой колонке (или в наушниках). В радиоприемниках для цифрового радиовещания последовательность цифровых импульсов с выхода 3 передается сначала в микроконтроллер. В аналоговых радиоприемниках тембр звучания регулируется вручную по входу 4, а в цифровых – от микрокомпьютера.

Фотографии двух образцов радиоприемников для цифрового радиовещания приведены на рис. 13.5. Их характерной особенностью, отличающей их от радиоприемников аналогового радиовещания, является наличие дисплея для вывода текстовой информации.

13.2. Мобильные телефоны

Вместе с радиоприемниками к семейству интеллектуальных радиосенсоров принадлежат также широко известные ныне мобильные телефоны. Сто лет назад даже фантасты не писали о том, что люди будут носить беспроводный телефон в кармане и будут разговаривать с коллегами, родственниками или друзьями, сидя далеко-далеко от них где-нибудь на пляже.

13.2.1. История создания мобильных телефонов

Поучительная история создания и совершенствования мобильных телефонов *началась в середине XX в.* Уже тогда функционировали системы мобильной радиосвязи в полиции и в других силовых ведомствах. Но теперь речь шла уже о мобильных телефонах, которые могли бы служить нам всем. В 1947 году такую цель поставили перед собой американская Bell Laboratories (компания АТ&Т) и шведская компания Televerker.

И уже 3 декабря 1950 г. инженер-изобретатель Стюре Лаурен (Sture Lauen), сидя за рулем автомобиля, поднял трубку сконструированного им мобильного телефона и набрал телефонный номер службы точного времени. Спустя мгновение он услышал четкий ответ, – и радости его не было границ. Ведь это был первый в мире сеанс мобильной телефонной связи! Правда, мобильный телефонный аппарат Лаурена имел массу около 40 кг и размещался на двух задних сидениях автомобиля, а телефонная трубка с наборным диском располагалась между двумя передними сидениями. Лишь в 1956 г. разработанная шведами система мобильной телефонии (Mobil-telefonsystem A) была введена в эксплуатацию в Стокгольме и в Гетеборге. Но из-за высокой цены, которая составляла тогда половину стоимости автомобиля, частных абонентов набралось лишь несколько десятков.

Первым *сотовую систему мобильной связи*, которая может покрывать территорию нескольких государств, предложил в 1969 г. выпускник Стокгольмской высшей технической школы Естен Мякотило в своем проекте NMT (Nordisk MobilTelefon – скандинавская мобильная телефония). К сожалению, полноценную реализацию проекта надолго задержало отсутствие недорогих экономных микропроцессоров, пригодных для применения в мобильных телефонах.

Первой успешной коммерческой сотовой телефонной сетью была финская сеть Autoradiopuhelin (автомобильный радиотелефон), запущенная в эксплуатацию в 1971 г. Она работала на частоте 150 МГц и обслуживала свыше 30 тыс. клиентов.

В конце 70-х гг. XX в. для пяти североевропейских стран (Дания, Исландия, Норвегия, Финляндия, Швеция) был разработан стандарт NMT-450 (Nordic Mobile Telephone) с рабочей частотой 450 МГц. В разработке проекта NMT приняли участие свыше 40 фирм. Благодаря их совместным усилиям и появлению на рынке подходящих по техническим параметрам и приемлемых по цене микропроцессоров, удалось в короткие сроки разработать и наладить выпуск не только мобильных телефонов нового образца, но и новых базовых телефонных станций и линейных коммутаторов. Финансово проект очень своевременно поддержала Саудовская Аравия, где были и острая потребность в телефонизации, и необходимые деньги. В 1981 г. система NMT была введена в эксплуатацию именно в Саудовской Аравии – на несколько месяцев раньше её старта на родине. Система

NMT качественно опережала системы мобильной связи, которые функционировали тогда в США и Японии, и стала на самом деле массовой. Но и она была рассчитана лишь на автомобилистов, так как мобильные телефоны имели тогда еще сравнительно большие габариты и массу.

Первый портативный мобильный телефон Motorola DynaTAC 8000X с массой порядка 1 кг появился на рынке в 1983 г. Он открыл первое поколение аналоговых мобильных телефонов с частотной или фазовой модуляцией.

13.2.2. Мобильные телефоны 2-го поколения

Следующим этапом была разработка мобильных телефонов с цифровыми методами обработки сигналов. В 1990 г. были утверждены стандарты цифровой сотовой связи в США (IS-54 или D-AMPS), Великобритании (PCN-Personal Communication Networks, 1989 г.) и странах ЕС (GSM – Global System for Mobile Communications). Эти стандарты, благодаря значительному уменьшению влияния помех, позволили заметно улучшить качество мобильной телефонной связи и позволили пользователям обмениваться также текстовыми сообщениями (SMS).

На рис. 13.6 показан один из типичных мобильных телефонов 2-го поколения Nokia 1112. Он работает в стандарте GSM с частотой 900 или 1800 МГц. Масса 80 г, размеры 104x44x17 мм. Имеются встроенная антенна, монохромный экран 96x68 пикселей с подсветкой, 4-позиционная клавиша для работы по меню. Кроме голосовой связи, обеспечивается также передача *SMS сообщений*. Телефон выполняет также много сервисных функций: определение номера вызывающего абонента; запоминание вызовов и SMS сообщений; регулирование звука; возможность бесшумного вибровызова; запоминание номеров абонентов и ускоренный набор номера, автодозвон; подсчет времени и стоимости разговора; запрет звонков от некоторых указанных владельцем абонентов. Мобильный телефон запрограммирован и может использоваться также как цифровые часы, будильник, секундомер, таймер, калькулятор, записная книжка, электронная игра. Эти функции получили название функций "органайзера".



Рис. 13.6. Мобильный телефон второго поколения Nokia 1112

Работает мобильный телефон следующим образом. В режиме ожидания вызова чувствительные элементы, антенна и миниатюрный радиоприемник мобильного телефона, принимают радиоволны выделенной ему частотной полосы, усиливают полученные высокочастотные колебания, демодулируют их, формируя цифровые сигналы, которые передаются в микропроцессор. Микропроцессор согласно предусмотренному протоколу связи сравнивает полученные цифровые коды с позывными абонента, записанными на так называемой SIM-карте. Если они совпадают, то микропроцессор активирует предусмотренный сигнал вызова (звонок, зуммер, мелодию, вибрацию, световой сигнал и т.п. – по желанию абонента).

В режиме *вызова*, если абонент отвечает на вызов, микропроцессор организывает передачу радиосигнала на ближайшую базовую станцию, определение телефонного номера звонящего абонента и отображение его на дисплее мобильного телефона. Звуковые колебания голоса владельца воспринимаются чувствительным микрофоном, превращаются в электрические аналоговые сигналы. Последние с помощью аналого-цифрового преобразователя

трансформируются в цифровые коды, которыми модулируются выходящие радиосигналы. Микропроцессор организывает передачу исходных радиосигналов согласно предусмотренному протоколу сотовой связи. Их воспринимает ближайшая базовая станция, усиливает и передает к той базовой станции, из которой был передан вызов. А последняя обеспечивает передачу этих радиосигналов на мобильный телефон позвонившего. Так организовывается и поддерживается разговор. При этом один или оба абонента могут свободно перемещаться. Когда абонент переходит из зоны одной базовой станции в зону другой, радиопередачи автоматически переадресовываются так, что абоненты этого даже не замечают.

Если владелец не отвечает на вызов, микропроцессор выполняет передачу предусмотренного на этот случай радиосообщения на базовую станцию, через которую информация о невозможности связи передается звонящему. Он может отменить вызов или отправить короткое текстовое сообщение (SMS), которое передается на мобильный телефон адресата и запоминается в нем. Когда адресат активирует свой мобильный телефон, микропроцессор сообщит ему об имевших место входящих звонках и о принятых SMS сообщениях.

В режиме *исходящего звонка* микропроцессор сначала организывает диалог с пользователем через клавиатуру и дисплей мобильного телефона. В ходе диалога выясняется телефонный номер, на который пользователь желает позвонить по телефону. Для номеров, на которые абонент звонит по телефону часто, может быть организована сокращенная процедура вызова. Такие телефонные номера фиксируются в памяти мобильного телефона вместе с коротким именем или кодом. Микропроцессор выводит их на дисплей в виде меню. При выборе одного из них микропроцессор сам выполняет автоматический набор соответствующего телефонного номера. С помощью исходящего радиосигнала этот номер передается к ближайшей базовой станции, которая передает вызов по всей сети. Дальше, как описано выше, организовывается связь или приходит сообщение о том, что соответствующий телефонный номер недоступен или не отвечает. В последнем случае можно отправить ему короткое SMS сообщение.

Как видно из описания работы мобильного телефона, он является на самом деле комбинированным сенсором. Ведь он "чувствует", воспринимает не только радиоволны, но и звуки живой речи

пользователя, касания его пальцев к клавишам. И в этом смысле мобильный телефон можно отнести также к классам акустических и электрических сенсоров. Но всё-таки основным в нем является радиотелефонная связь. Не будь её, все остальные сенсорные функции утрачивают свое значение. Поэтому мы и относим мобильный телефон к классу интеллектуальных радиосенсоров.

Удобство мобильной связи и цены, которые уже стали доступными для многих клиентов, сделали мобильные телефоны в конце XX века товаром массового потребления. Производители мобильных телефонов и компании-операторы сотовой связи начали получать большие прибыли.

Как видим, от возникновения идей и первых разработок мобильных телефонов до их массового применения прошли десятки лет.

Так происходит с разработками и многих других интеллектуальных сенсоров, вообще со многими сложными научно-техническими инновационными разработками. Десятки лет могут отделять "посев от жатвы". И основные прибыли получают, как правило, не авторы идеи и разработчики первых образцов, а те компании, которые уже на заключительных этапах своевременно сделали инвестиции в организацию производства и массового внедрения инноваций. Настоящие же новаторы, изобретатели и разработчики нередко не имеют даже морального вознаграждения: остаются неизвестными, забытыми. Стоит ли при таком положении вещей удивляться тому, что подавляющее большинство талантливой молодежи отдает сейчас предпочтение коммерции, бизнесу, менеджменту, финансовой деятельности, и лишь совсем небольшая часть молодых людей стремится стать изобретателями, разработчиками, исследователями?

13.2.3. Мобильные телефоны "2,5G"

Мобильные телефоны второго поколения (2G) еще не позволяли быстро передавать значительные объемы информации (файлы электронной почты, музыку, изображения). Поэтому шла интенсивная работа по решению этих задач. В конце XX в. произошел переход от сетей сотовой связи 2G к так называемым "сетям 2,5G". Мобильные телефоны усовершенствованного второго поколения позволили обмениваться уже и "EMS" и "MMS" сообщениями" объемом до 100

килобайт, "скачивать" на телефон облюбванные мелодии, расширить палитру возможных дополнительных услуг.

О мобильных телефонах третьего поколения (3G) мы расскажем Вам в следующей "Радиотелевизионные сенсоры" .

13.3. Радиосенсоры "Bluetooth"

Одним из примечательных достижений этого периода стало создание миниатюрных ближнедействующих радиосенсоров "Bluetooth", разработка коммуникационного стандарта Bluetooth и внедрение в жизнь технологии передачи данных на небольшие расстояния с помощью радиосигналов. Эти разработки обеспечили условия эффективного беспроводного обмена информацией между компьютерами, мобильными телефонами, принтерами, видеокамерами и любыми другими приборами и устройствами, оснащенными радиосенсором Bluetooth. Это небольшое устройство (рис. 13.7) работает в частотном диапазоне от 2400 до 2483,5 МГц, который является открытым и не лицензируется в большинстве стран мира.

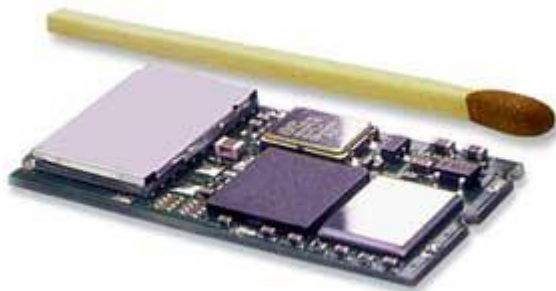


Рис. 13.7. Миниатюрный приемо-передающий радиосенсор Bluetooth (по сравнению с обычной спичкой)

Поскольку в этом диапазоне могут работать и другие источники радиоволн, для защиты от них выбран так называемый метод FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum), <http://www.bluetooth.com>]. При таком методе несущая частота передачи информации скачками изменяется 1600 раз в секунду в соответствии с квазислучайным "шаблоном", составленным из 79 разных частот этого диапазона, с гауссовским распределением вероятностей. Поэтому "понять" друг

друга могут лишь радиосенсоры, которые используют один и тот же шаблон изменения частот. Такой алгоритм работы позволяет легко избежать "конфликтов" с другими приборами, работающими на той же частоте, поскольку находящиеся на связи сенсоры могут автоматически заменить данную частоту в своем шаблоне на другую, свободную.

При мощности миниатюрного радиопередатчика 4 дБм связь устанавливается на расстоянии до 10 м, при мощности 20 дБм – до 100 м. Инфракрасные беспроводные сенсоры, которые применяются во всем известных телевизионных дистанционных пультах, обмениваются информацией, лишь "глядя глаз в глаз". В отличие от них, радиосенсоры Bluetooth могут связываться, "не видя друг друга", находясь в разных комнатах, будучи разделены стенами, дверями, мебелью или другими неметаллическими преградами.

Контакт между радиосенсорами Bluetooth устанавливается автоматически, как только они оказываются в зоне "радиодоступности". Для этого при изменении окружения сенсор Bluetooth автоматически излучает радиозапрос. Если рядом находится другой активный сенсор Bluetooth, работающий в "открытом" режиме ("Discoverable mode"), то он всегда отвечает на этот запрос. В режиме "ограниченных контактов" ("Limited discoverable mode") сенсор отвечает лишь в случае выполнения запрограммированных в нём условий. Каждый Bluetooth-сенсор имеет свой уникальный 48-разрядный двоичный код. Согласно протоколу Bluetooth сенсоры, которые вступили в контакт, сообщают друг другу свой код, выясняют, должны ли они в соответствии со своими предписаниями обмениваться информацией. Если должны, то "договариваются" о шаблоне общения и о шифрах, которые будут применять для защиты информации.

Связь между Bluetooth-сенсорами возможна не только по принципу "один к одному", но и в соответствии с иными схемами, показанными на рис. 13.8.

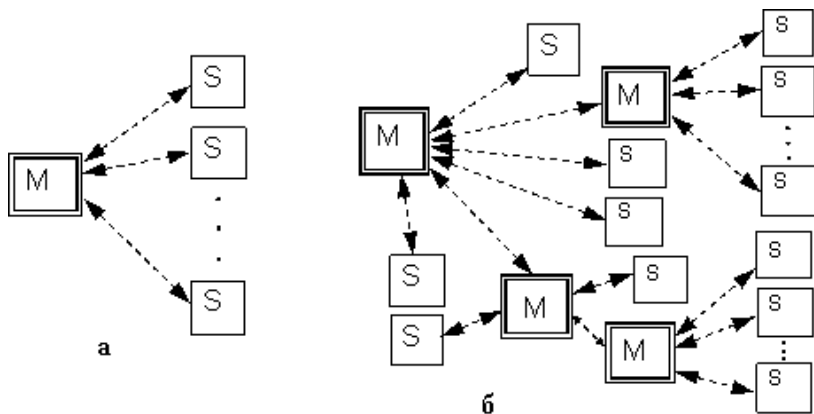


Рис. 13.8. Возможные схемы соединения Bluetooth-сенсоров: а) простое звено (piconet); б) сложное звено (scatternet)

Чтобы образовалось простое звено (так называемый "пиконет" – рис. 13.8, а), один из Bluetooth-сенсоров при отладке (инсталляции) назначается "старшим" (M, "master"), другие – "младшими" (S, "slave"). До одного "старшего" могут присоединяться до семи "младших". "Старший" сенсор определяет шаблон, с которым работает все звено.

Чтобы образовался так называемый "скатернет" (рис. 13.8, б), "старшие" Bluetooth-сенсоры некоторых простых звеньев назначаются одновременно "младшими" по отношению к определенным другим. В "скатернет" могут быть объединены до десяти простых звеньев. А с помощью специальных коммутаторов, так называемых "gates", можно образовать еще более сложные сети.

После "выяснения отношений" все соединенные в сеть Bluetooth-сенсоры получают список имен и адреса доступных им сенсоров и доступных через них услуг (service discovery). Младшие радиосенсоры могут обмениваться между собой информацией через старший сенсор, если такое предусмотрено в списке его услуг.

Таким способом относительно просто, быстро и с небольшими затратами при помощи Bluetooth-сенсоров удаётся организовать локальные сети из многих устройств (компьютеров, мобильных

телефонов, принтеров, цифровых фото- и видеокамер и других автоматизированных устройств) с беспроводным обменом информации со скоростями 0,4-1,0 Мб/с в пределах одной квартиры, дома, одного двора. Можно без проводов информационно соединить все, во что удастся встроить миниатюрный Bluetooth-сенсор. Это могут быть, например, холодильник и микроволновая печь, радиоприемник и электропривод передвижной стены. В ходе эксплуатации, в зависимости от нужд, конфигурацию сети можно дополнять и изменять.

Примеры одного из распространенных ныне применений сенсоров Bluetooth показаны на рис. 13.9. Это – наушники для высвобождения рук, которые продаются как дополнение к мобильным телефонам, оснащенным сенсором Bluetooth, – так называемые " гарнитуры hands-free ". В них тоже встроены такой сенсор, а также мини-микрофон и динамик с усилителями.



Рис. 13.9. "Гарнитуры hands-free" к мобильным телефонам с Bluetooth-сенсорами

Такой наушник настраивают на связь со своим мобильным телефоном и цепляют за ухо. Мобильный телефон может оставаться в кармане, в сумке или может вообще лежать где-то в десятке метров от Вас. Благодаря двусторонней радиосвязи с мобильным телефоном через наушник можно принимать входные звонки, вести телефонный разговор. При этом руки остаются свободными для другой работы. Это удобно и нравится многим пользователям. И к тому же мощность радиоизлучения гарнитуры hands-free в сотни раз меньше, чем мощность излучения мобильного телефона. И это сводит к минимуму

влияние коротковолнового радиоизлучения на организм человека во время сеансов радиосвязи.

Практика использования радиосенсоров Bluetooth показала, что защита передаваемой через них информации от несанкционированного перехвата и преступного использования пока еще недостаточна. Наиболее уязвим процесс установления первичного контакта между такими сенсорами, когда они обмениваются ключами и информацией о себе в незакодированном виде. Специально запрограммированные Bluetooth-сенсоры злоумышленников ("хакеров") могут активно вступить в такой контакт и получить доступ к шаблонам и шифрам, а с их помощью – ко всей информации, циркулирующей в локальной сети. Задача хакеров особенно облегчается, если сами пользователи пренебрегают вопросами безопасности: выбирают короткие, типовые пароли; не настраивают свои Bluetooth сенсоры на индивидуальные специфические требования, не меняют коды, не используют личное шифрование, особенно конфиденциальной информации. Тем не менее, можно не сомневаться, что выявленные слабые стороны Bluetooth технологии беспроводного информационного взаимодействия уже в скором времени будут ликвидированы в новых версиях протокола взаимодействия.

Конкуренцию радиосенсорам Bluetooth составляют радиосенсоры RadioEthernet IEEE 802.11, тоже предназначенные для создания беспроводных локальных компьютерных сетей под названием Wi-Fi. Они действуют на расстояниях до 100 м и обеспечивают более высокую скорость передачи данных – до 11 Мб/с. По этим важным параметрам и по уровню защиты информации радиосенсоры и вся технология RadioEthernet IEEE 802.11 выигрывают у технологии Bluetooth. Однако они проигрывают по размерам мини-сенсоров, по цене, энергопотреблению, уровню радиоизлучения.

13.4. Радиолокаторы

Еще одним известным видом радиосенсоров являются радиолокаторы или радары. Их функционирование базируется на излучении импульсов радиоволн, регистрации и анализе их отражений от объектов.

Первый патент на изобретение радиолокатора еще в 1934 году получил шотландский физик Роберт Уатсон-Уат. Особенно быстро

радиолокация начала развиваться в годы второй мировой войны и после ее окончания. Тогда радиолокаторы использовались в основном для раннего выявления вражеских самолетов на больших расстояниях.

Радиолокатор всегда имеет минимум четыре блока: генератор радиоимпульсов, антенну для их излучения в заданном направлении и для приёма отраженных от объектов сигналов, усилитель-селектор сигналов и индикатор. Отраженный от объекта радиосигнал запаздывает относительно импульса излучения на время, необходимое для распространения электромагнитной волны к объекту и обратно. Измерив время запаздывания, можно вычислить расстояние до объекта. А структура отраженного сигнала несет информацию о свойствах объекта. По изменению частоты отраженного радиосигнала можно определить, движется ли объект, и вычислить радиальную скорость его движения. Если диаграмма направленности излучения антенны достаточно узка, то можно определить также, в каком направлении находится обнаруженный объект. Для этого антенна радиолокатора должна поворачиваться, сканируя пространство по азимуту или по высоте.

Принцип функционирования радиолокатора требует, чтобы период времени между моментами излучения радиоимпульсов T был больше, чем время прохождения радиоволны туда и обратно на наибольшее расстояние L , на котором локатор может обнаруживать цели. Т.е. должно выполняться условие

$$T \geq 2L/c \quad (13.1)$$

где c – скорость распространения радиоволн.

Из-за необходимости все более сложной селекции и обработки сигналов, радиолокаторы уже давно стали интеллектуальными сенсорами.

В зависимости от поставленных задач в радиолокаторах используют следующие частотные диапазоны:

3-30 МГц (длина волны соответственно 100-10 м) – в радиолокаторах береговой охраны и в "загоризонтных" радиолокационных станциях (дальнего обнаружения);

50-1000 МГц (длина волны 6-0,3 м) – для дальнего обнаружения воздушных целей на больших высотах и для исследования поверхности Земли;

1-2 ГГц (длина волны 30-15 см) – для контроля за воздушным движением;

2-8 ГГц (15-3,75 см) – в морских радарх, в метеорологии;

8-12 ГГц (3,75-2,5 см) – для наведения ракет, для картографии средней разрешающей способности, для обслуживания движения самолетов в аэропортах;

12-18 ГГц (длина волны 2,5-1,65 см) – для картографии высокой разрешающей способности, для спутниковой альтиметрии;

27-40 ГГц (длина волны 11-7,5 мм) – в специальных радиолокаторах (например, для управления наземным дорожным движением);

40-100 ГГц (длина волны 7-2,7 мм) – для высокоточных исследований, в сенсорах автоматизированных транспортных средств.

13.4.1. Компактные бортовые радиолокаторы

Сначала радиолокаторы были очень громоздкими. Но с развитием электроники их размеры удалось значительно уменьшить и создать компактные, экономичные радары, удобные для эксплуатации даже на небольших судах (легких самолетах, яхтах и т.п.). Применение микрокомпьютеров позволило сделать радиолокаторы еще более интеллектуальными, использовать всё более изобретательные методы излучения зондирующих радиопульсов и обработки отраженных сигналов, которые значительно улучшили эксплуатационные характеристики и надежность радаров.

В качестве примера на рис. 13.10 показан *бортовой* радиолокатор Fujino M1712. Его закрытый, рассчитанный на любую погоду, сканер диаметром 46 см может вращаться с угловой скоростью до 24 об./мин. Благодаря наличию микропроцессора на жидкокристаллическом экране с диагональю 17,5 см данные могут быть представлены в 14 различных масштабах от 1/8 до 24 морских миль (вдоль радиуса) – в

зависимости от потребности. Погрешность определения расстояний не превышает 1% от максимального значения установленной шкалы расстояний, а погрешность определения азимута – до 1 deg. Расстояние до объекта можно определить с помощью концентрических колец расстояния, которые автоматически воспроизводятся на экране, либо с помощью курсора. Для самых точных измерений используют маркер переменного расстояния. Направление на объект также измеряется с помощью этого маркера или "электронного пеленга" – луча, проведенного от центра экрана через центр объекта, который автоматически воспроизводится при наведении курсора на объект. Углы отсчитываются от направления движения судна.



Рис. 13.10. Один из компактных современных радиолокаторов для небольших судов Furuno M1712: слева – антенна с генератором радиоимпульсов ("сканер"); по центру – индикатор с блоком селекции и обработки сигналов; справа – фото индикатора, встроенного в пульт управления яхтой

При наличии спаренного с радиолокатором цифрового магнитного или гирокомпаса углы могут отсчитываться также и от направления на магнитный или географический север (по выбору пользователя). Радиолокатор может быть информационно связан с системой спутниковой навигации. Тогда на экране будут отображаться также географические широта и долгота объекта, на который наведен курсор. Небольшие объекты (другие суда, буи, островки и т.п.) отображаются на экране в виде ярких точек.

Наличие микропроцессора сделало возможным сложный "полиэкранный" режим работы. В нижней части экрана может высвечиваться "окно данных", на которое выводится информация от компаса, эхолота, лага, от системы спутниковой навигации и т.п. В других "окнах" можно наблюдать общую радиолокационную картину, цветную навигационную карту с индикацией собственного

местонахождения и трассы движения, изображение маршрутов и ориентиров движения с прогнозом времени прохождения. Могут быть выделены также окна для отображения сообщений о погоде, о важных событиях в окружающем регионе, данные от рыбопоисковых эхолотов и т.д..

Подобный портативный судовой радиолокатор RADAR 2000, работающий на частоте 9,4 ГГц, описан также на сайте <http://www.fordewind.spb.ru/Info/jrc/Radar2000.htm>.

В отличие от навигационных радиолокаторов так называемые " георадары " направляют свои радиоимпульсы не в свободное пространство, а в исследуемую среду (в землю, воду, стены и т.п.). Зондирующий радиоимпульс, проходя сквозь среду, отражается от имеющихся в ней неоднородностей. Отраженные радиосигналы несут информацию о структуре среды. При перемещении георадара вдоль поверхности среды формируется картина, которая позволяет определить наличие, местонахождение, глубину залегания и размеры скрытых объектов.

На рис. 13.11 слева показана фотография блока обработки сигналов и индикации одного из современных компактных георадаров "ОКА".



Рис. 13.11. Индикатор с блоком селекции и обработки сигналов георадара "ОКА" (слева); самодвижущийся сканер с антенной АБ-1700 (справа)

Его назначение – радиолокационное выявление в грунтах, в насыпях, оползнях, под автомобильным или железнодорожным полотном, под водой, во льду и под ним разных структурных неоднородностей,

карстовых пустот, промоин, трещин, разломов, инородных тел и т.д. Радар имеет 8 сменных антенных блоков, рассчитанных на разную глубину зондирования и соответственно на разную частоту и продолжительность радиоимпульсов. Среди них имеются и герметичные антенные блоки, рассчитанные на погружение в воду на десятки метров. Низкочастотные антенны используют для исследований на глубину до 10-30 м с точностью определения глубины залегания 0,5 м, а более высокочастотные – для исследований на меньшие глубины (первые метры). Наиболее высокочастотная антенна АБ-1700 излучает импульсы с центральной частотой 1,7 ГГц. Это обеспечивает разрешающую способность 3 см на глубинах до 1 м. Антенные блоки устанавливают на самодвижущуюся тележку, способную перемещаться со скоростью 5-10 м/с, поддерживая радиосвязь с блоком обработки в радиусе до 100 м. На ней установлены автоматические сенсоры перемещения. Для сканирования антенны на большие расстояния тележку цепляют к автомобилю, трактору и т.п. С целью привязки к абсолютным геофизическим координатам предусмотрены связь со спутниковыми навигационными системами GPS и GLONASS.

Некоторые примеры применения георадаров приведены на рис. 13.12, 13.13, 13.14. На рис. 13.12 показано изображение, сформированное на жидкокристаллическом экране георадара "ОКА" при исследовании продуктивного слоя мела, который выделен белым цветом. Черными линиями выделены профили повышенного отражения радиоволн на границах раздела между разными слоями. Полученные профили позволяют рассчитать запасы мела и определить границы продуктивных залежей.

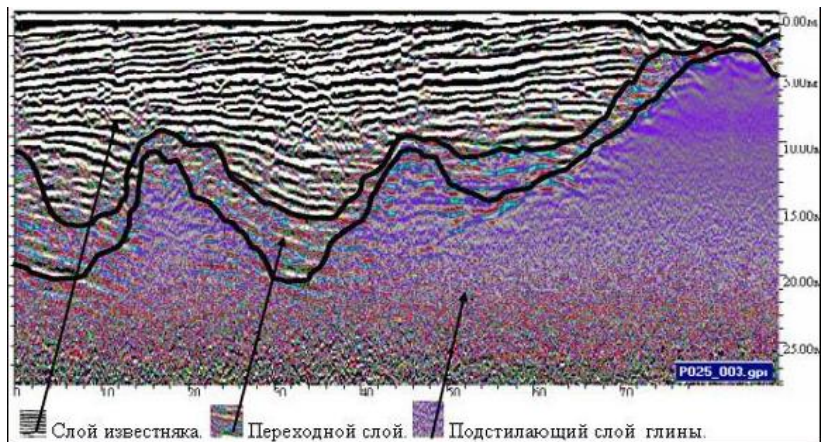


Рис. 13.12. Радиолокационное изображение профилей продуктивного слоя мела на экране георадара "ОКА" с антенной АБ-150

Другой пример можно увидеть на рис. 13.13, где сверху показано первичное радиолокационное изображение, а снизу – уточненное и обработанное изображение после выборочного геологического исследования слоёв и их интерпретации специалистами. Верхний уровень (0,0 м) соответствует положению поверхности воды в болоте. На отредактированном изображении хорошо видны контуры и размеры продуктивного слоя торфа. С целью радиолокационного выявления местонахождения людей, которые оказались под завалами после землетрясения или после другой стихийной или техногенной катастрофы, разработан специальный режим зондирования и обработки сигналов. В этом режиме из общего отраженного сигнала вычитается сигнал отражения от неподвижных объектов, находящихся на той же глубине. Благодаря этому достигают высокой чувствительности при выявлении подвижных объектов, например, дыхательных колебаний грудной клетки человека и других его движений. Сигналы от подвижных объектов выделяют по изменению частоты принятых радиосигналов вследствие эффекта Доплера. Этот режим работы показан на рис. 13.14: сверху – уровень сигналов отражения от неподвижных объектов, снизу – профиль разностного сигнала при наличии человека за стенами. Прямоугольником выделен весьма существенный разностный сигнал, обусловленный движениями человека и его грудной клетки.

13.4.3. Широкополосная радиолокация

В георадарах сейчас все шире применяют "широкополосную" (UltraWideBand – UWB) радиолокацию, когда ширина спектра радиосигнала превышает 25 % его центральной частоты. Проще говоря, излучаются лишь несколько периодов колебаний на центральной частоте или короткие одиночные импульсы.

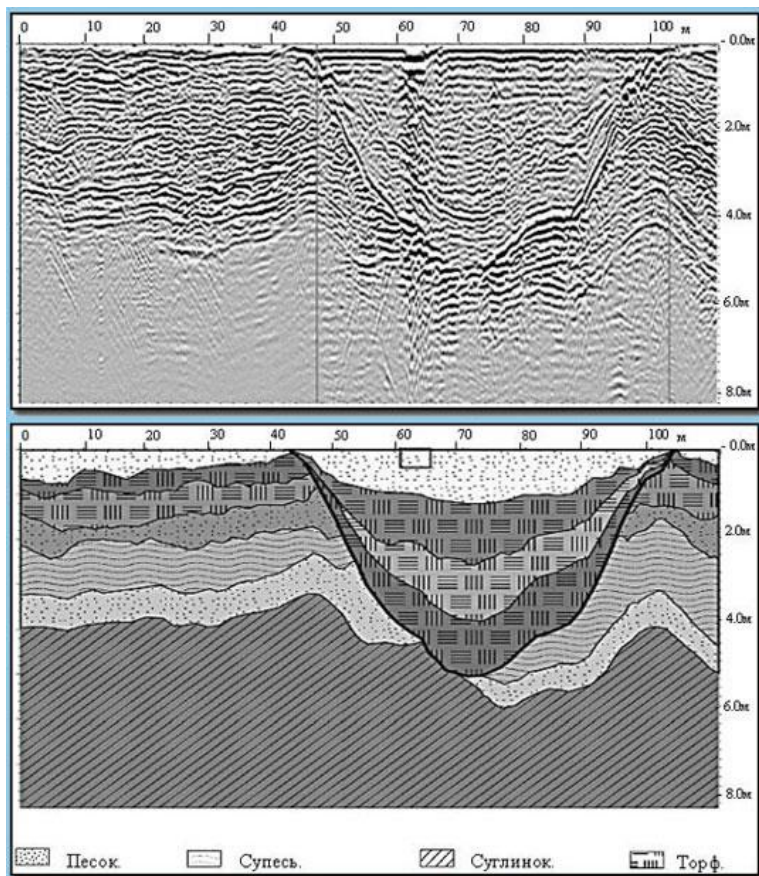


Рис. 13.13. Радиолокационное изображение, полученное на экране георадара "ОКА" с антенной АБ-150 при исследовании торфяного болота (сверху) и его инженерно-геологическая интерпретация на том же экране (внизу)

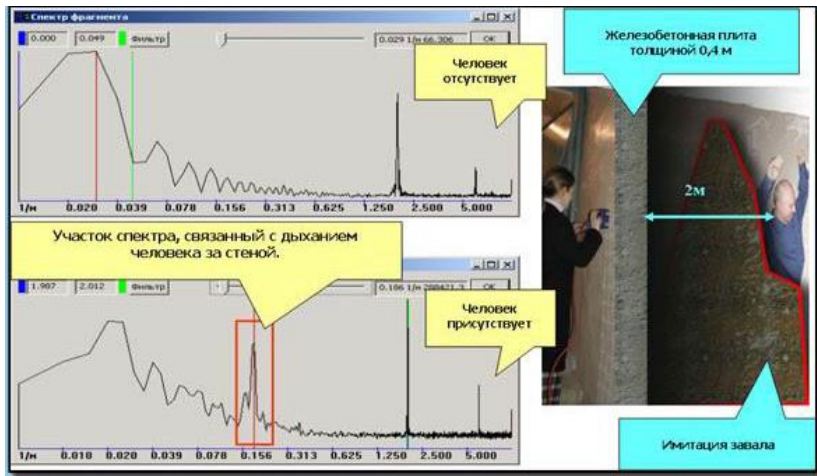


Рис. 13.14. Профилограммы радиолокационных сигналов при выявлении человека за стенами

Широкая полоса частот предопределяет небольшой пространственный размер "волнового пакета" и обусловленную этим высокую пространственную разрешающую способность. Например, радиоимпульсу продолжительностью 0,1 нс соответствует волновой пакет длиной лишь 3 см. Такой "пакет" различает уже сантиметровые детали структуры объекта, от которого он отражается. Короткие импульсы предопределяют также низкую среднюю (во времени) мощность излучения. При средней мощности лишь в несколько милливатт можно обеспечить дальность выявления целей от нескольких метров до километров.

В 1994 году Томас МакЕрван из Ливерморской национальной лаборатории (США) разработал миниатюрный радиолокатор MIR (Micropower Impulse Radar – *микромощный импульсный радиолокатор*) с продолжительностью импульсов 200 пс и пространственной разрешающей способностью 1 см. Интервалы времени между излучениями импульсов являются случайными и задаются генератором шума. А прием отраженных сигналов синхронизируется с моментами излучения. Таким образом достигаются: сведение к минимуму помех, создаваемых несколькими одновременно работающими антеннами; очень высокая селективность отбора "своих" сигналов; а также практически незаметная работа радиолокатора, так как его излучение

для постороннего наблюдателя сливается с фоновым шумом. Средняя частота излучения импульсов составляет 1-2 МГц. Усреднение по десяткам тысяч – миллионам импульсов повышает соотношение сигнал/шум. Благодаря очень коротким импульсам и большой скважности средняя мощность излучения МІR радиолокатора в сотни раз меньше, чем у мобильных телефонов. Всю его СВЧ электронику удалось разместить на печатной плате площадью около 4 см².

Используя МІR технологию, Ливерморская лаборатория разработала, например, радиолокационную систему HERMES (High-speed Electromagnetic Roadway Mapping and Evaluation System) для контроля за состоянием бетона и внутренней арматуры мостов. Система состоит из 64 миниатюрных МІR радиолокаторов, смонтированных на метровых штангах слева и справа от оси автомобиля так, что они перекрывают полосу шириной 2 м. Автомобиль движется со скоростью общего транспортного потока, и система на основе получаемой радиолокационной информации формирует трехмерное изображение внутренней структуры покрытия моста с разрешающей способностью до 5 см. Опыт показал, что благодаря высокому контрасту изображения, надежно обнаруживаются трещины в бетоне и арматуре шириной от 1 см.

В той же лаборатории создана радиолокационная система LANDMARC (Land-Mine Detection Advanced Radar Concept) для поиска зарытых в землю противопехотных мин, изготовленных из пластмасс и покрытых резиновой оболочкой, которые невозможно обнаружить с помощью металлоискателя. Для этого несколько миниатюрных МІR радиолокаторов монтируют на легкой штанге, которую переносят вручную, или устанавливают на небольшой роботизированной тележке. При перемещении, оставаясь на высоте порядка 10 см над поверхностью земли, система собирает радиолокационные сигналы отражения, которые после обработки бортовым микрокомпьютером превращаются в двух- или 3-мерное томографическое изображение структуры подземной среды. В "ручном" варианте изображение формируется на мини-экране, подвешенном на шлем оператора, а в роботизированном варианте – на экране пульта управления тележкой. Испытания подтвердили, что система легко отличает пластиковые мины от грунта, камней, корней, останков животных и деревянных предметов. Аналогичная система создана также в шведском Институте оборонительных исследований FOA.

Миниатюрные MIR радиолокаторы уже используются в автомобилях для предупреждения о возможности столкновения, для срочного приведения в действие воздушных подушек безопасности, для помощи при парковке. Начинается их широкое применение в охранных системах для выявления фактов проникновения и присутствия посторонних лиц или животных, в том числе и за стенами помещения.

13.4.4. "Нелинейные" радиолокаторы

В конце XX в. стали применять и так называемые "нелинейные радиолокаторы". Принцип их действия основан на том, что нелинейные электронные компоненты при взаимодействии с высокочастотными радиоволнами не только отражают их. Они также генерируют и излучают в виде вторичных волн их "более высокие гармоники", т.е. радиоволны с частотами в целое число раз больше частоты падающей волны. Поэтому по появлению высших гармоник можно обнаружить и установить местонахождение нелинейных электронных компонентов. На рис. 13.15 показан один из современных нелинейных радиолокаторов Orion NGO-4000, предназначенный для поиска и выявления устройств, в состав которых входят полупроводниковые электронные элементы, например, тщательно спрятанных подслушивающих устройств, скрытых видеокамер, записывающих устройств, управляемых по радио взрывных устройств и т.п. ORION обнаруживает скрытые электронные устройства независимо от того, находятся они в работе или отключены. Работой локатора управляет микропроцессор, который организует проверку и автоматически отыскивает свободные рабочие частоты в диапазоне от 850 МГц до 1005 МГц. Радиоволны одной из выбранных частот облучают пространство за антенной, а приемник контролирует отраженный сигнал этой же частоты, а также второй и третьей гармоник. Мощность излучения подбирается автоматически или (по желанию оператора) вручную, начиная от 14 мВт до 1,4 Вт. Круговая поляризация антенны и быстрые изменения частоты обеспечивают выявление полупроводниковых элементов любой ориентации и расположения. Цифровая обработка сигналов позволяет оптимизировать чувствительность локатора.

Результаты измерений интенсивности отраженных сигналов 2-й, 3-й гармоник и основной частоты выводят на дисплей в виде столбчатых диаграмм, как показано на рис. 13.16. Если интенсивность 2-й гармоники выше, чем интенсивность 3-й (справа), то это указывает на

присутствие полупроводниковых электронных элементов. А более высокая интенсивность 3-й гармоники (рис. 13.14 слева) свидетельствует о наличии лишь коррозионных нелинейных контактов между металлами. В случае обнаружения скрытых электронных устройств автоматически подается предупредительный звуковой сигнал в наушники, которые соединены с основным блоком через беспроводный инфракрасный канал связи.



Рис. 13.15. Нелинейный радиолокатор Orion NGO-4000: 1 – антенна с дисплеем; 2 – дисплей; 3 – раздвижная штанга; 4 – основной блок; 5 – наушники; 6 – кейс для упаковки радиолокатора (общая масса 1,6 кг)



Рис. 13.16. Примеры изображений на дисплее радиолокатора Orion NGO-4000

Краткие итоги

Большую группу электромагнитных интеллектуальных сенсоров составляют радиоприемники, которые из миллионов разных радиоволн всех частот, поляризаций, фаз, способов модуляции, направлений распространения выделяют слабые радиосигналы лишь требуемого пользователю радиоканала, усиливают их и превращают в четкие высококачественные звуковые волны. Чувствительным элементом радиоприемника является антенна, в которой распространяющиеся радиоволны наводят переменное электрическое напряжение небольшой амплитуды. В конце XX в. на смену чисто аналоговым радиоприемникам пришли цифровые. Они намного удобней для пользователей и обеспечивают им ряд ценных дополнительных услуг. А сейчас начался уже постепенный переход на "цифровое радиовещание", при котором звуковые сигналы с самого начала представляются и передаются в цифровой форме. Благодаря этому можно обеспечить более высокую помехоустойчивость и гораздо более высокое качество передачи звуковых сигналов по радио. При использовании цифровой компрессии сигналов появляется также возможность передавать по одному радиоканалу несколько независимых потоков аудиоинформации и других данных, расширяя палитру предоставляемых пользователям услуг.

В конце XX в. началось также массовое использование таких интеллектуальных радиосенсоров, как мобильные телефоны. Для многих они стали уже такой же необходимой вещью, как носовой платок, расческа, авторучка. Сплошной сетью беспроводной сотовой телефонной связи "покрыты" уже целые континенты. В дополнение к мобильным телефонам разработаны и массово выпускаются также "гарнитуры hands-free" – наушники, которые настраивают на связь со своим мобильным телефоном и цепляют за ухо. Благодаря двусторонней радиосвязи с мобильным телефоном через наушник можно принимать входные звонки, вести телефонный разговор. При этом руки остаются свободными для другой работы. Мощность радиоионизации гарнитуры hands-free в сотни раз меньше, чем мощность излучения мобильного телефона.

Это обеспечивается благодаря радиосенсорам "Bluetooth" – миниатюрным приемо-передающим радиосенсорам, обеспечивающим эффективный беспроводный обмен информацией между компьютерами, мобильными телефонами, принтерами, видеокамерами

и любыми другими оснащенными таким сенсором приборами и устройствами. Радиосенсоры Bluetooth могут связываться, находясь в разных комнатах, будучи разделены стенами, дверьми, мебелью или другими неметаллическими преградами. При помощи Bluetooth-сенсоров можно относительно просто, быстро и с небольшими затратами организовать локальные сети из многих устройств. Это могут быть, например, компьютеры, мобильные телефоны, принтеры, цифровые видеокамеры, холодильник и микроволновая печь, электропривод передвижной стены, – все, во что удастся встроить миниатюрный радиосенсор Bluetooth.

Благодаря применению встроенных микрокомпьютеров и других достижений микроэлектроники удалось значительно уменьшить размеры и улучшить характеристики радиолокаторов. Ныне они применяются не только для дальнего обнаружения воздушных целей, контроля за воздушным движением и наведения ракет, но и для ориентации самолетов и судов, в метеорологии, для исследования поверхности Земли, картографии, береговой охраны, управления наземным дорожным движением. Развита и широко используются такие новые технологии, как широкополосная и MIR радиолокация, нелинейная радиолокация и т.д.

14. Радиотелевизионные сенсоры

14.1. Тюнеры

Радиотелевизионные сенсоры отличаются от других радиосенсоров тем, что воспринимают намного более значительные объемы более динамичной и сложнее форматированной информации. Поэтому их стоит выделить в отдельный подкласс радиосенсоров.

К радиотелевизионным интеллектуальным сенсорам принадлежат известные всем телевизоры. В их конструкции можно выделить несколько основных функциональных блоков. Это, во-первых, телевизионный экран, на котором воссоздаются воспринимаемые нами изображения; во-вторых – это звуковой или акустический блок, который обеспечивает звуковое сопровождение изображений. В-третьих, это пульт управления, с помощью которого мы можем выбирать режимы работы телевизора ; в-четвертых – телеприемник. Далее – это антенна или входной телевизионный кабель, через который

в телеприемник попадает входной высокочастотный сигнал; затем – блок питания и корпус с входными, выходными гнездами и ручками управления, переключения и настройки.

14.1.1. Радиотюнеры

Из всех этих блоков радиочувствительными элементами являются, собственно говоря, лишь телеприемник и антенна. Их задача – воспринять распространяющиеся в окружающем пространстве или через телевизионный кабель высокочастотные электромагнитные колебания, выделить из них сигналы одного нужного телевизионного канала, поддерживать точное "слежение" именно за этим каналом, усилить до стандартного уровня сигналы этого канала, выполнить их демодуляцию, получить стандартный видеосигнал и передать его в блоки воспроизведения изображения и звукового сопровождения.

Радиосенсоры, которые выполняют подобные функции, принято называть "**тюнерами**" (от англ. *tuner*, происходящего от глагола *tune* – наладивать, настраивать). Так называли уже и входные (до выхода усилителя низкой частоты) блоки радиоприемников. Эти блоки для высококлассных аудиосистем нередко изготавливали и применяли как отдельное устройство – "тюнер". Устройства воспроизведения звука приобретались отдельно. Это могли быть просто наушники или громкоговоритель, но чаще всего с тюнерами использовали высококачественные звуковые колонки.

Например, на фотографии рис. 14.1 показан радиотюнер Parasound T3, который обеспечивает высококачественный прием FM и AM радиоканалов, в том числе и стереопередач.



Рис. 14.1. Внешний вид FM/AM, стереотюнера Parasound T3

Имея в своем составе микропроцессор и дисковую память, этот тюнер может запомнить названия и частоты до 60 избранных пользователем

фаворитных радиостанций, автоматически настраиваться на каждую из них, показывать её название и частоту на своем индикаторе. По заданию пользователя он может записывать радиопередачи указанной длительности. Включать нужную радиостанцию и регулировать звук можно дистанционно через инфракрасный пульт управления. При габаритных размерах 438x350x92 мм, тюнер обеспечивает соотношение сигнал/шум свыше 74 дБ для FM каналов и свыше 45 дБ для AM каналов.

Некоторые другие современные FM/AM тюнеры, например, NAD C422 выполняют еще и функцию "радиотекст". Она состоит в том, что наряду с аудиоинформацией автоматически принимается, расшифровывается и выводится на дисплей тюнера текстовая информация. Это могут быть: название передачи, которая в данный момент звучит на канале, время её начала и окончания; сведения о ведущем или об авторах передачи; программа трансляций данной радиостанции; короткие сообщения о погоде; штормовые и автодорожные предупреждения и т.п.

14.1.2. Аналоговые ТВ тюнеры

Для нужд телевидения тюнеры изготавливают, продают и применяют в виде отдельных устройств значительно чаще, чем для нужд радиотрансляции. Их называют телевизионными тюнерами или сокращенно ТВ тюнерами. Сначала разрабатывались и выпускались ТВ тюнеры для аналогового телевидения, которые поддерживают все форматы телепередач – PAL, SECAM и NTSC. Обработка высокочастотных радиосигналов в таких тюнерах (выделение нужного канала, усиление и преобразование его частоты в стандартную промежуточную частоту, обычно 38,9 МГц) происходит в аналоговых селекторах, усилителях и преобразователях частоты с использованием резонансных LC-контуров. Как и в радиоприемниках, на нужную частоту их настраивают, как правило, путем изменения напряжения на элементах с регулируемой емкостью – так называемых "варикапах", а для перехода с одного частотного диапазона в другой – переключают катушки индуктивности. Например, при изменении обратного напряжения на варикапе от 1 В до 30 В его емкость уменьшается от 200 пФ до 20 пФ, что изменяет резонансную частоту LC-фильтра от 45 МГц до 200 МГц. Современные "всеволновые" ТВ тюнеры обеспечивают прием сигналов в довольно широком диапазоне частот от 45 МГц до 800 МГц. Выход ТВ тюнеров рассчитан на

воспроизведение изображений на разных экранах, в том числе и на больших плазменных экранах, а звука – с помощью высококачественных звуковых колонок.

В состав аналогового ТВ тюнера входят также схемы автоматической аналоговой регулировки коэффициента усиления, слежение за вариациями частоты выбранного телеканала, усилитель стандартной промежуточной частоты, и т.п. Как правило, аналоговые ТВ тюнеры позволяют принимать как эфирные, так и кабельные телетрансляции, а часто – также и радиопередачи FM и AM диапазонов. Аналоговые ТВ тюнеры, в состав которых входят микропроцессор и устройство памяти, способны выполнять и много дополнительных сервисных функций. Например, запомнить и по Вашему заданию автоматически находить один из десятков отобранных Вами телевизионных и радиоканалов; поддерживать функции "телетекст" и "радиотекст"; блокировать просмотр определенных передач или каналов детьми или другими лицами, которые не знают пароля; автоматически включать и выключать теле- или радиотрансляцию в заданное пользователем время и прочие. Среди них имеются и довольно интересные. Например, мобильный ТВ тюнер G-WWT-1201B фирмы Gee fourth Corporation (Япония), имея размеры 110x69x26 мм и массу лишь 125 г (рис. 14.2), обеспечивает эфирный прием практически всех телеканалов. Он позволяет записывать до 3 часов видео во встроенную флэш-память на 512 мегабайт, в том числе по заранее заданному пользователем расписанию. Принимать, смотреть и записывать телепередачи на малогабаритном экране можно в дороге и в полевых условиях.



Рис. 14.2. Мобильный ТВ тюнер G-WWT-1201B с малогабаритным экраном. Справа показан тюнер в увеличенном виде

14.1.3. Компьютерные ТВ тюнеры

Применение микропроцессоров и микросхем АЦП в ТВ тюнерах открыло дорогу к созданию компьютерных ТВ тюнеров – интеллектуальных сенсоров, которые позволяют принимать и воспроизводить телепередачи на экранах (мониторах) компьютеров. Обычно выделяют 3 группы компьютерных ТВ тюнеров:

- " *встроенные* " или "внутренние", которые устанавливают в системный блок компьютера в виде дополнительной электронной платы;
- " *автономные* " или "внешние", которые представляют собой самостоятельное устройство, к видеовыходу которого для просмотра телепередач прямо подключают VGA монитор компьютера;
- " *внешние* ", имеющие достаточно быстрый канал информационного обмена с компьютером.

Каждая из этих групп имеет свои преимущества и недостатки, поэтому они рассчитаны на разных пользователей и на разные нужды.

Встроенные (внутренние) компьютерные ТВ тюнеры являются самыми дешевыми, не нуждаются в отдельном корпусе, так как их устанавливают в системный блок самого компьютера. Они становятся одним из его внутренних устройств, работают под присмотром его операционной системы и соответствующей программы-драйвера. Особенно простыми по конструкции стали они, когда начался серийный выпуск полупроводниковых ВЧ микросхем, специализированных для приема телевидения и аппаратного сжатия видеоданных по стандартам MPEG-1/2/4, – например, от фирм Microtune Inc., Philips Electronics, Xceive Inc. и т.д.

Для примера на рис. 14.3 показана плата внутреннего компьютерного ТВ тюнера AVerTV Studio Model 507. Он обеспечивает высокое качество приема телепередач, воспроизведение видеозаписей, позволяет индивидуально подобрать оптимальные параметры изображения для каждого канала. Тюнер AVerTV Studio Model 507 предоставляет возможность качественного приема FM радиостанций, в том числе и стереозвуковых передач, позволяет делать цифровые видеозаписи и звукозаписи. Его программное обеспечение поддерживает такие функции, как изменение масштаба телевизионного

изображения, воспроизведение этого изображения в отдельном окне, "телетекст", режим "time shift", автоматическое самовыключение в заданный момент времени и т.п.



Рис. 14.3. ТВ тюнер AVerTV Studio Model 507

Недостатками встроенных ТВ тюнеров является то, что они не защищены от помех и шумов, возникающих внутри системного блока, а также то, что для доступа к ним надо вскрывать корпус компьютера.

Пример "автономного" компьютерного ТВ тюнера показан на рис. 14.4. Его размеры 158x113x24 мм, масса 272 г. Он принимает телепередачи, обрабатывает их, перекодирует и позволяет смотреть телевидение в форматах PAL, SECAM и NTSC без включения компьютера, используя лишь его монитор (<http://www.aver.com.tw>). Это может быть любой монитор со входом VGA, в том числе, и большая плазменная панель или проектор с названным входом. Тюнер AVerMedia AVerTV TV Box9

поддерживает разрешающую способность до 1280x1024 пикселей. Для прослушивания звукового сопровождения, в том числе и стерео, к его аудиовыходам можно присоединить звуковые колонки или наушники. А входной сигнал он может брать не только от антенны, но и от кабеля, видеомагнитофона, видеокамеры, игровой приставки. Управлять тюнером можно и на расстоянии – с помощью дистанционного пульта.

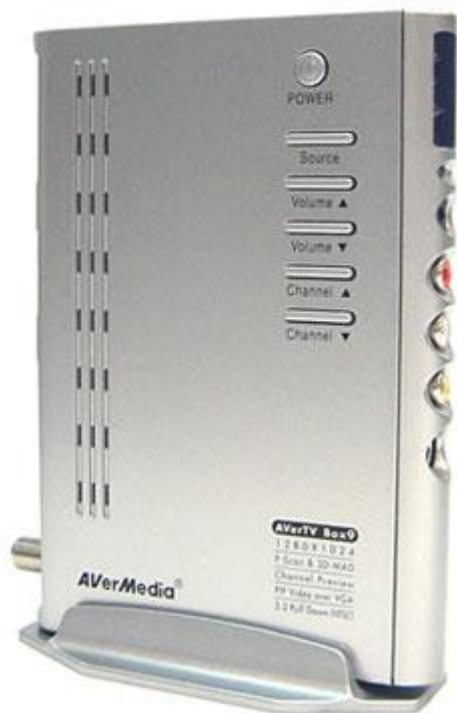


Рис. 14.4. Автономный ТВ тюнер AVerMedia AverTV TV Box9

Выпускается много и других моделей внешних автономных ТВ тюнеров (Neovo TV-02, Kworld LCD TV BOX, FlyTV-Vox и т.п.). Все они обеспечивают отличное качество приема телепередач, освобождают от необходимости беспокоиться о драйверах и о прочем программном обеспечении, просты в использовании и обслуживании. Но стоимость их намного превышает стоимость внутренних компьютерных ТВ тюнеров. И вдобавок они не обеспечивают возможность выделения и запоминания интересных видеоклипов из

телепередач, их нельзя подключить к портативному компьютеру. Среди группы внешних ТВ тюнеров, соединяемых с компьютером через канал информационного обмена, наиболее распространенными являются сейчас тюнеры, которые используют быстродействующий порт USB 2.0. Их и называют "ТВ USB-тюнерами". Через такой порт их очень просто соединить как с обычным компьютером, так и с ноутбуком. Они могут обеспечить и выделение отдельных видеок кадров, и просмотр записей из видеомангитофона, и много других функций. Но они дороже внутренних ТВ тюнеров и несколько проигрывают автономным тюнерам в качестве приема телепередач. Одним из примеров таких "внешних" ТВ тюнеров является показанный на рис. 14.5 тюнер MaxSelect DVD2Go, который вмещается на ладони взрослого человека. На одной его стороне (рис. 14.5 вверху слева) находятся кнопка включения, ИК сенсор сигналов от дистанционного пульта управления, аудиовыходы, вход видеомангитофона, видеокамеры или другого источника видеoinформации (S-Video). С противоположной стороны (рис. 14.5 вверху справа) размещены порт USB2.0, вход телевизионного кабеля (от антенны или от кабельной сети) и шнур электропитания. Для инсталляции тюнера в компьютер записывают сопровождающее программное обеспечение (драйверы и программы DVD Encoder и DVD Plus 2.0) и соединяют порты USB2.0.



Рис. 14.5. Портативный компьютерный ТВ тюнер MaxSelect DVD2Go; снизу - изображение на экране компьютера после запуска программы управления тюнером

Изображение и звуковое сопровождение при просмотре телепередач через этот тюнер отстают от реального эфира на 1-2 с, что связано с буферизацией. Последняя нужна, во-первых, для того, чтобы исключить прерывание изображения в случае загрузки компьютера другими срочными задачами, которые выполняются одновременно с просмотром. А во-вторых, это позволяет реализовать функцию "Time Shift", которая состоит вот в чем. Если Вас отвлекло от интересной передачи какое-то срочное дело, с помощью этой функции Вы сможете потом продолжить просмотр этой передачи с того же самого кадра или даже из предыдущих кадров с задержкой до 90 мин.

Телепередачи можно записывать в пяти разных форматах, запоминать и сохранять отдельные кадры или видеосюжеты. С помощью программы DVD Plus 2.0 записанное видео можно редактировать и переводить в разные форматы, необходимые, например, для пересылки через Интернет. Можно вырезать и удалить рекламу, малоинтересные эпизоды, ввести или отредактировать субтитры, наложить свыше сотни разных эффектов.

Еще меньшие размеры имеет внешний компьютерный ТВ USB-тюнер VideoMate U880, (90x26x11 мм, масса 40 г), созданный инженерами компании Compro Technology (рис. 14.6). Он, правда, имеет и несколько меньшие возможности, чем предыдущий.

14.2. ТВ ресиверы

В период перехода от аналогового телевидения к высоконадежному и качественному цифровому, аналоговые ТВ тюнеры стали постепенно отходить в прошлое. Вместе с тем электронные компании разработали и стали выпускать комбинированные ТВ тюнеры, рассчитанные на прием как аналогового, так и цифрового телевидения.

Постепенный переход к цифровому телевидению создал предпосылки для перехода стран всего мира на единый универсальный телевизионный стандарт. Но, к сожалению, воспользоваться этой возможностью не удалось.



Рис. 14.6. Внешний компьютерный ТВ USB-тюнер VideoMate U880

Европа разработала свой проект "Digital Video Broadcasting" (DVB) с четырьмя стандартами цифрового телевидения: DVB-T (для наземных эфирных передач), DVB-C (для трансляции через кабель), DVB-S (через спутник) и DVB-H (для телевидения повышенной четкости). А в США принят стандарт ATSC, в котором предусмотрено 18 форматов телевидения, в том числе шесть – для телевидения повышенной четкости (HDTV).

Интеллектуальные сенсоры для приема цифрового телевидения становятся настолько сложными, многофункциональными, настолько качественно отличаются от прежде знакомых ТВ тюнеров по своим возможностям, что все больше людей используют для них новое обозначение "ТВ ресиверы". Поскольку цифровое телевидение в быту начинало свой путь от кабельного и спутникового телевидения, то ТВ ресиверы разрабатывались, в первую очередь, для них. Сначала это были небольшие приставки к аналоговым телевизорам (их называют "цифровой декодер", "homecast" и т.п.). Они принимают высокочастотные радиосигналы кабельного цифрового телевидения,

выделяют из них сигналы именно нужного телевизионного канала (или радиоканала), усиливают их, выполняют фильтрацию, демодуляцию, декодирование и формируют видеосигналы, понятные аналоговому телевизору. Наряду с этим они выполняют и целый ряд сервисных функций:

- формируют на экране телевизора многоязычное экранное меню (язык – по выбору пользователя) и выполняют выбранное из меню пожелание пользователя;
- обеспечивают быстрый поиск и переключение каналов;
- позволяют пользователю создать свой список фаворитных каналов и упростить их выбор;
- поддерживают вывод на экран телетекста и субтитров.

Они могут работать также как

- электронный "телевизионный гид";
- "родительский замок" (блокирование отдельных программ или передач от нежелательного просмотра детьми);
- автоматически обновлять через ТВ кабель свое программное обеспечение;
- автоматически выключать телевизор в указанный момент времени и т.п.

В качестве примера развитого комбинированного ТВ ресивера укажем модель Homecast S8000CIPVR (рис. 14.7). В его состав входят 2 независимых ТВ тюнера, что обеспечивает возможность просмотра одного телевизионного канала с одновременной записью другого или одновременный просмотр двух разных каналов в режиме "кадр в кадре".



Рис. 14.7. Комбинированный ТВ ресивер Homecast S8000CIPVR

Ресивер может принимать аналоговые и цифровые, кабельные и эфирные, наземные и спутниковые телевизионные каналы. Он имеет порт USB2 и может передавать через него телевизионные программы на компьютер. Через специальный выход SCART он может выдавать так называемый "компонентный сигнал" и транслировать телепередачи на плазменные панели больших размеров. Матричный индикатор на передней панели позволяет выводить на нее не только цифры, но и названия каналов и другую информацию в буквенном виде. По желанию пользователя в ресивере может быть установлен жесткий диск памяти на 40-250 Гб, что предоставит возможность записывать на него выбранные фильмы и другие телепрограммы. Потом их можно редактировать, в том числе, например, ставить отметки в начале наиболее интересных фрагментов и перемещаться именно на эти отметки при просмотре. Становится доступным ускоренное или, наоборот, замедленное воспроизведение видеосюжетов, рассматривание и запоминание стоп-кадров и т.п.

Среди других комбинированных ТВ ресиверов можно назвать Compro VideoMate DVB-T300, AVerTV Hybrid+FM Cardbus и прочие.

Все больше ТВ ресиверов способны поддерживать прием телевидения повышенной четкости с разрешающей способностью 1280x720 и 1920x1080 пикселей.

Цифровое телевидение несет много новых возможностей, которые уже начинают реализовываться с помощью новых ТВ ресиверов. Все шире применяется создание на телевизионном экране (рядом с основным изображением) дополнительных "окон", в которых может подаваться разнообразная информация: пояснения к текущей передаче, например, статистические или справочные данные при трансляции спортивных соревнований; самое интересное на соседних каналах; полиэкранное изображение; информация о погоде; рекламные объявления и т.п.

Стал возможным прием "интерактивного" телевидения. На рис. 14.8, например, показан один из кадров такого телевидения. В нескольких "окнах" предлагается меню разных опций (выборов одного из возможных дальнейших действий). Из этого меню зритель может выбрать любой пункт, и тогда на экране будет транслироваться соответствующий подраздел информации – в отдельном окне или на весь экран. Для этого в радиотелевизионной передаче "смешивается" одновременная трансляция многих сюжетов, из которых ТВ ресивер

выделяет лишь указанные Вами. В любой момент можно вернуться к главному меню и по своему желанию активизировать другую опцию.



Рис. 14.8. Кадр из телепередачи "TV Interaktiv" немецкого телеканала RTL. Главное меню со многими "окнами" и опциями

Следующим логическим шагом в развитии ТВ ресиверов стала разработка так называемых "мультимедийных персональных компьютеров". В их состав входят тюнеры и модемы, которые позволяют принимать радио- и радиотелевизионные трансляции из всех доступных источников, входить в Интернет, на ряд информационных web-страниц, не только принимать любую видео- и аудиоинформацию, но и отправлять свою. Возможности такого компьютера в приеме-передаче информации ограничиваются только имеющимися подключениями и программным обеспечением.

Строго говоря, это – уже не область интеллектуальных сенсоров, а область компьютеров и компьютерных сетей.

14.3. Мобильные телефоны 3-4-го поколения

Ныне во всем мире происходит переход на сети мобильной сотовой связи третьего поколения (3G), которые рассчитаны не только на голосовое общение и пересылку коротких сообщений, но и на поддержку беспроводного Интернета, пересылку больших информационных файлов и электронной почты. Главное отличие сетей 3G – это скорость передачи цифровых данных, которая достигла уже 3 Мб/с. Первой страной, где введены сети 3G, стала Япония. Третье-четвертое поколение мобильных телефонов можно отнести уже к подклассу радиотелевизионных интеллектуальных сенсоров, так как и они принимают большие объемы динамичной и сложно форматированной информации, сопоставимой с той, которая принимается ТВ тюнерами.

Один из примеров мобильных телефонов этого поколения типа SGH-E500 фирмы Samsung Electronics (масса 85 г, размеры 85x45x21 мм) изображен на рис. 14.9. Слева он показан в закрытом виде, справа – в раскрытом.



Рис. 14.9. Мобильный телефон SGH-E500

Он может работать на частоте 1,9 ГГц, принимать и передавать SMS-, EMS-, MMS-сообщения, электронную почту, музыку. Этот "мобильник" имеет интегрированный MP3 плеер, встроенную 1,3 мегапиксельную цифровую видеокамеру, внутреннюю память на 80 Мб и интерфейс USB, позволяет пересылать видеосообщения в форматах MPEG4 и H263. Оборудован двумя цветными дисплеями: внутренним – на 176x220 пикселей и внешним – на 80x64 пикселей. Может выполнять много дополнительных функций "органайзера" (часы, будильник и т.п.).

На рис. 14.10 показан еще один мобильный телефон этого же поколения Sony-Ericsson W710i. Он имеет память на 1000 телефонных контактов, встроенную цифровую фотокамеру с разрешающей способностью 1632x1224 пикселей, возможность принимать FM-

радиопередачи, прослушивать полифонические мелодии, скачивать из Интернета электронные игры, выполнять функции диктофона и много других полезных функций.

Мобильные телефоны эволюционируют в смартфоны, которые умеют работать с документами, делать цифровые фотографии, записывать и воспроизводить видео- и аудиофайлы, хранить довольно большие объемы данных, соединяться с Интернетом, выполнять функции модема и факса, органайзера, о которых речь уже шла выше. В английском языке " смартфон " означает "умный телефон". Это – мобильный телефон, дополненный функциями карманного компьютера.



Рис. 14.10. Мобильный телефон Sony-Ericsson W710 со встроенной цифровой фотокамерой

В отличие от обычного мобильного телефона смартфон, как и компьютер, имеет свою операционную систему. В зависимости от записанных в него программ пользователь может значительно расширять и изменять функции своего смартфона.

На рис. 14.11 показан смартфон iPhone фирмы Apple. Размеры его 115x61x12 мм; масса 135 г. Почти всю его внешнюю панель занимает цветной жидкокристаллический сенсорный дисплей с разрешающей способностью 480x320 пикселей. Когда смартфон включают, на его экране появляется изображение разных клавиш, нажимая на которые можно запустить требуемую функцию. Экран является сенсорным и потому реагирует на прикосновение и движение пальца. При движениях пальца сверху вниз Вы представляете себе, будто бы вращается виртуальное колёсико, что позволяет быстро находить нужную запись. Для набора текста на экран вызывают изображение клавиш с буквами выбранного языка – "виртуальная клавиатура". Требуемый телефонный номер можно выбрать одним нажатием на соответствующую запись в списке. Так же быстро запускаются прослушивание полученного голосового сообщения или просмотр электронной почты. В любой момент одним нажатием кнопки можно возвратиться в главное меню.

В смартфон iPhone заложена операционная система OS X, с которой работали все компьютеры Apple последних поколений. В его состав входят контроллеры Bluetooth 2.0 и Wi-Fi, что позволяет пользоваться всеми связанными с ними услугами. Имеется в смартфоне iPhone фотоэлемент, с помощью которого автоматически регулируется яркость дисплея, сенсор ускорения, благодаря которому при повороте смартфона вокруг горизонтальной оси автоматически изменяется ориентация изображения на экране. Есть и двухмегапиксельная видекамера, бесконтактный сенсор приближения, благодаря которому при поднимании смартфона к уху, сенсорный экран автоматически блокируется.



Рис. 14.11. Смартфон iPhone фирмы Apple

Смартфон позволяет слушать музыку, смотреть видео, набирать и редактировать тексты, отправлять электронную почту, работать с Интернетом, выполнять расчеты, строить графики функций, составлять таблицы и диаграммы. Он может делать и многое другое – в зависимости от его программного наполнения.

Очень близки по функциям к смартфонам так называемые "коммуникаторы" – карманные компьютеры, дополненные функциями мобильного телефона, а, следовательно, и возможностью выхода в

Интернет. Но главными в коммуникаторах являются все же компьютерные функции, и поэтому их обычно относят к области компьютерной техники.

Соединив новейшие достижения многих областей современной техники, смартфоны и коммуникаторы стали настоящим рукотворным чудом.

14.4. Компьютерные кабельные модемы

К подклассу интеллектуальных радиотелевизионных сенсоров, воспринимающих большие объемы быстроменяющейся информации, принадлежат и компьютерные кабельные модемы. Именно они дают возможность нашим компьютерам быстро принимать через телевизионный кабель информацию из Интернета и пересылать ее, общаясь со всем миром. Скорость приема данных через кабельный модем может достигать 100 Мб/с, а скорость выдачи – до 10 Мб/с. Принцип работы кабельного модема показан на рис. 14.12. Например, в квартиру или учреждение заведен телевизионный кабель 1, который при отсутствии модема проложен непосредственно к телевизору или к ТВ тюнеру. Для того чтобы подключить компьютер через кабель к Интернету, устанавливают разветвитель 2. От одного из его выходов кабель 3 ведет к телевизору, а второй выход соединяют кабелем с модемом (последний на рис. 14.12 выделен штриховой линией). Внутри модема высокочастотные входные электромагнитные волны из кабеля поступают в тюнер 4, который и является чувствительным узлом данного интеллектуального сенсора.

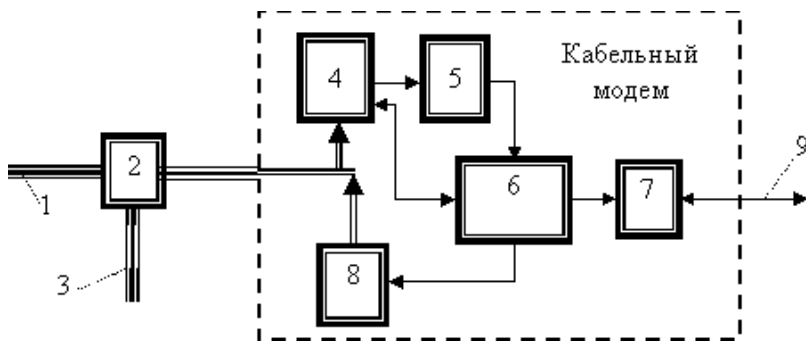


Рис. 14.12. Функциональная схема кабельного модема

Тюнер из всего набора входных электромагнитных колебаний выделяет сигнал только нужной узкой частотной полосы, превращает его в сигнал стандартной промежуточной частоты и усиливает, автоматически регулируя амплитуду выходного сигнала. Последний передается на демодулятор 5, который выделяет из него цифровые сигналы, корректирует случайные сбои, фиксирует сигналы синхронизации. Полученные цифровые сигналы передаются в быстродействующий микропроцессор 6. В нем сохраняются все нужные для общения с Интернетом имена, коды, пароли, выполняются сложные логические операции контроля доступа к каналу передачи (Media Access Control – MAC) согласно протоколу работы сети, расшифровываются принятые пакеты информации и превращаются в формат, понятный компьютеру. Через интерфейс 7 полученная информация передается каналом 9 в компьютер. Информация от компьютера, которую надо передать в сеть (запросы, сообщения, электронная почта и т.п.), через интерфейс 7 попадает в микропроцессор 6, перекодирована в стандартные пакеты и передается в модулятор 8. Последний генерирует высокочастотные электромагнитные колебания нужной частоты, модулирует их соответственно представленной ему информации, усиливает до нужной мощности и выдает в кабель 1, через который они попадают в модем и компьютер провайдера.

Частотные полосы для приема входной информации и выдачи выходной определяются в начале каждого сеанса связи в процессе общения модема провайдера и микропроцессора 6 в модеме пользователя – в зависимости от свободных на данный момент в телевизионном кабеле частот. После их определения микропроцессор 6 задает соответствующие частоты тюнеру 4 и модулятору 8.

На фото рис. 14.13 изображен кабельный модем 3-го поколения T1 720x фирмы Terayon, сертифицированный по стандартам DOCSIS 2.0 и Euro-DOCSIS. Его размеры 170x140x40 мм. Входной сигнал от 47 дБмкВ до 77 дБмкВ. Этот модем принимает информацию, которая передается в частотном диапазоне от 112 МГц до 858 МГц, а выдает информацию в диапазоне от 5 МГц до 65 МГц. Ширина полосы пропускания при приеме составляет 8 МГц.



Рис. 14.13. Фотоснимок кабельного модема TJ 720x

Модем стыкуется со стандартным телевизионным кабелем с волновым сопротивлением 75 Ом. Соединяется с компьютером через интерфейс USB, может работать с локальной сетью, в состав которой входят около 32 компьютеров. Обеспечивает скорость приема данных до 50 Мб/с и скорость выдачи – до 29 Мб/с. Светодиодные индикаторы на панели модема обеспечивают визуальный контроль за его функционированием без применения специальных средств.

Кабельные компьютерные модемы – еще одно из достижений современных "высоких технологий".

Краткие итоги

К подклассу радиотелевизионных сенсоров отнесены те интеллектуальные радиосенсоры, которые воспринимают намного более значительные объемы более динамичной и сложно форматированной информации. К интеллектуальным радиотелевизионным сенсорам принадлежат телевизоры и телевизионные (ТВ) тюнеры. ТВ тюнеры для аналогового телевидения поддерживают все форматы телепередач (PAL, SECAM и NTSC) и обеспечивают возможность просмотра телевизионных передач и

видеозаписей на отдельных больших экранах с прослушиванием сопровождения через высококлассные звуковые колонки.

Компьютерные ТВ тюнеры позволили принимать и воспроизводить передачи аналогового телевидения на экранах компьютеров. Их можно подразделить на 3 группы: "встроенные", "автономные" и "внешние". Встроенные ТВ тюнеры устанавливаются в виде дополнительной электронной платы в системный блок компьютера; "автономные" – представляют собой отдельное устройство, к выходу которого для просмотра телепередач можно прямо подключить VGA монитор компьютера; "внешние" – имеют достаточно быстрый канал информационного обмена с компьютером и подключаются к нему, например, через порт USB.

Развитие техники связи, в том числе и радиотелевизионных сенсоров, подготовило переход на более надёжное и высококачественное цифровое телевидение и телевидение повышенной четкости. На переходный период разработаны и выпускаются комбинированные ТВ ресиверы, позволяющие принимать как аналоговое, так и цифровое телевидение. Весьма популярными стали и "цифровые декодеры", принимающие высокочастотные радиосигналы кабельного цифрового телевидения и формирующие видеосигналы, "понятные" аналоговому телевизору. "Цифровые декодеры" и комбинированные ТВ ресиверы выполняют и целый ряд сервисных функций: многоязычное экранное меню; быстрый поиск и переключение каналов; вывод на экран телетекста и субтитров; электронный "телевизионный гид"; "родительский замок" и т.д.

При использовании цифрового телевидения эффективные алгоритмы сжатия видеоинформации делают возможной передачу по одному телевизионному каналу нескольких потоков данных. Благодаря этому, появляются возможности "полиэкранный", "интерактивный" телевидения и многих других новых технологий. Ресиверы для приёма цифрового телевидения могут реализовать все эти технологии. Следующим шагом в развитии ТВ ресиверов стало создание так называемых "мультимедийных персональных компьютеров". В их состав входят тюнеры и модемы, которые позволяют принимать радио- и радиотелевизионные трансляции из всех доступных источников, входить в Интернет, не только принимать любую видео- и аудиоинформацию, но и отправлять свою.

К подклассу радиотелевизионных интеллектуальных сенсоров относятся и мобильные телефоны 3-4-го поколений, так как и они принимают большие объемы динамической и сложно форматированной информации, сопоставимой с той, которая принимается ТВ тюнерами. Кроме обеспечения телефонных переговоров и обмена достаточно большими сообщениями, мобильные телефоны 3-4-го поколений позволяют принимать FM-радиопередачи, прослушивать полифонические мелодии, скачивать из Интернета электронные игры. Часто они имеют встроенную цифровую фотокамеру или видеокамеру, MP3 плеер, внутреннюю память и интерфейс USB, могут пересылать видеосообщения, выполнять функции диктофона и много других.

Дальнейшим развитием мобильных телефонов стали " смартфоны ". Смартфон – это мобильный телефон, дополненный функциями карманного компьютера. Он позволяет работать с документами, делать цифровые фотографии, записывать и воспроизводить видео- и аудиофайлы, хранить довольно большие объемы данных, соединяться с Интернетом, выполнять функции модема и факса. В отличие от обычного мобильного телефона смартфон, как и компьютер, имеет свою операционную систему. В зависимости от записанных в него программ пользователь может значительно расширять и изменять его функции. Очень близки по функциям к смартфонам так называемые " коммуникаторы " – карманные компьютеры, дополненные функциями мобильного телефона и возможностью выхода в Интернет. Соединив новейшие достижения многих областей современной техники, смартфоны и коммуникаторы стали настоящим рукотворным чудом.

К подклассу интеллектуальных радиотелевизионных сенсоров, воспринимающих большие объемы быстроменяющейся информации, принадлежат и компьютерные кабельные модемы. Именно они позволяют компьютерам быстро принимать через телевизионный кабель информацию из Интернета и пересылать ее, общаясь со всем миром. Встроенный быстродействующий микропроцессор обеспечивает выполнение протокола работы сети, расшифровывает принятые пакеты информации и должным образом "упаковывает" информацию от компьютера, которую надо передать в сеть (запросы, сообщения, электронная почта и т.п.). Кабельные компьютерные модемы – это еще одно из достижений современных высоких технологий.

15. Принципы работы электрохимических сенсоров. Потенциометрические сенсоры

15.1. Принцип работы электрохимического элемента

Электрохимические сенсоры являются, строго говоря, одним из видов электрических сенсоров. Но электрические сигналы возникают здесь в склонной к химическим превращениям системе "электронный проводник - электролит" и являются настолько специфическими, что их обычно выделяют (особенно химики) в отдельный класс сенсоров.

Когда электронный проводник тока (металл, графит, электронный полупроводник) контактирует с ионным проводником (ионным раствором, расплавом, гелем, сгущенным или твердым электролитом) и является относительно него химически активным, то в местах контакта происходит химическая реакция окисления металла, в ходе которой часть электронов переходит из металла в электролит (рис. 15.1, а).

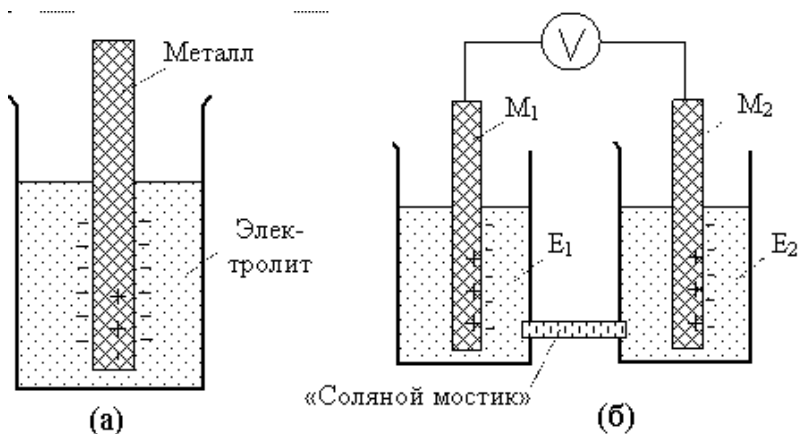
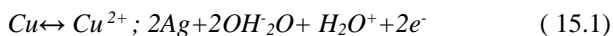


Рис. 15.1. а) Электронный проводник тока в контакте с электролитом ("полуэлемент"); б) электрохимический элемент: два электрически соединенных полуэлемента

Примеры таких химических реакций:



Вследствие этого металл заряжается положительно, а электролит – отрицательно, так что между металлом и электролитом возникает разность потенциалов. Если электрическая цепь разомкнута, и постоянный электрический ток протекать через систему не может, то довольно быстро устанавливается динамическое равновесие: число электронов, которые переходят из металла в электролит за единицу времени в результате прямой химической электродной реакции, сравнивается с числом электронов, которые переходят из электролита в металл под действием разности потенциалов. При этом протекает обратная химическая электродная реакция. Разницу потенциалов, которая устанавливается при достижении динамического равновесия, называют *электродным потенциалом*.

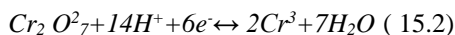
Равновесие и, следовательно, значение электродного потенциала зависят от всех факторов, которые могут повлиять на кинетику прямой и обратной электродной химической реакции:

- от энергии активации этой реакции;
- от материала, из которого сделан электронный проводник;
- от состава и концентрации тех ионов в электролите, которые могут вступать в окислительно-восстановительные реакции;
- от природы этих ионов, от их подвижности;
- от температуры электролита и электрода;
- от условий диффузии и перемешивания;
- от наличия источников и стоков участвующих веществ, напр., от притока веществ извне или выпадения продуктов реакции в осадок и т.д.

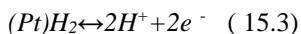
Электронный проводник может быть жидким, – например, жидкая ртуть.

Электронный проводник может быть даже химически инертным. Важно то, что он становится источником или стоком электронов и создает поверхность, на которой оказываются возможны окислительно-восстановительные химические реакции между

компонентами, присутствующими в самом электролите. Например, такие реакции:



Электродная реакция может происходить также между компонентами электролита и веществом, которое каким-то образом непрерывно доставляется к поверхности электронного проводника из стороннего источника. Известным примером является так называемый "*водородный электрод*". Электронным проводником тока в нём служит платиновая проволока, часть которой находится в трубке, заполненной водородом. Водород, хорошо растворяясь в платине, диффундирует вдоль проволоки и в местах контакта с электролитом может выходить наружу. Тогда на поверхности платины может протекать химическая реакция



Электронный проводник в контакте с ионным проводником, если на границе их раздела могут происходить окислительные или окислительно-восстановительные химические реакции, называют гальваническим электродом .

Гальванический электрод часто используют как элемент сенсоров, чувствительных к любому из факторов, существенно влияющих на величину электродного потенциала.

В качестве химически активных электронных проводников чаще всего применяют *Cu, In, Sr*, а в качестве химически инертных – *Pt, Pd, Au, Ag*, графит.

Электродный потенциал отдельного гальванического электрода нельзя измерить непосредственно. Но можно измерять разность потенциалов между двумя или несколькими последовательно соединенными гальваническими электродами. *Систему из двух электрически соединенных навстречу друг другу гальванических электродов* (рис. 15.1, б) называют электрохимическим элементом (или *электрохимической ячейкой*), а каждую из двух составляющих его частей называют также *полуэлементами*.

В электрохимическом элементе, чтобы реализовать встречное включение полуэлементов, электрически соединяют между собой электролиты E_1 и E_2 . Соединение это должно обеспечивать возможность протекания электрического тока, но препятствовать смешиванию электролитов. Другими словами, оно должно обеспечивать возможность переноса электрических зарядов (электронов и некоторых ионов), но препятствовать переносу большинства других ионов, особенно ионов анализа, т.е. ионов, концентрацию которых надо определить. Таким соединением может быть, например, пористая глиняная перегородка, через которую проникают электроны, но не проникает большинство ионов; могут быть стеклянная или полимерная мембрана, "соляной мостик".

Разность потенциалов между электродами M_1 и M_2 надо измерять очень высокоомным вольтметром, так чтобы протеканием электрического тока через него и смещением из-за этого равновесия электродных химических реакций можно было пренебречь.

15.2. Классификация электрохимических сенсоров

В электрохимических сенсорах чувствительным является именно электрохимический элемент. А первичные информационные сигналы об исследуемом объекте или явлении, возникают в виде изменения свойств этого элемента: разности потенциалов или электропроводности, электрического тока или вольтамперной характеристики, динамики их изменения. Физическая форма информационного сигнала и положена в основу классификации. В соответствии с ней различают следующие виды электрохимических сенсоров:

- *потенциометрические*, в которых первичные информационные сигналы возникают в виде изменения электрических потенциалов (а ток через сенсор пренебрежимо мал);
- *кондуктометрические*, в которых первичные информационные сигналы возникают в виде изменения электропроводности электрохимического элемента; их обобщением являются *импедансные*, в которых изменяются не только электропроводность, а и электрическая емкость элемента;

- *амперометрические*, в которых первичные информационные сигналы возникают в виде изменения электрического тока через *электрохимический элемент* при заданном значении напряжения; вариантом их являются *кулонометрические*, в которых измеряется не ток, а электрический заряд, прошедший через сенсор в течение заданного промежутка времени;
- *вольтамперометрические* и *хроноамперометрические*, в которых информацию получают, измеряя и анализируя вольтамперную характеристику электрохимического элемента и соответственно динамику изменения тока.

15.3. Селективность электрохимических сенсоров

Важной характеристикой электрохимических сенсоров является их селективность, т.е. способность обнаруживать и откликаться именно на тот вид ионов (или на ту группу ионов), который интересует пользователя. Обычно интересующие пользователя ионы называют "аналитом". Реакция на все другие виды ионов должна быть намного слабее. Как правило, в связи с этим электрохимические сенсоры и гальванические электроды (они же полуэлементы) характеризуют коэффициентами селективности относительно основных групп посторонних ионов.

Конечно, селективность электрохимического сенсора обеспечивают уже сама *природа основной электродной химической реакции* и, как отмечалось выше, *свойства перегородки (соединительного мостика) между электролитами*.

Но, кроме основной реакции, возле поверхности электродов могут параллельно протекать также химические реакции с участием других ионов, присутствующих в исследуемом растворе, которые могут сдвигать динамическое равновесие в ту или иную сторону. Чтобы уменьшить их влияние, применяют разнообразные химические методы.

Если виды наиболее мешающих посторонних ионов, которые могут присутствовать в пробе, заведомо известны, то принимают меры, чтобы минимизировать влияние именно этих ионов.

Например, в водных растворах могут сильно мешать ионы водорода (H^+). Если их концентрация является неконтролируемой, то это может существенно повлиять на результат измерений. Чтобы такого не

случилось, перед измерениями контролируют значение pH и, доливая т.н. " pH -буфер", доводят значение pH контролируемого раствора до заданного.

Для минимизации влияния других мешающих посторонних ионов к пробе добавляют растворы так называемых "*комплексонов*" – химических веществ, нацелено связывающих именно эти и только эти ионы. Вещества-комплексоны для связывания посторонних ионов иногда наносят также на пористую перегородку, разделяющую растворы полуэлементов электрохимического сенсора.

Универсальный метод повышения селективности электрохимического сенсора состоит в том, что к электролитам в обоих полуэлементах перед измерением добавляют *индифферентный* (не влияющий на определение концентрации аналита) *раствор*, в котором исследуемых ионов нет, а посторонние ионы, которые могут попасть в пробу, присутствуют в высокой, заведомо известной концентрации. Примесные посторонние ионы, случайно присутствующие во взятой для анализа пробе, смешиваясь с большим числом таких же ионов из индифферентного раствора, не могут существенно изменить их суммарную концентрацию и ионную силу. В обоих полуэлементах она остается приблизительно одинаковой, благодаря чему результат измерения решающим образом зависит лишь от концентрации контролируемого вида ионов.

Само собой разумеется, что количество долитых в пробу растворов внимательно контролируют и учитывают в расчетах при определении концентрации аналита. Такие электрохимические сенсоры, в которых приняты меры повышения селективности, называют *ионоселективными*.

Повысить селективность электрохимического сенсора можно также путем так называемой "*модификации*" электрода. Еще в 60-х годах XX века были разработаны модифицированные угольно-пастовые электроды. Для этого на кончик металлической (например, медной) проволоки или пластинки наносят пасту, полученную смешиванием графитового порошка, вяжущего вещества и нужного "модификатора". После затвердевания именно эта паста и используется для контактирования с исследуемым электролитом. "Модификатором" может быть активное вещество, селективно реагирующее с аналитом,

либо комплекс, который эффективно связывает ионы или молекулы аналита с поверхностью пасты.

Для модификации электрода на поверхности металлической проволоки или пленки часто формируют также специальное *полимерное покрытие из электропроводящих, ионообменных или редокс-полимеров*. В объем или на поверхность такого полимерного покрытия добавляют специфические вещества-модификаторы, содействующие "распознаванию" нужного аналита. Они могут вступать с ним в реакции образования комплексов, хелатов, использовать взаимодействия типа "фермент – субстрат", "антиген – антитело" и т.п. Такая модификация существенно влияет на ход электродных химических реакций: оказывает содействие реакциям с участием аналита и тормозит реакции, которые могут идти с участием посторонних ионов.

15.4. Потенциометрические электрохимические сенсоры

15.4.1. Концентрационная ячейка

Если в электрохимическом элементе, показанном на рис. 14.1, б, оба электрода одинаковы, а электролиты различаются лишь концентрацией в них ионов, принимающих участие в электродной реакции, причем в одном из полуэлементов концентрация этих ионов известна, то мы имеем дело с простейшим потенциометрическим электрохимическим сенсором – с т.н. "концентрационной ячейкой". По разности потенциалов ΔU между электродами такой ячейки можно определить неизвестную концентрацию с ионов в другом электролите. Согласно известному уравнению Нернста разность потенциалов пропорциональна логарифму концентрации:

$$\Delta U = K + S \lg (c/c_0) \quad (15.4)$$

где K и S – константы; c_0 – известная концентрация ионов в первом электролите. Константы K и S обычно определяют экспериментально при градуировке концентрационной ячейки, используя электролиты с наперед известной концентрацией ионов. Такой метод позволяет быстро определять неизвестную концентрацию ионов в широком диапазоне значений и отслеживать изменения этой концентрации.

Ситуация существенно усложняется, если концентрацию тех ионов, которые нас интересуют, надо определять в недостаточно контролируемой среде, в которой могут находиться также ионы других типов в неизвестных концентрациях. Методы преодоления этих трудностей, т.е. повышения селективности, описаны в предыдущем пункте.

15.4.2. Промышленные ионоселективные электроды

Ионоселективные гальванические электроды для обнаружения и измерения концентрации многих видов ионов в широком диапазоне (от 10^{-6} моль/л до 1 моль/л) в настоящее время выпускаются промышленно. Внешний вид некоторых из них показан на рис. 15.2, а. В их стеклянном или эпоксидном корпусе сформированы все необходимые составные части: соответствующий электрод сравнения с электролитом в виде геля, внешний электрод и полимерная или стеклянная мембрана между внутренним электролитом и внешним контролируемым раствором. С одного конца выведен тонкий гибкий электрический кабель, соединяющий электроды с измерительным блоком. Другой конец с внешним электродом и разделительной мембраной опускается в контролируемый раствор.



Рис. 15.2. Внешний вид: а) некоторых стандартных ионоселективных

гальванических электродов; б) типового портативного потенциометрического сенсора

Кроме наиболее употребительных *pH* электродов (селективных к ионам H^+), список промышленно выпускаемых гальванических электродов включает очень широкий спектр ионов-аналитов:

алюминий, аммоний, барий, бромид, ванадий, гидроксил, железо (отдельно двух- и трехвалентные ионы), йодид, кадмий, калий, кальций, карбоксид, карбонат, кобальт, литий, магний, медь (отдельно одно- или двухвалентная), натрий, никель, нитрат, нитрит, перхлорат, свинец, серебро, стронций, сульфат, сульфид, талий, титан, фосфат, фторид, фторборат, хлорид, цинк, цианид и много других.

Ныне преимущество все больше отдается твердым электродам на основе халькогенидов. Работы по совершенствованию промышленно выпускаемых ионоселективных электродов продолжаются во всем мире.

Измерительные блоки к ионоселективным электродам, которые тоже выпускаются промышленно, как правило, являются портативными. Внешний вид одного (типичного) из них показан на рис. 15.2, б. Этот прибор – *pH*-метр/милливольтметр Н-150 – имеет массу до 0,5 кг, размеры 195x98x40 мм, обеспечивает измерение разности потенциалов в диапазоне от –1000 до +1000 мВ с точностью ± 2 мВ. Это позволяет вместе с *pH* электродом определять показатель *pH* растворов в

диапазоне от 0 до 14 единиц с точностью $\pm 0,03$ единицы или с использованием стандартной термопары измерять температуру от 0 deg C до 100 deg C с точностью $\pm 0,5$ deg C.

15.4.3. Интеллектуальные потенциометрические сенсоры

Электронный измерительный блок можно сделать "интеллектуальным", введя в его состав микропроцессор. С помощью соответствующего микропрограммного обеспечения функции потенциометрического электрохимического сенсора в таком случае удастся значительно расширить. Он может взять на себя, например,

- обработку данных при калибровке (градуировке) ионоселективных электродов,
- построение калибровочных кривых или графиков,
- запоминание полученной калибровочной информации,
- автоматический расчет по данным измерения разности потенциалов концентраций ионов с учетом фактической температуры исследуемого раствора, с учетом его разбавления применяемыми корректирующими добавками и других побочных данных,
- фиксацию даты и времени измерения,
- накопление и форматирование данных, выдачу их в любых указанных пользователем единицах не только на свой цифровой дисплей, но и во внешний компьютер или в сеть связи.

Микропроцессор может выполнять всю вспомогательную рутинную расчетную работу, которую при пользовании простыми сенсорами должен выполнять специалист – химик-аналитик.

Интеллектуальный потенциометрический сенсор может работать не с одним, а со многими разными ионоселективными электродами как поочередно, так и одновременно – в зависимости от количества входов, на которое он рассчитан. Тогда, например, в исследуемом растворе, опустив в него десятки ионоселективных электродов, можно определить содержимое одновременно десятков разных видов ионов, интересующих пользователя.

Один из таких интеллектуальных потенциометрических сенсоров – *pH*-метр - измеритель ионов "ЭКОТЕСТ-120", выпускаемый российским научно-производственным объединением "Эконикс", – показан на рис. 15.3.

Его размеры 200x105x60 мм, масса 0,5 кг. Он предназначен для измерения показателей активности (*pH*, *pX*) либо массовой (или молярной) концентрации ионов, окислительно-восстановительного потенциала (*Eh*), температуры (*T*) в воде и в водных средах. Он пригоден также для использования в роли высокоомного вольтметра при измерениях химического потребления кислорода, при потенциометрическом титровании и при других потенциометрических измерениях по соответствующим методикам количественного химического анализа.

Сенсор рассчитан на использование в химико-технологических, агрохимических, экологических лабораториях промышленных и сельскохозяйственных предприятий, органов контроля, инспекции и надзора, в научно-исследовательских учреждениях – как в лабораторных, так и в промышленных и полевых условиях.



Рис. 15.3. Внешний вид электронного блока рН-метра

В памяти сенсора хранятся константы на 29 видов ионов (H^+ ; Cl^- ; Br^- ; J^- ; F^- ; Na^+ ; K^+ ; NH_4^+ ; NO_3^- ; AG^+ ; S^{2-} ; CU^{2+} ; Cd^{2+} ; Pb^{2+} ; Hg^{2+} ; Ba^{2+} ; CO_3^{2-} ; Cl_4^- ; Re_4^- ; $AuCl_4^-$; Zn^{2+} ; Fe_3^+ ; Ca^{2+} ; Mg^{2+} (жесткость) NPO_2^+ ; NO_2^- ; CN^- CNS^- ; Cr^{2-}_4), их названия, молярная масса, заряд. Имеется резерв памяти и для других видов ионов – по выбору пользователя. В памяти сохраняются также все данные последней калибровки электродов и

данные, необходимые для автоматической термокомпенсации результатов измерений. Сенсор имеет интерфейс RS-232C для выдачи накопленных результатов измерений в сеть и для приема данных от персонального компьютера.

В комплект сенсора входят как стандартные электроды (pH , редоксиметрический, хлорид-серебряный), так и набор ионоселективных электродов, термopара $Pt -1000$, все необходимые соединительные кабели. Прилагаются также от одного до трех коммутаторов на 8 выходов каждый, которые позволяют использовать сенсор и как многоканальный измеритель – до 24 каналов одновременно.

Изучение научно-технической литературы показывает, что выпускаемые промышленностью ионоселективные электроды и электрохимические интеллектуальные сенсоры на их основе вполне соответствуют требованиям к экспресс-анализам, обеспечивают нужные скорость, точность, низкую стоимость, простоту использования. Они широко применяются в химической промышленности, в промышленной гальванике для контроля за составом электролитов; в высокотехнологических производствах и в системах водоснабжения; для контроля за качеством питьевой воды в экологии и санитарии; для контроля за стоками предприятий и военных полигонов и т.д. Ионоселективные электроды могут широко применяться также для контроля качества напитков, молока и молочных продуктов, соков, масел.

Применение потенциометрического сенсора, чувствительного к содержанию кислорода, для автоматического отслеживания и регулирования состава воздуха в овощехранилищах о

15.4.4. Газочувствительные потенциометрические сенсоры

С помощью электрохимических сенсоров можно обнаруживать и определять не только концентрацию ионов в растворах. Косвенно, по изменению концентрации ионов, с их помощью можно обнаруживать присутствие и концентрацию в контролируемой среде также ряда нейтральных молекул. Одним из примеров являются так называемые "газочувствительные электроды". Принцип их действия показан на рис. 15.4.

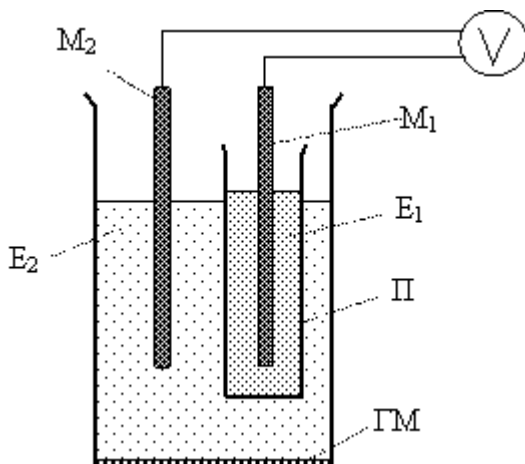
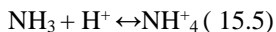


Рис. 15.4. Структура газочувствительного электрохимического сенсора: M1 и M2 – внутренний и внешний металлические электроды; E1 и E2 – внутренний и внешний электролит; П – пористая перегородка; ГМ – газопроницаемая мембрана

Важным структурным элементом потенциометрического газочувствительного сенсора является мембрана ГМ, отделяющая электролит "внешнего" полуэлемента от окружающей атмосферы. Мембрана эта является непроницаемой для электролита, но проницаемой для молекул контролируемых газов. Чем выше концентрация таких газов в окружающей атмосфере, тем больше их молекул проникают через мембрану ГМ в электролит и растворяются в нем. Если они вступают в химические реакции, то сдвигают динамическое равновесие в приэлектродной зоне, вследствие чего изменяется разность потенциалов между электродами.

Например, в электрохимическом газовом сенсоре, настроенном на обнаружение аммиака (NH_3) и на измерение его концентрации в окружающем воздухе, электролитом E₂ является водный раствор хлорида аммония (NH_4Cl) высокой концентрации, а мембрана ГМ сделана проницаемой для молекул аммиака. Проникая сквозь мембрану ГМ и растворяясь в воде, молекула аммиака может реагировать с присутствующими в ней ионами водорода (H^+) с образованием дополнительных ионов аммония:



Эта химическая реакция приводит к увеличению концентрации ионов NH_4^+ и к уменьшению концентрации ионов NH_3 в электролите, т.е. к изменению его pH . Дополнительно появившиеся ионы NH_4^+ в растворе высокой концентрации не оказывают большого влияния на суммарную концентрацию аммония. Поэтому основным показателем

наличия аммиака в окружающем воздухе является изменение pH раствора. Поэтому в качестве внутреннего в таком газовом сенсоре используют стеклянный -электрод. Расчет показывает, что изменение pH раствора пропорционально логарифму концентрации аммиака.

Такой же внутренний электрод используют, например, в электрохимических газовых сенсорах на CO_2 (внешним электролитом в этом случае является NaHCO_3 , реакция при растворении:

$\text{CO}_2 + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{HCO}_3^-$) в сенсорах на SO_2 внешним электролитом является NaHSO_3 , реакция при растворении: $\text{SO}_2 + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{HSO}_3^-$) и в других.

В электрохимических газовых сенсорах на HF внутренним является фтор-селективный электрод, на H_2S – соответственно S^{2-} -селективный электрод и т.д.

Одним из примеров интеллектуальных электрохимических газовых сенсоров является персональный газоанализатор ПГА-300 (рис. 15.5, а), предназначенный для применения на химически опасных производствах с целью индивидуальной защиты персонала.



Рис. 15.5. Персональный газоанализатор ПГА-300: а) общий вид; б) электрохимические газовые датчики; в) термокаталитический датчик

В зависимости от вставленных в него электрохимических газовых датчиков (рис. 15.5, б) он непрерывно измеряет концентрацию в окружающей среде одновременно двух газов. В комплект сенсора входят откалиброванные электрохимические газовые датчики на кислород, водород, NO_2 , SO_2 , CO , H_2S . По желанию покупателя комплект этот может быть значительно расширен. Датчики легко вынимаются и вставляются в гнезда на корпусе газоанализатора. Каждый из них имеет встроенную флэш-память, в которую записаны параметры его калибровки. После установки в гнездо нового датчика эти данные автоматически считываются микропроцессором и используются при обработке результатов измерения. Измеренные данные выводятся на дисплей и через установленные промежутки времени автоматически записываются и сохраняются в памяти прибора. При необходимости они могут быть переданы через интерфейс во внешний компьютер.

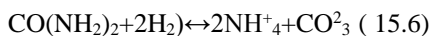
Для каждого из контролируемых газов устанавливается и сохраняется в памяти значение допустимой пороговой концентрации, при превышении которого выдается звуковая и/или световая сигнализация.

Размеры этого интеллектуального сенсора 160x80x30 мм, масса (с аккумулятором и двумя датчиками) – до 0,3 кг.

15.4.5. Потенциометрические биосенсоры

Оказалось, что при соответствующей модификации электрода или перегородки между электролитами потенциометрические электрохимические сенсоры способны и на большее. С их помощью можно, например, обнаруживать присутствие в контролируемой жидкости и определять концентрацию не только ионов, но и органических молекул, вирусов, микробов. С этой целью для модификации используют природные ферменты – особые органические молекулы, синтезированные и отобранные в ходе биологической эволюции. Они эффективно "распознают" интересующую пользователя молекулу или тело-аналит и содействуют ее химическому взаимодействию с другими ионами или молекулами. Такие вещества, выступающие в роли специфического катализатора, называют еще "энзимами", а сенсоры, в которых используются такие вещества, – "биосенсорами".

Одним из первых потенциометрических электрохимических биосенсоров был *биосенсор на мочевины*. Для этого на мембрану рН электрода был осажден фермент уреазы, добываемый из черных бобов. Этот фермент является эффективным катализатором биохимической реакции гидролиза мочевины:



Поэтому, если в контролируемом растворе присутствует мочевина, то при контакте с иммобилизованной на мембране уреазой она гидролизуется, и в растворе появляются дополнительные ионы NH_4^+ и CO_3^{2-} . Это приводит к изменению рН раствора, что и позволяет обнаруживать и измерять концентрацию мочевины.

Еще лучшие результаты дает применение гальванического электрода, чувствительного к ионам NH_4^+ , концентрация которых измеряется непосредственно. С помощью аммоний-селективного электрода обнаруживают и измеряют также концентрации таких важных биохимических веществ, как креатинин (применяя фермент креатиназу), фенилаланин (применяя фермент

фенилаланинаммиаклиазу), аденозин (фермент аденозиндезаминаза), аспартам (фермент L-аспартаза) и т.д.

Краткие итоги

Электрохимические сенсоры являются одним из подклассов электрических сенсоров. Но электрические сигналы возникают здесь в системе "электронный проводник - электролит" и являются настолько специфическими, что их обычно выделяют в отдельный класс. Различают следующие виды электрохимических сенсоров: потенциметрические, кондуктометрические (импедансные), амперометрические (кулонометрические), вольтамперометрические и хроноамперометрические.

Важной характеристикой электрохимических сенсоров является их селективность, т.е. способность обнаруживать и откликаться именно на тот вид ионов (или на ту группу ионов), который интересует пользователя. Селективность обеспечивают, во-первых, электродная химическая реакция и свойства перегородки между электролитами. Соединение электролитов в электрохимическом элементе должно обеспечивать возможность переноса электрического заряда, но препятствовать смешиванию электролитов, особенно переносу ионов-аналитов. Для повышения селективности применяют также такие химические методы, как "модификация" электродов, разбавление исследуемого раствора "рН-буфером", "индифферентным раствором" (не содержащем исследуемых ионов, но содержащем мешающие ионы в высокой, заведомо известной концентрации), добавление "комплексонов".

Простейшим потенциметрическим электрохимическим сенсором является "концентрационная ячейка" – электрохимический элемент, в котором оба электрода одинаковы, а электролиты различаются лишь концентрацией в них контролируемых ионов, причем в одном из них концентрация этих ионов известна. Неизвестную концентрацию контролируемых ионов в другом электролите можно определить согласно известному уравнению Нернста по разности потенциалов между электродами.

В настоящее время промышленно выпускают ионоселективные гальванические электроды для обнаружения и измерения концентрации большинства видов ионов в диапазоне от 10^{-6} до 1

моль/л, а также много видов потенциометрических сенсоров. Они обеспечивают достаточные скорость, точность, низкую стоимость, простоту использования, широко применяются в химической промышленности, в промышленной гальванике, в системах водоснабжения, в экологии и санитарии для контроля за качеством питьевой воды, за стоками предприятий и военных полигонов.

Микропроцессор, введенный в состав потенциометрического сенсора, может взять на себя всю вспомогательную работу, которую при пользовании простыми сенсорами должен выполнять специалист – химик-аналитик. Интеллектуальный потенциометрический сенсор может работать не с одним, а со многими разными ионоселективными электродами как поочередно, так и одновременно – в зависимости от количества входов, на которое он рассчитан. Тогда, опустив в исследуемый раствор десяток разных ионоселективных электродов, можно определить содержимое одновременно десятка разных видов ионов, интересующих пользователя.

Электрохимические сенсоры по изменению концентрации ионов могут обнаруживать присутствие и концентрацию в контролируемой среде также ряда нейтральных молекул. Одним из примеров являются "газочувствительные электроды", имеющие непроницаемую для электролита, но проницаемую для молекул контролируемых газов мембрану. Проникая сквозь мембрану в электролит, молекулы газа сдвигают динамическое равновесие, вследствие чего изменяется разность потенциалов между электродами.

В потенциометрических биосенсорах для селективного обнаружения и измерения концентрации молекул и микробиологических объектов используют природные ферменты, которые и обеспечивают избирательную реакцию электрохимической ячейки на соответствующий аналит.

16. Химически чувствительные полевые транзисторы и биосенсоры на их основе.

16.1. Электрохимические биосенсоры

"Принципы работы электрохимических сенсоров.

Потенциометрические сенсоры" мы закончили рассказом о потенциометрических биосенсорах, в которых в качестве модификатора применяют природные ферменты. Здесь мы продолжим эту тему и вкратце расскажем об электрохимических биосенсорах в целом. Ведь для "распознавания" аналита в электрохимических сенсорах, кроме ферментов, могут быть применены также и другие биологические структуры: нуклеиновые кислоты, антитела, живые клетки и даже живые рецепторы, взятые из животных, растений, микроорганизмов. Поскольку все они имеют биологическое происхождение, и именно они обеспечивают селективную реакцию на нужный аналит, то все такие структуры стали называть "биоселекторами". Имобилизованный (т.е. осажденный и закрепленный) на электроде или на мембране биоселектор при наличии в контролируемой среде аналита вступает с ним (и только с ним!) в специфическое взаимодействие. Биоселектор подбирают так, чтобы в результате взаимодействия с аналитом возникали (или, наоборот, расходовались) электрохимически активные продукты (ионы, аммиак, перекись водорода, фтор, CO_2 и т.п.). Изменение их концентрации улавливает селективно чувствительный к ним электрохимический элемент, вырабатывая соответствующий электрический сигнал. Этот сигнал усиливается и обрабатывается в электронном блоке.

Общая функциональная схема электрохимических биосенсоров показана на рис. 16.1.

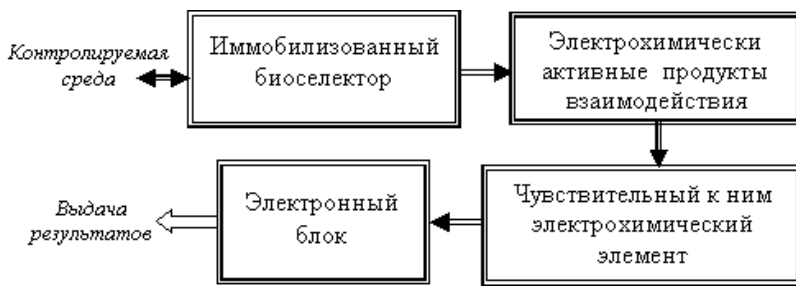


Рис. 16.1. Функциональная схема электрохимического биосенсора

При реализации электрохимических биосенсоров особенно перспективно воспользоваться одним из выдающихся достижений современной биотехнологии и биоинженерии, а именно – хорошо отработанными методами осаждения живых клеток на полимеры и на твердые подложки разной природы с целью организации управляемого биосинтеза, для анализа, для решения медицинских задач и т.п..

Живые клетки растений, животных и особенно микроорганизмов легко доступны, могут культивироваться и воссоздаваться в чистой культуре. В отличие, например, от ферментов здесь не нужны значительные затраты на выделение и очищение. Для многих видов клеток разработаны эффективные методы генетических манипуляций, позволяющие получать мутанты с высоким содержанием того или иного фермента либо белка. Особенности метаболизма клеток позволяют подбирать клетки как избирательно чувствительные к отдельным видам молекул, так и ориентированные на довольно широкие классы химических веществ (даже, например, на весь класс веществ, пригодных для биологического усвоения). Разработанные методы иммобилизации живых клеток позволяют поддерживать их жизнеспособность и активность в течение нескольких лет.

Особенно выигрышно сочетать преимущества живых клеток в качестве биоселекторов с преимуществами химически чувствительных полевых транзисторов, к описанию которых мы переходим.

16.2. Химически чувствительный полевой транзистор

16.2.1. Структура и принцип действия

Значительный вклад в совершенствование электрохимических сенсоров внесло применение МДП транзисторов, структура и принцип действия которых рассмотрены в "Сенсоры на полевых транзисторах и на приборах с отрицательной ВАХ. Газоразрядные сенсоры" (раздел 3). На рис. 16.2 показаны дополнительные элементы структуры, которые делают такой транзистор химически чувствительным. Вентильный электрод здесь может и отсутствовать. Вместо него на тонкий слой диэлектрика наносят чувствительную мембрану, которая и обеспечивает селективную реакцию транзистора на определенные химические вещества. Транзистор со всех сторон, кроме этой мембраны, защищают изолирующим компаундом, поверх которого наносят электрод сравнения.

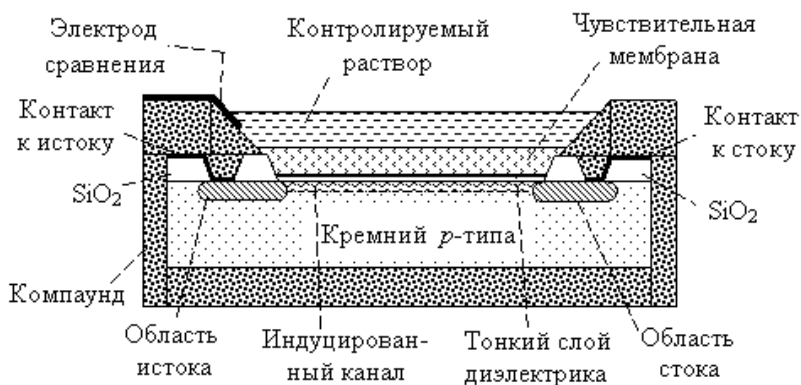


Рис. 16.2. Структура химически чувствительного полевого транзистора (ХЧПТ)

Перед измерением сверху на чувствительную мембрану капают небольшое количество контролируемого раствора так, чтобы он покрыл часть нанесенного поверх компаунда электрода сравнения. В другом варианте ХЧПТ погружают в контролируемый раствор.

При измерениях между электродом сравнения и основой из кремния *p*-типа подают постоянное напряжение смещения с таким расчетом,

чтобы при отсутствии в контролируемом растворе аналита в приповерхностной области кремния между истоком и стоком образовался тонкий индуцированный канал n -типа. Между истоком и стоком подают небольшое напряжение и измеряют электрический ток, который протекает через транзистор. Как описано в лекции 10, этот ток зависит от потенциала на затворе транзистора. В данном случае роль затвора играет химически чувствительная мембрана. Как только в контролируемом растворе появляется аналит или возрастает его концентрация, то изменяется перепад потенциала на электроде сравнения и потенциал чувствительной мембраны. Это приводит к соответствующему изменению электрического тока через транзистор, которое легко измеряется.

Преимуществами ХЧПТ как электрохимического сенсора являются обычно присущая ему высокая чувствительность, малые габариты и энергопотребление, возможность формирования на том же кристалле кремния в едином технологическом процессе также всех электронных схем, необходимых для обработки полученных сигналов, для уменьшения влияния помех и шумов, для термокомпенсации. Преимуществами являются, конечно, и относительно небольшая цена, и малый требуемый объем пробы.

16.2.2. Ионоселективный полевой транзистор

Чтобы повысить селективность химически чувствительного полевого транзистора по отношению к определенному виду ионов, используют разные способы, в первую очередь, – модификацию. Например, достаточно селективный отклик на ионы водорода H^+ получают заменой тонкого слоя окисла над инверсионной областью МДП транзистора на тонкий слой нитрида кремния (Si_3N_4). Такой транзистор называют " pH -селективным".

Натрий (Na^+)-селективный полевой транзистор формируют посредством нанесения на тонкий слой подзатворного диэлектрика боросиликатного стекла нужного состава.

Если на тонкий слой диэлектрика нанести полимерную пленку с примесью валиномицина или краун-эфира, то полевой транзистор становится калий (K^+)-селективным.

Если же полимерную пленку модифицировать *n*-(1,1,3,3-тетраметил-бутил)-фенилфосфорной кислотой, то полевой транзистор становится Ca^+ -селективным. Модифицированные таким образом полевые транзисторы называют ионоселективными (сокращенно "ИСПТ"). В литературе описан миниатюрный потенциометрический сенсор на ИСПТ, предназначенный для одновременного измерения в контролируемом растворе концентрации 4-х вышеупомянутых видов ионов. Этот мультисенсор состоит из пяти ИСПТ, сформированных на одном кристалле кремния (рис. 16.3). Один из них является *pH*-селективным, второй – натрий-селективным, третий – калий-селективным, четвертый – кальций-селективным. Пятый используется в качестве опорного полевого транзистора, затвор которого выполняет роль электрода сравнения. На этом же кристалле кремния сформированы также все необходимые электронные схемы обработки и усиления измерительных сигналов. Весь кристалл с внешними выводами, кроме зоны – контролируемым раствором, защищают изолирующим компаундом. При измерениях кристалл на некоторое время опускают в контролируемый раствор или капают на него контролируемый раствор сверху. Внешние выводы соединены с небольшим электронным блоком, на дисплей которого и выводятся результаты измерения.

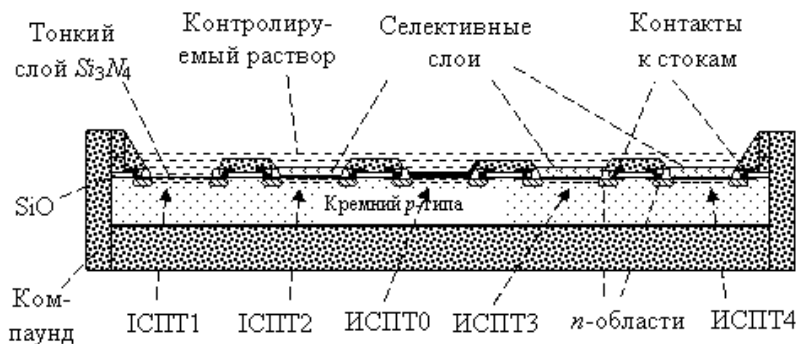


Рис. 16.3. "Линейка" из пяти ионоселективных полевых транзисторов: ИСПТ0 – опорный полевой транзистор; ИСПТ1 – *pH*-чувствительный полевой транзистор; ИСПТ2 – Na^+ -селективный полевой транзистор; ИСПТ3 – калий-селективный полевой транзистор; ИСПТ4 – кальций-селективный полевой транзистор

16.2.3. Биоселективный полевой транзистор

Представим теперь себе, что на чувствительной поверхности ХЧПТ методами биоинженерии и микробиологии, высажена живая клетка, избирательно реагирующая на то или иное внешнее влияние, и что естественная реакция высаженной клетки на это влияние изменяет электрический ток через ХЧПТ. Это может происходить как непосредственно, если реакция высаженной клетки состоит в изменении ее собственного электрического потенциала, а значит, и потенциала затвора ХЧПТ, так и опосредованно, если клетка реагирует на внешнее влияние рядом биохимических реакций, продукты которых являются электрохимически активными. Вследствие этого мы получаем очень чувствительный биоэлектронный сенсор. Учитывая очень малые размеры как ХЧПТ, так и осаждаемых на них клеточек-рецепторов, на одном кристалле кремния можно создать довольно большой массив чувствительных к разным анализатам сенсоров. Тогда кристалл параллельно будет собирать информацию о довольно детальном химическом составе внешней среды и об изменениях, которые в ней происходят. А созданный на основе такого массива интеллектуальный электрохимический биосенсор будет соответствующим образом обрабатывать всю эту информацию и выдавать ее в готовом виде пользователю или в компьютерную сеть. Создание таких интеллектуальных сенсоров стало уже делом сегодняшней науки и технологии.

16.3. Кондуктометрические и импедансные сенсоры

16.3.1. Принцип действия

Электропроводность и электрическое сопротивление электрохимического элемента прямо зависят от электрического заряда, концентрации и подвижности ионов в электролите. Поэтому при изменении концентрации, заряда или состава ионов в исследуемом растворе соответственно изменяется и его электропроводность. Однако измерить электропроводность раствора можно, только опустив в него электроды. При этом возникают проблемы, связанные с электродными потенциалами, с возникновением и перезарядкой двойного электрического слоя на границе раздела "электронный проводник - ионный проводник", а также с явлениями электролиза. Это особенно существенно при измерениях на постоянном токе.

Поэтому электропроводность электрохимического элемента измеряют обычно в режиме переменного тока. В таком режиме на электродах периодически происходит быстрое изменение поляризации, и благодаря этому течет стационарный переменный ток. Измеряется так называемый "адмитанс" – модуль комплексного числа, действительной частью которого является омическая проводимость, а мнимой – емкостная проводимость. Частотная зависимость адмитанса может давать дополнительную ценную информацию о составе контролируемого раствора. Если заведомо известно, что в нем может изменяться концентрация лишь одного определенного вида ионов, то кондуктометрические измерения оказываются очень эффективными. Если же неконтролируемыми являются также концентрации других видов ионов, то влияние одного из них вычленить достаточно трудно. В этом и состоит основной недостаток кондуктометрических сенсоров.

16.3.2. Кондуктометры

Промышленно выпускают в основном кондуктометры для контроля общего качества питьевой, натуральной, деионизованной, дистиллированной и бидистиллированной воды, для определения общей минерализации технических и минеральных вод, для проверки качества обессоливания морской воды и для т.п. целей. В таких применениях селективность сенсора к какому-то определенному виду ионов не так важна.

Интеллектуальные кондуктометры автоматически измеряют также температуру воды и учитывают ее при расчетах общего содержания солей, могут протоколировать результаты измерений, вести круглосуточный мониторинг, передавать накопленные результаты измерений в компьютерную сеть, сигнализировать об обнаруживаемых значительных отклонениях и т.д.

Если в кондуктометре имеется биоселективная мембрана, то наблюдение за изменениями электропроводности контролируемого раствора позволяет следить за ходом соответствующих биохимических реакций. Например, химические реакции с участием фермента амидазы сопровождаются появлением в растворе новых ионных групп, что приводит к увеличению электропроводности. Химические реакции с участием ферментов дегидрогеназы и декарбоксилазы способствуют пространственному разделению электрических зарядов, что вызывает изменения электрической ёмкости и соответственно ёмкостной

проводимости. Химические реакции с участием фермента эстеразы способствует миграции протонов, что тоже увеличивает электропроводность. И по изменению электропроводности все эти процессы можно точно отслеживать.

Кондуктометрические биосенсоры используют также для определения концентрации ряда важных веществ, например, мочевины и ацетилхолина, и даже для определения концентраций одновременно нескольких веществ. Уже разработаны кондуктометрические биосенсоры, способные зарегистрировать даже незначительные загрязнения воды антибиотиками, фосфорорганическими пестицидами, гипохлоритом, цианидами и т.д. Их применяют для контроля биотехнологических процессов, в экологии, в фармакологии.

Описан, например, кондуктометрический электрохимический биосенсор на основе иммобилизованных холинэстераз для определения концентраций фосфорорганических и карбаматных пестицидов, гипохлорита, общей токсичности воды, а также гликоалкалоидов – нежелательных натуральных токсических веществ, иногда содержащихся в картофеле, в томатах и в баклажанах.

16.3.3. Кондуктометрические и импедансные газовые сенсоры

В "Физические основы работы и классификация электрических сенсоров. Резистивные, емкостные и импедансные сенсоры" речь шла об импедансных газовых сенсорах на основе окислов и нитридов металлов, изменяющих свои электрические сопротивление и ёмкость при абсорбции некоторых газов. Хотя физическая абсорбция молекул газов на поверхности обусловлена относительно слабыми силами, в ходе более глубоких исследований постепенно становится понятным, что для их работы важна не просто физическая сорбция. На самом деле она почти всегда сопровождается рядом существенных физико-химических превращений. Это – разрыв одних и образование новых слабых связей, изменение зарядового состояния примесных и поверхностных энергетических уровней, нередко даже ионизация атомов. Молекулы разных газов имеют не одинаковое сродство с электронами. Одни из них (O_2 , O_3 , Cl_2) и др.) являются сильными окислителями и легко захватывают электроны из поверхностного слоя окисла, из-за чего его электропроводность уменьшается. Другие (H_2 , CO , CH_4 , C_2H_5OH , ...) являются сильными восстановителями и легко отдают свои электроны, из-за чего электропроводность окисла

возрастает. Изменения электропроводности проявляются тем сильнее, чем более развита поверхность окисла. В силу этого чувствительность сенсора оказывается тем выше, чем более мелкозернистую структуру имеет окисел и чем больше в нем так называемая "дебаевская глубина экранирования". Для повышения чувствительности часто используют смеси разных окислов, нацелено вводят химически активные примесные атомы. Например, для повышения чувствительности к водороду вводят примеси палладия или платины, атомы которых известны своими каталитическими свойствами относительно химических реакций с участием водорода. Примесные атомы меди повышают чувствительность к H_2S и SO_2 , поскольку атомы меди легко образуют неустойчивые химические связи с атомами серы.

Чем дальше, тем больше выясняется то, что полупроводниковые газовые сенсоры на самом деле почти всегда являются электрохимическими, поскольку тесно связаны с электрохимическими взаимодействиями поверхностного слоя мелкокристаллического полупроводника с молекулами газов, абсорбированными на его поверхности при контакте с атмосферой. Отличие состоит только в том, что эти взаимодействия происходят не возле электродов, как в классических электрохимических сенсорах, а на поверхностях раздела кристаллических зерен. Это дает основание отнести полупроводниковые газовые сенсоры к классу электрохимических.

Связанные с поверхностью полупроводника молекулы газа при комнатных температурах довольно прочно удерживаются. Поэтому для того, чтобы полупроводниковые газовые сенсоры были пригодны к новым измерениям, их надо восстанавливать, удаляя с их поверхности уже адсорбированные молекулы газов. Для этого в конструкцию таких сенсоров обязательно вводят тонкоплёночные нагреватели. При нагревании поверхности сенсора до температуры, при которой относительно слабые временные связи разрываются, происходит десорбция молекул газа. И спустя некоторое время сенсор становится пригодным к проведению новых измерений.

Нагреватели создают также возможность повышения селективности сенсора. Дело в том, что чувствительность сенсора к разным газам с ростом температуры изменяется по-разному. Эта зависимость всегда имеет вид кривой с максимумом. Например, максимальная чувствительность SnO_2 к водороду наблюдается при температуре 320 deg C, к этиловому спирту – при 330 deg C, к ацетону – при 360%deg;C.

Поэтому, изменяя с помощью пленочного микронагревателя температуру окисла и измеряя импеданс при разных температурах, можно вычленить влияние разных газов, "узнавать" и различать их.

Полупроводниковые газовые сенсоры ныне способны обнаруживать присутствие в воздухе посторонних газов на уровне единиц *ppm* (пропромилле = 10^{-4} объемных %) и даже единиц *ppb* (одна миллиардная часть). Область применения их очень широка. Это и портативные сенсоры-индикаторы присутствия вредных газов, которые предупреждают об опасности в шахтах, на химических предприятиях или на складах. Это также портативные приборы, которые в первые же секунды фиксируют утечку в помещение бытового газа, предупреждают звуковым сигналом о возникшей угрозе и могут дать команду соответствующему электронному блоку на автоматическое перекрытие газовой магистрали. Это и приборы для экспресс-определения степени алкогольной интоксикации человека путем анализа выдыхаемого им воздуха. Это и специальные сенсоры, чувствительные к боевым отравляющим, взрывчатым, наркотическим, психотропным веществам, которые позволяют своевременно обнаруживать их присутствие и предупреждать дальнейшее их распространение или применение.

Во многих публикациях речь идет также об интеллектуальных сенсорах типа "электронный нос", которые якобы точнее профессионалов могут анализировать состав духов, лучше собак улавливать некоторые слабые запахи и отслеживать по ним следы человека или животных. Анализируя состав выдыхаемого человеком воздуха, они могут диагностировать некоторые желудочные и лёгочные заболевания. Стоит, однако, предостеречь, что селективность существующих сегодня полупроводниковых газовых сенсоров для таких применений еще недостаточна. Требуемые для этого селективность и чувствительность могут обеспечить сейчас только биологические сенсоры.

В последнее десятилетие активизировались работы, направленные на применение для создания "электронного носа" естественных обонятельных рецепторов животных. В частности, уже описана технология иммобилизации обонятельных рецепторов человека NP 1740 и показано, что в электрохимическом импедансном сенсоре с таким рецептором при оптимальном потенциале поляризации путем измерения его импеданса на разных частотах удается надежно

обнаруживать присутствие специфического лиганда (альдегид *Helional*

) в концентрациях меньше 10^{-10} моль! Продемонстрирована и высокая селективность биосенсора с таким рецептором: внесение похожего, но не специфического лиганда – гептанала – в тех же условиях не приводило к изменениям импеданса.

16.4. Амперометрические и кулонометрические сенсоры

16.4.1. Принцип действия

Если к электродам электрохимического элемента приложить внешнее напряжение, превышающее величину их электродного потенциала, то динамическое равновесие между прямыми и обратными химическими реакциями возле электродов нарушается, и через элемент начинает течь электрический ток. Сначала этот ток быстро уменьшается со временем (рис. 16.4).

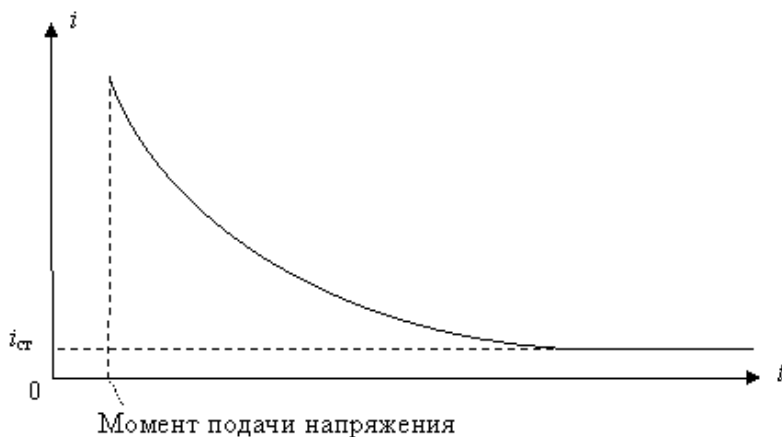


Рис. 16.4. Типичная временная зависимость тока через электрохимический элемент после подачи напряжения

Это обусловлено тем, что ионы, которые находятся вблизи электрода, сразу вступают в химическую реакцию, их концентрация здесь быстро уменьшается и становится значительно ниже, чем в основном объеме электролита. Из-за уменьшения концентрации ионов возле электрода

уменьшаются скорость реакции и обусловленный ею электрический ток (поток электрических зарядов).

Возникающий вследствие обеднения прикатодной области градиент концентрации ионов в электролите и стимулирует диффузию ионов из объема к электроду. К этому добавляется также дрейф ионов под действием слабого электрического поля, возникающего в электролите. И со временем устанавливается новое динамическое равновесие, когда количество ионов, вступающих за единицу времени в химические реакции возле электродов, сравнивается с количеством ионов, которые подходят к электродам из объема электролита посредством диффузии и дрейфа. Электрический ток перестает изменяться. Этот стационарный электрический ток $i_{ст}$ пропорционален концентрации ионов в электролите. И измеряя его, после соответствующей калибровки сенсора, можно достаточно точно определять концентрацию ионов в исследуемом растворе.

16.4.2. Кислородный электрод Кларка

В качестве примера простого амперометрического сенсора рассмотрим предложенную Л. Кларком в середине XX в. конструкцию гальванического электрода для определения концентрации кислорода в окружающей среде (рис. 16.5).

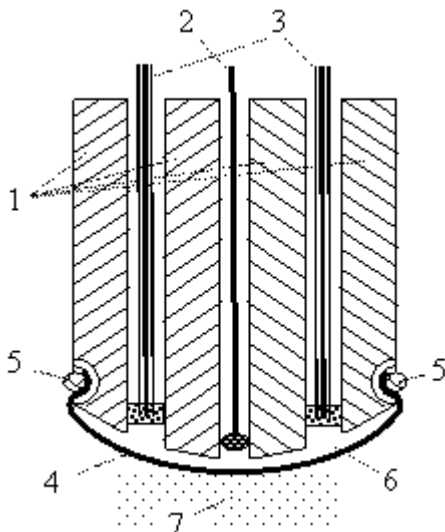
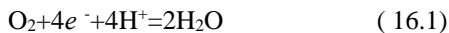


Рис. 16.5. Конструкция "кислородного" амперометрического сенсора Кларка

В пластмассовом цилиндрическом корпусе 1 сделаны сквозные отверстия для проводников, в которых размещены индикаторный (рабочий) электрод 2 из платины и электрод сравнения 3 из серебряных проволок, концы которых покрыты пастой из хлорида серебра. Нижний конец корпуса обтягивают газопроницаемой полимерной мембраной 4 из полипропилена (полиэтилена, фторопласта, целлофана и т.п.), которую механически фиксируют на корпусе с помощью резинового кольца 5. В пространство между электродами и мембраной залит водный раствор хлорида кальция 6. Извне мембрана 4 контактирует с контролируемой средой 7. Это может быть как жидкость, так и газ.

Если в контролируемой среде кислорода нет, то при подаче напряжения между электродом сравнения (анод) и рабочим электродом установившийся стационарный ток очень слаб. При наличии в контролируемой среде кислорода его молекулы диффундируют сквозь мембрану 4 и через раствор 6. Когда они достигают индикаторного электрода 2, то благодаря каталитическим свойствам платины здесь происходит реакция восстановления



вследствие которой ток через электрохимический элемент значительно возрастает.

Стационарный ток линейно зависит от концентрации кислорода в контролируемой среде. Этим данный сенсор существенно отличается от потенциометрических газовых сенсоров, у которых разность электродных потенциалов зависит от концентрации газа логарифмически. Соответственно в амперометрических газовых сенсорах диапазон измеряемых концентраций более узок, чувствительность ниже, но точность определения концентрации в рабочем диапазоне выше. Рабочий диапазон измеряемых концентраций, кроме конструктивных факторов, можно регулировать также, изменяя величину приложенного напряжения.

16.4.3. Другие амперометрические сенсоры

Специально подбирая материал электродов, состав внутреннего электролита, электродное напряжение, удается построить амперометрические сенсоры подобной конструкции также для определения концентраций таких газов, как хлор, сероводород, серный газ, водород, угарный газ, окислы азота и т.д. Такие "готовые к применению" гальванические электроды уже выпускаются промышленно. На рис. 16.6 в качестве примера показаны 2 промышленно выпускаемых гальванических электрода.

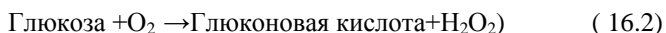


Рис. 16.6. Образцы готовых промышленных электродов для амперометрических сенсоров

Электрод слева – платиновый, помещен в стеклянный корпус с соответствующим гелем внутри и газопроницаемой мембраной. Имеет внешний вывод в виде кабеля длиной до 9 м. Используется для контроля воды в бассейнах, хроматных и др. растворов в промышленности. Гальванический электрод справа выполнен в

эпоксидном корпусе длиной 110 мм, диаметром 12 мм и предназначен для измерения содержания кислорода в жидких средах.

Для повышения селективности амперометрических электрохимических сенсоров и расширения палитры контролируемых молекул-аналитов чаще всего используют катализаторы соответствующих химических реакций, в частности ферменты естественного происхождения. Рассмотрим один из первых амперометрических биосенсоров для определения концентрации глюкозы. С этой целью на газопроницаемую мембрану, отделяющую исследуемый раствор от окружающего воздуха, наносили полиакриламидный гель с иммобилизованной в нем глюкозооксидазой. В ее присутствии молекулы кислорода, проникающие сквозь газопроницаемую мембрану, реагируют с имеющейся в исследуемом растворе глюкозой:



Молекулы перекиси водорода мигрируют к платиновому катоду, где восстанавливаются. Если растворенного в геле кислорода достаточно, то электрический ток, протекающий через такой электрохимический элемент, пропорционален концентрации глюкозы в контролируемом растворе.

Позже конструкция и способы функционирования амперометрических сенсоров *глюкозы* были значительно усовершенствованы. Однако в основе их работы по-прежнему остается использование глюкозооксидазы. Это – доступный, недорогой фермент, который добывают из *Aspergillus niger* и который долго сохраняет свои свойства. Благодаря этому удалось создать и выпускать промышленно наборы одноразовых электрохимических "полосок" для анализов крови на глюкозу с гарантированным сроком использования до 1 года.

С применением холестериноксидазы созданы амперометрические сенсоры для определения содержания холестерина (важный показатель крови и продуктов питания, который влияет на риск возникновения и на ход заболевания атеросклерозом). С использованием лактатоксидазы или лактатгидрогеназы работают амперометрические сенсоры на лактат (важный для медиков показатель мышечной деятельности), с использованием салицилатгидроксилазы – сенсор на содержание аспирина, с использованием ацетилхолинэстеразы –

амперометрический сенсор на такие нейротоксины, как зарин, зоман, V_x и прочие.

С применением в качестве биоселекторов соответствующих дезоксирибонуклеиновых кислот (ДНК) созданы электрохимические биосенсоры для выявления ряда инфекционных и врожденных заболеваний.

Для точных амперометрических исследований и измерений часто используют трехэлектродную электрохимическую ячейку, включающую, кроме электродов, через которые протекает основной электрический ток, также 3-й электрод ("электрод сравнения"), необходимый для точного поддержания неизменным напряжения между рабочими электродами.

16.4.4. Кулонометрические сенсоры

Одним из вариантов амперометрических сенсоров являются кулонометрические сенсоры, в которых электрический ток, протекающий через электрохимический элемент, интегрируется в течение определенного промежутка времени, т.е. измеряется суммарный электрический заряд, протекающий через элемент. Это позволяет дополнительно отфильтровать случайные отклонения, повысить чувствительность сенсора, сократить время измерения и энергозатраты.

На рис. 16.7 для примера показан один из современных интеллектуальных кулонометрических сенсоров, предназначенный для повседневного измерения уровня сахара в крови человека. Его размеры 97x51x25 мм, масса вместе с батареей питания 58 г. Одной зарядки литиевой батарейки хватает на проведение 1000 измерений.



Рис. 16.7. Кулонометрический сенсор "FreeStyle" для измерения уровня глюкозы в крови

Для проведения измерения требуется мизерная капля крови объёмом до 0,3 мкл, которую можно взять из любой части тела, и одноразовая тестовая полоска этой же фирмы. Каждая полоска представляет собой промышленно изготовленный миниатюрный электрохимический элемент с пористой матрицей для исследуемого электролита (крови) и печатными электродами, модифицированными ферментом глюкозооксидазой. В нижней части полоски темные полукруглые участки, которые соединены с матрицей для электролита системой капилляров. Вдоль этих капилляров кровь пациента под действием сил поверхностного натяжения автоматически втягивается в чувствительное аналитическое пространство между электродами. В верхней части тестовой полоски находятся внешние выводы

электрохимического элемента. Для контакта с ними снизу в корпусе глюкометра предусмотрен фиксатор. Если тестовая полоска правильно вставлена в фиксатор, то глюкометр автоматически включается, и на его жидкокристаллическом дисплее высвечивается код тестовой полоски. Если он не совпадает с указанным на полоске, то с помощью клавиш управления надо установить нужный код. В комплекте глюкометра имеется ланцет "FreeStyle", который позволяет установить одно из пяти значений глубины прокалывания – в зависимости от намеченного места забора капли крови. Пружину ланцета легко взвести. Специальные насадки обеспечивают точность глубины прокалывания, которое происходит мгновенно и практически безболезненно. Каплю капиллярной крови, которая выступила в месте прокола, надо приложить к одному из полукруглых рабочих полей, не размазывая. Тестовая полоска (благодаря капиллярным силам) всасывает требуемое количество крови, о чем глюкометр извещает коротким звуковым сигналом. Кровь становится в приборе контролируемым раствором. Контактная с глюкозооксидазой, глюкоза, имеющаяся в крови, окисляется. В электрохимическом элементе выделяется небольшое количество перекиси водорода, пропорциональное количеству имеющейся в крови глюкозы, и через элемент протекает пропорциональный этому количеству электрический заряд. Он измеряется сенсором, в микропроцессоре которого рассчитывается (с учетом кода полоски, найденных при калибровке констант и фактической температуры полоски) концентрация глюкозы в крови пациента. И через несколько секунд результат измерения выводится на дисплей. По выбору пользователя результат может выводиться в привычных для него единицах: в мг % (мг глюкозы на 1 дл крови) или в ммоль/л. Доступный для измерений диапазон концентраций составляет от 20 мг % до 500 мг % или от 1,1 ммоль/л до 27,8 ммоль/л. Сенсор автоматически запоминает дату, время и результат измерения, накапливает статистику (до 250 последних результатов), может выдавать статистические и детальные данные на дисплей или через порт передачи на внешний компьютер или в информационную сеть. При критических значениях концентрации глюкозы в крови сенсор выдает диагностические предупреждения о гипо- или гипергликемии и необходимости в связи с этим обратиться к врачу. В микропроцессоре сенсора записаны также программы самодиагностики, калибровки с помощью контрольного раствора или эталонных тестовых полосок, настройки даты, времени, единиц измерения, громкости звуковых сигналов и т.п. С целью экономии энергии аккумуляторной батареи, заряда которой хватает

приблизительно на 1000 измерений, сенсор, если он свыше 2 мин. не используется, автоматически выключается.

Ныне промышленно выпускаются и десятки других кулонометрических сенсоров глюкозы.

Краткие итоги

Для "распознавания" аналита в электрохимических сенсорах, кроме ферментов, могут быть применены также и другие биологические структуры, называемые " биоселекторами ": нуклеиновые кислоты, антитела, живые клетки и даже готовые живые рецепторы. Имобилизованный на электроде или на мембране биоселектор при наличии в контролируемой среде аналита вступает с ним (и только с ним!) в специфическое взаимодействие. Биоселектор подбирают так, чтобы в результате взаимодействия с аналитом возникали (или расходовались) электрохимически активные продукты (ионы, аммиак, CO_2 и т.п.). Изменение их концентрации улавливает чувствительный к ним электрохимический элемент, вырабатывая соответствующий сигнал. Особенно выигрышно использовать в качестве биоселектора живые клетки. Они легко доступны, могут культивироваться и воссоздаваться в чистой культуре, не требуют больших затрат на выделение и очистку. Разработанные методы иммобилизации живых клеток позволяют поддерживать их жизнеспособность и активность в течение нескольких лет.

Значительный вклад в совершенствование электрохимических сенсоров внесло применение полевых транзисторов. Чтобы сделать их химически чувствительными, на тонкий подзатворный слой диэлектрика высаживают химически чувствительный слой или/и биоселектор. Преимуществами химически чувствительных полевых транзисторов (ХЧПТ) являются малые габариты и энергопотребление, возможность формирования на том же кристалле кремния также электронных схем для обработки полученных сигналов, небольшая цена сенсора и малый требуемый объем пробы.

В кондуктометрических и импедансных сенсорах электропроводность измеряют обычно на переменном токе. В таком режиме на электродах периодически происходит изменение поляризации, благодаря чему течет стационарный переменный ток. Частотная зависимость электропроводности (импеданса) сенсора может давать

дополнительную ценную информацию о составе контролируемой среды. Промышленно выпускаются кондуктометры для контроля общего качества питьевой, натуральной, дистиллированной, бидистиллированной, деионизованной воды, для определения общей минерализации технических и минеральных вод, для проверки качества обессоливания морской воды и т.п. целей.

Кондуктометрические биосенсоры используют также для определения концентрации мочевины и ацетилхолина, регистрации загрязнений воды антибиотиками, пестицидами, гипохлоритом, цианидами и т.д.

Более глубокие исследования показали, что импедансные газовые сенсоры на основе окислов и нитридов металлов, механизм действия которых раньше связывали только с физической абсорбцией молекул газов, на самом деле сложнее. Абсорбция почти всегда сопровождается электрохимическим взаимодействием мелкокристаллического полупроводника с молекулами газов. Это дает основание отнести полупроводниковые газовые сенсоры к классу электрохимических.

В последнее десятилетие активизировались работы, направленные на применение для создания искусственного "электронного носа" естественных обонятельных рецепторов животных, осаждаемых на электрохимические элементы.

Если к электродам электрохимического элемента приложить внешнее напряжение, превышающее величину их электродного потенциала, то через элемент течет электрический ток. Устанавливающееся через некоторое время стационарное значение тока пропорционально концентрации ионов в исследуемом растворе, что отличает амперометрические сенсоры от потенциометрических, в которых разность потенциалов пропорциональна логарифму концентрации. Линейность позволяет точнее определять концентрацию ионов в исследуемом растворе, хотя и сужает динамический диапазон измерений. С применением природных ферментов созданы амперометрические сенсоры для определения содержания холестерина, аспирина, лактата, ряда нейротоксинов.

Вариантом амперометрических сенсоров являются кулонометрические сенсоры, в которых вместо тока, измеряется электрический заряд, протекающий через элемент. Кулонометрический метод, в частности, используется в широко представленных сегодня на рынке портативных

глюкометрах для определения концентрации сахара в крови с применением т.н. "тестовых полосок".

17. Вольтамперометрические и хроноамперометрические сенсоры.

17.1. Вольтамперометрические сенсоры

С целью повышения информативности электрохимического метода применяют вольтамперометрию – наблюдение за изменением (при изменениях состава контролируемого раствора) вольтамперной характеристики ("вольтамперограммы"), т.е. зависимости электрического тока через электрохимический элемент от приложенного напряжения.

Для записи вольтамперограммы контролируемый раствор заливают в электрохимическую ячейку с двумя или тремя электродами. Один из них ("измерительный" или "индикаторный") имеет относительно небольшие размеры. Площадь поверхности второго ("вспомогательного") намного больше, чтобы при протекании тока перепад потенциала на нем практически не изменялся. Как правило, в контролируемый раствор добавляют индифферентный электролит большой концентрации, чтобы уменьшить падение напряжения на его омическом сопротивлении. Для полной компенсации омического падения напряжения на электролите иногда применяют третий электрод ("электрод сравнения") и потенциостатирование.

В простейшем случае, прикладывая к электродам пошагово всё большее внешнее напряжение и измеряя протекающий ток, снимают "статическую" вольтамперную характеристику. Уже по ней можно судить о составе контролируемого раствора. Дело в том, что каждый вид ионов имеет свой характерный электрохимический потенциал. При постепенном повышении потенциала на измерительном электроде в электродную химическую реакцию вступают сначала ионы с наименьшим электрохимическим потенциалом. Это приводит к возрастанию тока. По набору потенциалов, при которых имеет место возрастание тока, можно судить о видах присутствующих в

контролируемом растворе ионов. А по высоте пиков тока можно судить о концентрации соответствующего вида ионов в растворе. Ведь чем выше их концентрация, тем интенсивнее происходит электродная реакция, и тем больше протекающий ток.

При длительном использовании измерительного электрода в таком режиме на нем постепенно накапливаются продукты электролиза, которые начинают влиять на результаты измерений. Чтобы избавиться от этого, применяют индикаторные электроды из жидкого металла. Чаще всего это чистая ртуть или амальгама, заливаемая в стеклянный капилляр, из которого под действием силы тяжести происходит периодическое выкапывание и автоматическое обновление поверхности электрода. Такой электрод называют "ртутным" или "капельным". А разновидность вольтамперометрии с применением ртутного (капельного) электрода принято называть полярографией. В качестве вспомогательного электрода используют обычно каломельный или хлорсеребряный электроды.

Описанный метод "статической" вольтамперометрии и полярографии позволяет определять присутствие в растворе ионов в концентрациях от 10^{-5} моль/л и выше.

При вольтамперометрии с линейной разверткой потенциала приложенное к электродам напряжение линейно возрастает со временем от одного до другого заданного значения, и отслеживаются изменения тока. Благодаря ускорению процесса наращивания потенциала и возможности дифференцировать получаемый сигнал по времени удается повысить чувствительность метода до 10^{-6} моль/л.

Дальнейшим развитием метода стала так называемая "циклическая вольтамперометрия". При этом методе приложенное к электродам напряжение сначала линейно нарастет (рис. 17.1, а), а после достижения максимального значения – линейно убывает до исходного значения. И в процессе изменений измеряют зависимость тока от напряжения (рис. 17.1, б). Относительно быстрая "треугольная" развертка потенциала на измерительном электроде позволяет изучать кинетику и механизм электродных процессов с участием интересующих пользователя ионов.

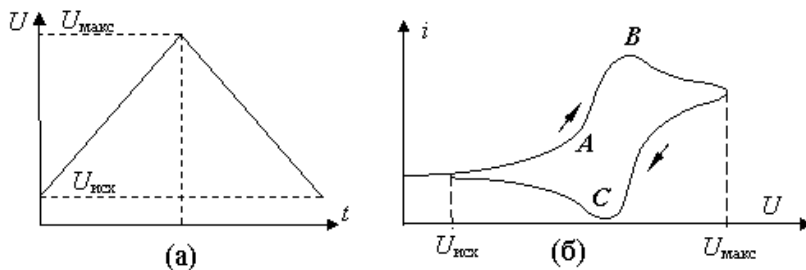


Рис. 17.1. Объяснение метода циклической вольтамперометрии: а) зависимость приложенного напряжения от времени; б) циклическая вольтамперограмма

При малом напряжении ток остается относительно небольшим. Его иногда называют "фоновым". Вблизи точки A , когда приложенное напряжение становится сравнимо с контактной разностью потенциалов для исследуемых ионов, скорость электродных реакций и вместе с ней электрический ток через элемент начинают заметно возрастать. Концентрация ионов возле поверхности электрода падает. Чем выше скорость электрохимической реакции, тем быстрее эта зона обедняется, вследствие чего скорость реакции уменьшается. В некоторой точке B ток достигает своего максимального значения и, несмотря на дальнейший рост приложенного напряжения, начинает спадать в направлении своего стационарного значения. При уменьшении напряжения, электрический ток продолжает уменьшаться, проходя через минимум вблизи от точки C .

Вид циклической вольтамперограммы зависит от всех особенностей происходящих в ячейке электрохимических реакций. Если электрохимические превращения возле электродов обратимы, то среднее арифметическое значение от напряжений, при которых достигаются максимум электрического тока (в точке B) и минимум (в точке C), равняется электродному потенциалу данного элемента. Если же реакции являются частично или полностью необратимыми, то это не имеет места, а минимум тока может вообще отсутствовать. Форма циклической вольтамперограммы зависит и от скорости изменения напряжения. Все это может давать исследователю много ценной информации относительно кинетики электрохимических процессов в исследуемом растворе и о его составе.

Еще более перспективной оказалась " вольтамперометрия переменного тока ". Потенциал измерительного электрода складывается при этом методе из линейно или ступенчато нарастающего напряжения постоянного смещения и переменного измерительного напряжения малой амплитуды в несколько милливольт. При этом измеряется не весь ток через измерительный электрод, а только его переменная составляющая, синхронная с переменным напряжением.

Накладываемое переменное напряжение может быть синусоидальным, может иметь форму прямоугольного меандра (тогда говорят о " *квадратноволновой* вольтамперометрии ") или др. Такой метод позволил повысить чувствительность обнаружения аналита почти на 2 порядка. Примерно такие же результаты дает " *импульсная* вольтамперометрия ", при которой на напряжение постоянного смещения накладываются небольшие измерительные импульсы и измеряются синхронно связанные с ними импульсные приращения тока.

Почти во всех вариантах вольтамперометрии чувствительность обнаружения можно дополнительно повысить, стимулируя различными методами предварительное накопление аналита возле измерительного электрода или на нем. Чувствительность обнаружения может при этом достигать 10^{-9} - 10^{-10} моль/л.

Из множества возможных приведем лишь пару примеров применения вольтамперометрии. В литературе описана методика определения методом циклической вольтамперометрии концентрации ионов Cu^+ . Для этого использовались специфический комплексон таких ионов ДМФ (2, диметил-1, 10-фенантролин) и потенциостат BAS CV-1B. Чувствительность обнаружения составляла 5 нмоль/л.

В литературе описана методика выявления таким методом присутствия в питьевой воде нитридов с чувствительностью 2 мкмоль/л и измерения их концентрации в диапазоне от 10 мкмоль/л до 1000 мкмоль/л.

17.2. Хроноамперометрические сенсоры

Еще большие информационные возможности даёт метод, который основан на анализе зависимости тока через электрохимический элемент от времени при ступенчатом, линейном или синусоидальном изменении приложенного напряжения. Используют и наложение на

постоянное напряжение смещения периодических импульсов напряжения разной формы и амплитуды либо небольшого измерительного переменного напряжения. Для получения дополнительной информации применяют также такие внешние воздействия на электрохимический элемент, как изменение условий перемешивания исследуемого раствора, дозированное добавление по каплям других растворов, быстрая замена измерительного электрода на другой (из другого материала) и т.п.. При использовании такого арсенала воздействий можно определять наличие и концентрацию в растворе почти всех видов ионов и многих органических молекул в широком диапазоне концентраций (от 10^{-10} моль/л до 1 моль/л), исследовать природу соответствующих электрохимических реакций и их подробные кинетические характеристики.

В наиболее общем виде результаты хроноамперометрических исследований представляют в виде двух взаимосвязанных графиков. Один из них – это зависимость приложенного напряжения от времени, а второй – это зависимость от времени силы тока через электрохимический элемент (рис. 17.2). На временной диаграмме отмечают также моменты или периоды дополнительных внешних воздействий на исследуемый раствор. Например, на приведенной хроноамперограмме цифрой 1 отмечен момент времени, когда было прекращено перемешивание раствора и скачком увеличено приложенное напряжение. Соответствующий участок хроноамперограммы позволяет наблюдать кинетику происходящих реакций в режиме диффузии ионов к электродам.

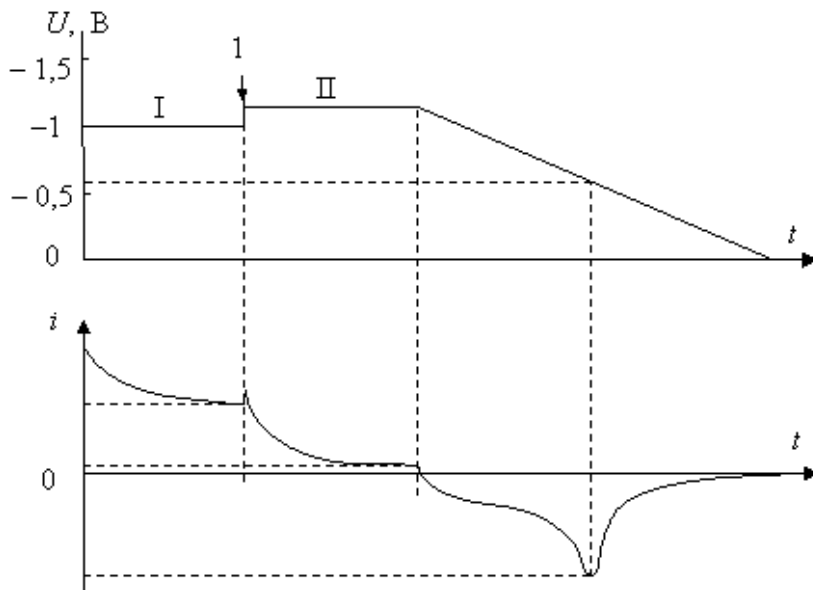


Рис. 17.2. Пример простой хроноамперограммы: I - период наблюдения с непрерывным перемешиванием раствора (2-15 мин); 1 - момент прекращения перемешивания и увеличения приложенного напряжения; II - период наблюдения без перемешивания раствора

Если требуется, то вычисляют производную зависимости силы тока от времени и приводят соответствующий график. Или выполняют другие существенные преобразования получаемой информации, исходя из известной либо предполагаемой математической модели происходящих процессов. При наличии такой модели, используя результаты хроноамперометрического исследования, можно определить природу и находить кинетические характеристики происходящих в растворе химических реакций и реагирующих веществ.

В интеллектуальных сенсорах, с использованием встроенного в них микрокомпьютера, все требуемые для исследования раствора манипуляции и преобразования информации можно автоматизировать. Интеллектуальные сенсоры могут сами автоматически выполнять и уже наработанные, даже и сложные, методики (алгоритмы)

исследований, и позволяют самому пользователю (без привлечения программиста) разрабатывать и запоминать новые методики.

17.3. Примеры интеллектуальных электрохимических сенсоров

В заключение из имеющегося большого разнообразия приведем лишь ряд примеров типичных современных интеллектуальных электрохимических сенсоров, предназначенных для различных целей. Начнем с традиционных, работающих с использованием внешнего персонального компьютера, а потом опишем ряд портативных.

17.3.1. Электрохимические анализаторы ИВА-5 и ТА-07

Вольтамперометрический анализатор "ИВА-5" российского Научно-производственного внедренческого предприятия "ИВА" предназначен для определения концентрации ионов меди, свинца, кадмия, железа, кобальта, хрома, цинка, никеля, молибдена, марганца, мышьяка, олова, ртути в природных, питьевых и сточных водах, в пищевых продуктах и в продовольственном сырье, в биологических жидкостях (фракции крови, моча) и т.д. Его внешний вид показан на рис. 17.3.



Рис. 17.3. Вольтамперометрический анализатор ИВА-5

В его состав входят электронный блок размерами 250x175x75 мм, магнитная мешалка, комплект трехэлектродных электрохимических ячеек. Рабочий электрод здесь – графитовый, модифицированный так, чтобы уменьшить влияние на анализ органической составляющей анализируемого раствора. Электрод сравнения – хлорсеребряный (Ag /AgCl / KCl, 3M), вспомогательный электрод – стеклоуглеродный. Анализатор ИВА-5 работает в комплексе с персональным компьютером. Диапазон определяемых концентраций при анализе воды 0,1-10000 мкг/л, по ртути 0,01 – 500 мкг/л; при анализе пищевых продуктов – от 0,02 до 500 мкг/л. Расход пробы 1-10 мл на один анализ.

"Базовый анализатор ТА-07", показанный на рис. 17.4, является более компактным. Он тоже работает с внешним персональным компьютером. В нем можно реализовать широкий набор методов электрохимического анализа: вольтамперометрию (прямую, инверсионную, циклическую), хроноамперометрию, кулонометрию. Возможны почти все варианты вольтамперометрии: на постоянном токе, ступенчатая, на переменном токе синусоидальная с фазовым разделением активной и ёмкостной составляющих, квадратно-волновая, импульсная нормальная и дифференциальная.



Рис. 17.4. Базовый анализатор ТА-07

Используются автоматический подъем электродов с поворотом для удобной смены стаканчиков и электродов, вибрационное перемешивание, стаканчики из чистого плавленого кварца, УФ облучатель для деактивации органических веществ и кислорода. Анализатор позволяет определять концентрации широкого набора примесей (Zn, Cd, Pb, Cu, Hg, As, Fe, Se, Sb, Sn, Cr, Bi, Mn, Co, Ni, Au, Ag, иод, анилин, витамины B1, B2, C и др.) в диапазоне от 0,05 до 10000 мкг/л.

17.3.2. Полярографы

Промышленно выпускаются и продаются *интеллектуальные* полярографы с использованием персональных компьютеров. Здесь можно назвать, например, дифференциальный импульсный полярограф фирмы IBM Model EC225, а также полярограф ABC-1.1 и потенциостат PS-7 российской фирмы "НПП ЭКОНИКС".

Полярограф ABC-1.1 является "...универсальным компьютерным комплексом нового поколения для вольтамперометрического анализа на присутствие тяжелых металлов в питьевой воде, в естественных и сточных водах, в продуктах питания и в продовольственном сырье, в биологических и других материалах. Соединяет в себе современные достижения в области вольтамперометрической техники измерений с сервисными возможностями компьютерного управления анализом, обработки и протоколирования данных". Полярограф, в частности, реализует методики инверсионной и циклической вольтамперометрии. Госстандарт Российской Федерации рекомендует его для измерений содержания токсических элементов (меди, свинца, кадмия, цинка) в пищевых продуктах (ГОСТ Р 51301-99). Чувствительность обнаружения составляет: 0,1 мкг/л для Cd, Pb, Ni ; 0,15 мкг/л – для Hg; 0,5 мкг/л – для Cu; 10 мкг/л – для Zn. Время одного анализа (без приготовления пробы) не превышает 10 мин. Благодаря высокой чувствительности, низкой стоимости и экспрессности анализов, полярограф является экономичной альтернативой дорогим спектроскопическим приборам и успешно конкурирует с ними в практике анализа тяжелых металлов. Программное обеспечение и система встроены меню позволяют программировать гибкое управление измерениями и обработкой результатов, предоставляют удобный интерфейс для обмена оперативной информацией.

Основные области применения полярографов: научно-исследовательские учреждения; лаборатории гальванических производств; контроль питьевой, морской, родниковой воды, стоков; анализ состава крови и плазмы крови; контроль пищевых продуктов, их составляющих, фармацевтических препаратов и сырья для них; контроль технологии изготовления особо чистых материалов, в том числе для высокотехнологической электроники и т.д.

17.3.3. Тестер алкогольного опьянения и анализатор воды

На рис. 17.5 слева показан электрохимический сенсор Alcotest 7410 Plus фирмы Dräger, предназначенный для обнаружения и определения степени алкогольного опьянения человека.



Рис. 17.5. а) Электрохимический сенсор Alcotest 7410 Plus. б) Анализатор воды WATER TEST

Масса сенсора – около 0,5 кг, размеры 230x70x34 мм. Сенсор измеряет концентрацию алкоголя в воздухе, который выдыхает человек, в

диапазоне от 0 до 10 промилле с точностью 0,05 промилле. Отбор пробы осуществляется через накладной мундштук. Очень малое аэродинамическое сопротивление выдоха позволяет проводить измерения даже в режиме "пассивного" дыхания, когда пациент не

желает делать интенсивный выдох. Но совсем не дышать он ведь тоже не может.

Встроенные электронные часы точно хронометрируют дату и время измерения. Сенсор автоматически составляет по узаконенной форме протокол измерения, который тут же может быть выдан на принтер. Память данных сенсора позволяет хранить до 9700 протоколов измерения, а потом передавать их во внешний компьютер. Сенсор нуждается в проверке и калибровке лишь один раз в полгода. Процесс калибровки автоматизирован. Перекрестная чувствительность к другим газам, например к ацетону или бензину, – отсутствует.

На рис. 17.5 справа показан интеллектуальный электрохимический сенсор WATER TEST компании Hanna Instruments. Этот портативный прибор позволяет быстро и точно измерить четыре важнейших гидрохимических параметра: Ph, Red-Ох-потенциал, электропроводность и температуру воды. Он удобен и прост в обращении. Для проведения измерений достаточно залить исследуемый раствор в кювету прибора, выбрать из меню измеряемый параметр и считать показание дисплея. Всё остальное сенсор делает сам. Его широко применяют для контроля за качеством воды в технологических процессах водоподготовки, для санитарного контроля воды в бассейнах, при экологических исследованиях и т.д.

17.3.4. Портативный анализатор дымовых газов

В качестве следующего примера портативного интеллектуального электрохимического сенсора кратко опишем анализатор дымовых газов "Testo 330-3" (рис. 17.6).



Рис. 17.6. Слева – общий вид портативного анализатора дымовых газов "Testo 330-3", справа – сенсор в процессе работы со сменным электрохимическим зондом

Он предназначен для контроля, наладки работы и обслуживания котлов и других теплогенераторов, работающих на природном газе или пропане, на мазуте или дизтопливе, угле и т.п. Его масса – 0,6 кг, размеры 270x90x65 мм. Вместе с удобными сертифицированными электрохимическими сменными зондами сенсор обеспечивает измерение содержания кислорода в диапазоне от 0 до 21 объемных %, угарного газа (CO) – в диапазонах от 0 до 4000 *ppm* или от 500 *ppm* до 30000 *ppm*, окислов азота (NO_x) в диапазоне от 0 до 3000 *ppm*, CO₂ в диапазоне от 0 до 1 объемных % (0 ... 10000 *ppm*). Кроме того, сенсор обеспечивает тщательный контроль и нахождение мест возможного просачивания горючих газов, измерение выносными зондами температуры пламени до 1200 deg C, давления и дифференциального давления газов, тяги, потока газа, КПД горелки, тестирование герметичности газового тракта. С таким интеллектуальным сенсором специалист-теплотехник может быстро и оптимально отрегулировать горелку, тягу, проконтролировать все функции теплогенератора, устранить выявленные недостатки.

Все данные и рабочие меню выводятся на удобный графический дисплей 240x160 пикселей. Результаты измерений фиксируются в памяти, где могут храниться до 200 блоков данных и при необходимости через инфракрасный порт передаваться на принтер. Микрокомпьютер сенсора выполняет функции самодиагностики, диагностики состояния фильтров и электрохимических сенсоров и автоматической калибровки. Для общения с внешним компьютером имеется USB порт.

17.3.5. Интеллектуальные электрохимические глюкометры

По данным Всемирной организации здравоохранения сейчас в мире зарегистрировано до 200 млн. людей, больных сахарным диабетом. Поэтому из интеллектуальных электрохимических сенсоров наиболее известны как раз глюкометры – сенсоры для измерения концентрации глюкозы в крови человека. Официально аттестованы и выпускаются уже десятки типов портативных электрохимических глюкометров, которые требуют для измерения капельку крови объёмом меньше 1 мкл. Один из них – глюкометр "FreeStyle", являющийся по принципу своего действия кулонометрическим электрохимическим сенсором и рассчитанный на работу с одноразовыми тестовыми полосками – уже описан в "Химически чувствительные полевые транзисторы и биосенсоры на их основе. Кондуктометрические и амперометрические сенсоры".

Менее известными являются портативные интеллектуальные электрохимические сенсоры, предназначенные для *непрерывного мониторинга уровня глюкозы в крови человека*. Опишем коротко один

из них – глюкосенсор "CGMS System Gold" фирмы

Medtronic MiniMed [<http://www.minimed.de/>]. Глюкометр CGMS

System Gold (CGMS – Continuous Glucose Monitoring System) состоит из двух частей (рис. 17.7). В период наблюдения пациент носит их на себе. Тоненький ферментный электрод, показанный в крупном масштабе на рисунке справа, вводят под кожу на глубину 4-6 мм, как правило, в области брюшины и надёжно закрепляют гигиеническим пластырем на поверхности кожи.

Соединённый с ним тонким кабелем небольшой электронный блок ("монитор") цепляют к одному из предметов одежды или кладут в карман. Пациент носит этот сенсор в течение нескольких суток, ведя обычную активную жизнь. Каждые 10 секунд сенсор сам автоматически проводит кулонометрическое измерение концентрации глюкозы в подкожной ткани, пересчитывает результат измерения на концентрацию глюкозы в крови и каждые 5 мин. вычисляет и запоминает среднее значение концентрации за прошедшую пятиминутку. Всего за сутки накапливается 288 результатов измерения. Результаты последнего измерения и среднее значение за последнюю пятиминутку можно увидеть на дисплее монитора.



Рис. 17.7. Портативный интеллектуальный сенсор CGMS System Gold для наблюдения в течение нескольких суток за изменениями концентрации сахара в крови человека: слева – расположение блоков сенсора на теле человека в процессе наблюдения; справа – ферментный электрод в крупном масштабе

В случае выявления угрожающей гипо- или гипергликемии сенсор может сообщать об этом с помощью звукового сигнала и соответствующей информации на мониторе. В монитор с помощью специальных символов рекомендуется вводить данные о таких важных событиях, как прием пищи, инъекция инсулина, занятие спортом или продолжительная физическая нагрузка, ощущение гипогликемии и т.д. Вместе с датой и временем суток они тоже запоминаются монитором.

Ферментный электрод изготавливают из максимально биологически совместимых материалов. Но тем не менее человеческое тело реагирует на электрод как на инородное тело и постепенно

обволакивает его защитными веществами, из-за чего чувствительность сенсора снижается. Поэтому спустя некоторое время следует делать повторную калибровку. Производитель рекомендует проводить калибровку монитора 4 раза в сутки, выполняя параллельные измерения уровня сахара на независимом контрольном приборе по капле крови. Полученное значение вводят в монитор, который затем выполняет калибровку автоматически. Диапазон измерения – от 40 мг % до 400 мг %. Когда после окончания периода наблюдения пациент приходит к врачу, накопленные в памяти монитора данные передаются на медицинский компьютер, в котором с помощью соответствующей программы анализируются и выводятся на экран в виде графика (рис. 17.8). По горизонтали здесь отложено время суток, а по вертикали – концентрация глюкозы в моль/л. Как видим на примере представленного графика, концентрация глюкозы в крови у диабетиков не является постоянной величиной и может значительно изменяться со временем в зависимости от обстоятельств жизни.

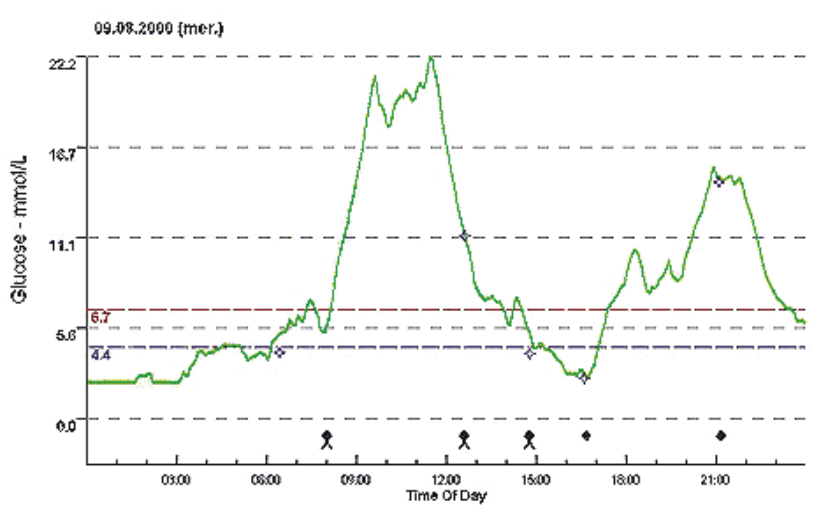


Рис. 17.8. Пример графика изменения концентрации глюкозы в крови больного сахарным диабетом человека в течение суток, зарегистрированного сенсором CGMS System Gold

Легко убедиться, что даже у хорошо мотивированного и дисциплинированного пациента, который измеряет свой уровень сахара 3-4 раза в сутки, большая часть дня и особенно ночи остаются

вне контроля. И опасные эпизоды, во время которых концентрация глюкозы в крови недопустимо возрастает или падает, проходят незамеченными.

Непрерывное исследование с помощью интеллектуального сенсора типа CGMS System Gold ТМ позволяет врачу-диабетологу лучше диагностировать состояние и индивидуальные особенности больного, выявить наличие скрытых эпизодов гипо- и гипергликемии, рекомендовать более адекватное и точное лечение, скорректировать режим жизни. Анализ графика врачом вместе с больным наглядно демонстрирует больному сахарным диабетом влияние разных факторов повседневной жизни на течение его болезни, помогает лучше мотивировать на здоровый образ жизни и на соблюдение рекомендаций врачей.

Важной вехой в совершенствовании глюкометров для больных диабетом первого рода, вынужденных пользоваться инсулином, стало объединение глюкометра с автоматической инсулиновой помпой. Одной из первых таких разработок, успешно доведенных до промышленного выпуска, стала *инсулиновая помпа со встроенным глюкометром "DANA Diabecare IIS"* корейской компании Sooil (рис. 17.9).

Портативная система "DANA Diabecare IIS" содержит современный биосенсорный глюкометр, требующий для анализа минимальный объем крови, и инсулиновую помпу. Их совместную работу организует микрокомпьютер. Полученные результаты измерения глюкозы не только выводятся на дисплей, но и непосредственно используются для автоматического расчета и введения требуемой дозы инсулина. При выходе уровня сахара в крови за установленные границы, автоматически подаются сигналы тревоги.



Рис. 17.9. Портативная инсулиновая помпа DANA Diabecare IIS со встроенным глюкометром: 1 – отделение для инсулинового резервуара; 2 – окошко для определения оставшегося количества инсулина; 3 – кнопки управления; 4 – ЖК дисплей; 5 – коннектор для прикрепления инфузионного набора; 6 – пластиковый катетер

В отделение 1 вставляют съёмный инсулиновый резервуар ёмкостью 3 мл (300 ЕД инсулина). Количество имеющегося в нем запаса инсулина можно увидеть через мерное окошко 2. Управление работой системы осуществляется с помощью удобной клавиатуры 3, состоящей из 4-х кнопок. Кнопки со стрелками могут работать в режиме "прокрутки" (если держать кнопку нажатой, то устанавливаемое значение непрерывно изменяется, или указатель непрерывно перемещается по списку). Вся необходимая для пользователя информация высвечивается на жидкокристаллическом дисплее 4 площадью 8 см². При недостаточном внешнем освещении дисплей автоматически подсвечивается изнутри.

Инсулиновая помпа, кроме резервуара, содержит коннектор (соединитель) 5 для прикрепления инфузионного набора через пластиковый катетер 6 и находящийся внутри основного корпуса миниатюрный насос для прокачивания и впрыскивания через инфузионный набор необходимой дозы инсулина. Состав инфузионного набора показан на рис. 17.10. Тонкая игла, выполненная из высококачественной стали, обеспечивает поступление инсулина в подкожную жировую клетчатку. Фиксатор надежно прикрепляет иглу к поверхности кожи, а клипсовый соединитель обеспечивает легкое соединение и отсоединение иглы и катетера. Вид иглы и длину катетера подбирает лечащий врач.

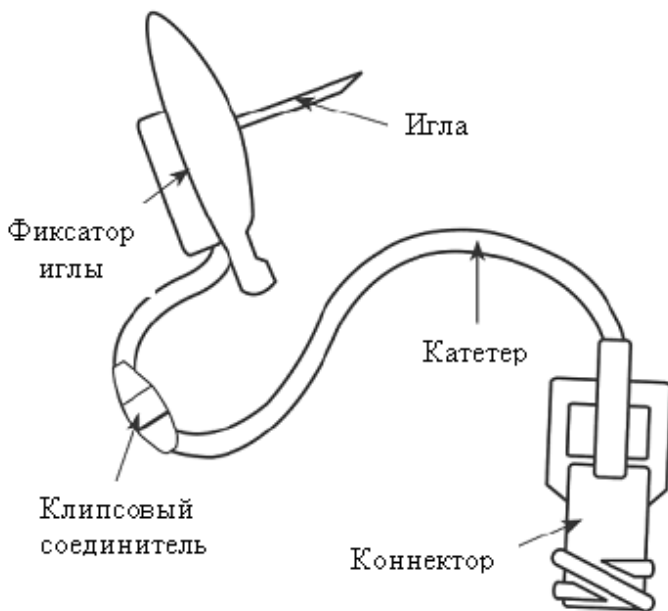


Рис. 17.10. Инфузионный набор инсулиновой помпы DANA Diabecare ПС

Инсулиновая помпа с микропроцессорным управлением обеспечивает разные режимы введения инсулина, предписанные лечащим врачом, с точностью до 0,01 условной единицы. Вводимые дозы тщательно учитываются. При их автоматическом расчете, кроме текущего уровня глюкозы в крови, учитываются также планируемое количество

углеводов в предстоящей еде, индивидуальная чувствительность к конкретному виду инсулина, целевой уровень глюкозы в крови и заданная лечащим врачом тактика. Использование точного режима введения инсулина позволяет достичь оптимальной компенсации сахарного диабета, отдалить во времени его тяжелые последствия или вовсе избежать их. Для документирования в памяти системы сохраняются 100 последних введенных доз, 100 последних суточных доз инсулина, 100 последних заливок инсулина и 100 последних сигналов тревоги.

В мире рядом фирм и научно-исследовательских организаций ведутся также работы по созданию имплантируемых в тело больного человека биочипов для непрерывного контроля за уровнем глюкозы в крови. О создании одного из таких биочипов размером 4x2x0,5 мм сообщается в литературе. На физиологических растворах глюкозы, работая по амперометрическому принципу, биочип показывает довольно хорошие результаты в диапазоне концентраций глюкозы от 0,1 ммоль/л до 13 ммоль/л со временем реакции 50 с. Сопряженный с инсулиновой помпой типа описанной выше, такой биочип еще больше облегчит жизнь больного диабетом первого типа.

17.3.6. Биохимические экспресс-анализаторы крови CardioChek

Биохимические экспресс-анализаторы крови CardioChek ТМ(рис. 17.11) являются еще одним примером диагностического оборудования типа "point-of-care" – диагностики на дому, на работе или в любом другом месте наблюдения пациента. Они позволяют врачу быстро провести самые необходимые биохимические исследования крови пациента, оперативно диагностировать состояние его здоровья и принять обоснованные решения о необходимых лечебных мероприятиях.



Рис. 17.11. Биохимический экспресс-анализатор крови CardioChek (слева) и пояснения по его применению (справа)

Анализатор вместе с набором необходимых тестовых панелек легко помещается в карман или в сумку врача. Он позволяет за считанные минуты провести исследование крови пациента на целый ряд очень важных биохимических параметров – в зависимости от имеющегося набора тестовых панелек. Стадии тестирования показаны на рис. 17.11 справа сверху. Это – забор необходимого количества крови пациента; дозированное нанесение необходимого объема крови на вставленную в анализатор тестовую панельку; через несколько десятков секунд считывание результата тестирования. Каждая тестовая панелька представляет собой биоселективный электрохимический электрод, нацеленный на измерение соответствующего биохимического показателя крови или одновременно нескольких показателей. Набор панелек (показан на рис. 17.11 справа внизу) достаточно широк и включает:

- "Общий холестерин" (диапазон измерений: 2,59-10,36 ммоль/л; требуемый объем крови 15 мкл);
- "Глюкоза" (диапазон измерений: 1,11-33,3 ммоль/л; требуемый объем крови 15 мкл);

- "Креатинин" (диапазон измерений: 17,7-884 мкмоль/л; требуемый объем крови 20 мкл);
- "Кетоновые тела" (диапазон измерений: 0,19-6,72 ммоль/л; требуемый объем крови 15 мкл);
- "Триглицериды" (диапазон измерений: 0,56-5,65 ммоль/л; требуемый объем крови 15 мкл);
- "Липопротеиды высокой плотности" (диапазон измерений: 0,39-2,59 ммоль/л; требуемый объем крови 15 мкл);
- "Липопротеиды низкой плотности" (диапазон измерений: 1,29-5,18 ммоль/л; требуемый объем крови 15 мкл);
- "Липидный спектр" (диапазоны измерений указаны выше; требуемый объем крови 40 мкл);
- "Метаболический синдром" (глюкоза, триглицериды, липопротеиды высокой плотности; требуемый объем крови 40 мкл).

Экспресс-анализаторы крови CardioChek ТМ используются врачами скорой и неотложной помощи, сельскими и семейными врачами, а также в медсанчастях, фельдшерских пунктах, не имеющих собственной лаборатории, и даже в лабораториях лечебных учреждений с небольшой тестовой нагрузкой порядка 100-1000 анализов в год. Для таких лечебных учреждений приобретение экспресс-анализатора крови CardioChek ТМ и наборов тестовых панелек к нему оказывается дешевле, чем создавать и содержать собственную лабораторию.

17.3.7. "Лаборатории на чипе"

С использованием ХЧПТ в ряде передовых фирм разрабатываются так называемые "лаборатории на чипе" ("lab-on-a-chip"). Например, исследователи Калифорнийского технологического института, университета Калифорнии в Лос-Анджелесе и компании IRIS International совместно разработали портативный интеллектуальный сенсор размером с мобильный телефон, который автоматически выполняет анализ крови человека, используя лишь 1-2 капли. Сенсор предназначен, в первую очередь, для космонавтов во время их продолжительных полетов в космос. Можно, правда, использовать там анализатор крови типа описанного выше. Но в космосе приходится экономить каждый лишний грамм массы, особенно при продолжительных путешествиях, например, к Марсу или Венере.

Интеллектуальный сенсор для автоматического проведения за 2-3 мин. анализа крови непосредственно в космосе показан на рис. 17.12.

Внутри кристалла кремния с помощью микросистемной технологии сформированы не только микроминиатюрные быстродействующие электрохимические анализаторы, но также и крохотные жидкостные насосы, вентили и электронные схемы, которые нужны для управления ходом анализа и для обработки результатов измерений. Когда капля крови попадает в небольшой приемный резервуар, к ней для предотвращения свертывания крови автоматически добавляются антикоагулянты. Затем она перекачивается в контейнер для разбавления, а из него – в сепаратор. Там клетки крови автоматически сортируются по размерам с использованием законов гидродинамики.

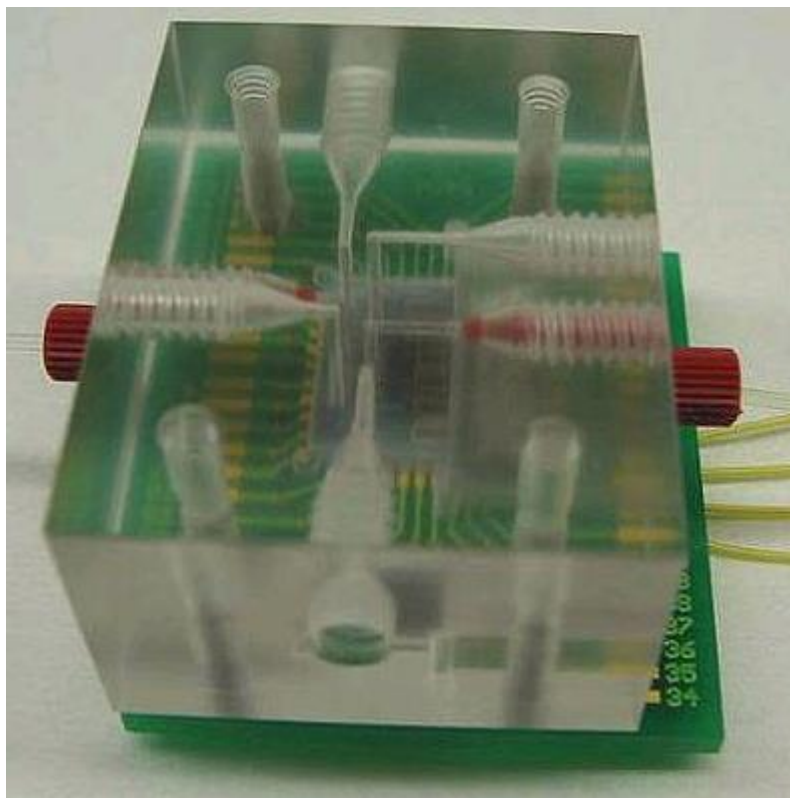


Рис. 17.12. Портативный интеллектуальный сенсор для проведения анализа крови

Каждая фракция через свой канал прокачивается в оптоэлектронный счетчик, который подсчитывает число проходящих сквозь него клеток (телец) крови – лейкоцитов, эритроцитов и т.д. Определяются концентрация гемоглобина, РОЕ. А затем с помощью биоселективных МДП транзисторов, на затворах которых иммобилизованы соответствующие ферменты или антитела, определяется наличие и концентрация ряда важных биохимических веществ, вирусов, бактерий.

Разработчики считают, что созданный чип довольно гибок, и с помощью соответствующих модификаций его можно будет настроить даже на выполнение онкологических тестов с целью раннего выявления раковых заболеваний, если иммобилизовать на затворах МДП транзисторов белковые маркеры раковых клеток.

Аэрокосмический центр им. Маршала (NASA) разработал миниатюрную "лабораторию на чипе", предназначенную для выявления следов жизни на Марсе путем анализа в биоселективных электрохимических элементах растворов марсианского грунта или льда на наличие аминокислот, ДНК, РНК, бактерий, спор.

Немецкая фирма STMicroelectronics вместе с сингапурской медицинской фирмой Veredus Laboratories разработала специализированные одноразовые сенсорные микросхемы для распознавания разных штаммов вируса птичьего гриппа H5N1 (рис. 17.13). Сенсорная микросхема содержит ХЧПТ, на затворах которых высажены антитела различных штаммов вируса. Если в контролируемом растворе имеются вирусы того или иного штамма, то антитела распознают их, присоединяют, и на выходе соответствующего ХЧПТ появляется сигнал.



Рис. 17.13. Специализированные одноразовые сенсорные микросхемы для распознавания разных штаммов вируса птичьего гриппа H5N1

В то время как при использовании прежних методов для получения результата требовалось несколько дней плюс время на транспортировку в спецлабораторию, анализ с помощью разработанной сенсорной микросхемы можно выполнить на месте в течение одного часа. И тем самым можно сберечь жизнь тысячам домашних птиц, которые до сих пор становились жертвами преждевременных "профилактических зачисток".

17.3.8. Сканирующий электрохимический микроскоп

В таком микроскопе гальванический электрод с очень острым концом сканирует под управлением компьютера вдоль поверхности исследуемого образца, покрытой специальным вспомогательным раствором. В зависимости от электрохимических свойств локального участка поверхности образца изменяется разность потенциалов между электродом и образцом (или вспомогательным электродом сравнения) либо электрический ток, протекающий через электрод при приложенном извне напряжении. Запоминая получаемый сигнал, компьютер строит увеличенное изображение поверхности образца. На этом изображении хорошо видны "электрохимические неоднородности", обусловленные наличием вкраплений различных веществ.

Разработаны различные варианты получения сигналов, позволяющие, меняя состав раствора, модифицируя электрод, применяя вспомогательный электрод и соответствующие редокс системы, настраиваться на выявление на поверхности образца мест расположения различных аналитов.

Краткие итоги

Вольтамперометрический сенсор отслеживает зависимость электрического тока через исследуемый раствор от приложенного напряжения. Разработано много разных вариантов вольтамперометрии, позволяющих повысить информационные возможности сенсора и чувствительность к различным аналитам. В методе циклической вольтамперометрии, например, приложенное к электродам напряжение сначала линейно возрастает, а потом уменьшается до исходного значения. Вольтамперограмма имеет вид замкнутой кривой, вид которой зависит от всех особенностей электрохимических реакций. Это может давать исследователю много ценной информации не только о его составе, но и о кинетике электрохимических процессов в исследуемом растворе. При вольтамперометрии переменного тока на линейно или ступенчато нарастающий потенциал измерительного электрода накладывается переменное измерительное напряжение малой амплитуды, и измеряется только соответствующая переменная составляющая тока. Такой метод позволил повысить чувствительность обнаружения аналита почти на 2 порядка.

Метод хроноамперометрии основан на анализе зависимости тока через электрохимический элемент от времени при различных способах изменения приложенного напряжения. Используют и наложение на постоянное напряжение смещения периодических импульсов напряжения разной формы и амплитуды либо небольшого измерительного переменного напряжения. Для получения дополнительной информации применяют также такие внешние воздействия на электрохимический элемент, как изменение условий перемешивания исследуемого раствора, дозированное добавление по каплям других растворов, быстрая замена измерительного электрода на другой (из другого материала) и т.п. Чувствительность описанных методов можно дополнительно повысить, стимулируя различными методами предварительное накопление аналита возле измерительного электрода. Благодаря всему этому, с помощью вольтамперометрических и хроноамперометрических сенсоров можно

определять наличие и концентрацию в растворе почти всех видов ионов и многих органических молекул в широком диапазоне концентраций (от 10^{-10} моль/л до 1 моль/л), исследовать природу и подробные кинетические характеристики соответствующих химических реакций.

В настоящее время разработаны и широко применяются многие виды интеллектуальных электрохимических сенсоров. Среди них: электрохимические анализаторы широкого профиля и полярографы, анализаторы воды, напитков и тестеры алкогольного опьянения, анализаторы дымовых газов и портативные глюкометры, экспресс-анализаторы крови и даже "лаборатории на чипе". Имеется большой потенциал и для создания новых, еще более совершенных интеллектуальных электрохимических сенсоров.

18. Спектрофотометрические сенсоры как один из видов оптических сенсоров. Фотоплетизмографы. Оксиметры и пульсоксиметры

18.1. Спектрофотометрические сенсоры как один из видов оптических сенсоров

Одним из широчайших классов сенсоров являются оптические сенсоры, в которых первичную информацию об исследуемом объекте (процессе) собирает и доставляет свет, а принцип действия основан на тех или иных законах оптики. Привлекательность оптических сенсоров обусловлена тем, что свет способен переносить очень значительные потоки информации при малой мощности, практически не влияя на состояние объекта, не повреждая его, может проникать в объект на значительную глубину, действовать дистанционно.

18.1.1. Классификация оптических сенсоров

В *пассивных* оптических сенсорах с целью получения информации об объекте используют естественное внешнее освещение или собственное излучение объекта (тепловое, люминесцентное, вызванное радиоактивными распадами ядер собственных или специально введенных атомов и т.п.).

В *активных* оптических сенсорах объект целеустремленно облучают извне светом определенного спектрального состава, поляризации, направленности, модуляции и регистрируют изменения характеристик этого света, которые произошли в результате его взаимодействия с объектом.

Оптические сенсоры, в которых основную информацию об объекте несут изменения в спектральном распределении интенсивности света, называют спектрофотометрическими. Примеры таких интеллектуальных сенсоров мы рассмотрим в данном разделе.

Оптические сенсоры, в которых основную информацию об объекте получают, наблюдая разные виды люминесценции, называют *люминесцентными*. Примеры таких интеллектуальных сенсоров будут описаны в следующем разделе.

Очень интересный и перспективный новый вид оптических сенсоров, разработка которого приходится на конец XX – начало XXI в. составляют сенсоры, которые используют явление поверхностного плазмонного резонанса (*ППР сенсоры*). Их мы тоже рассмотрим в следующем разделе.

Уже давно известны и широко применяются для особо точных измерений оптические сенсоры, в которых используется явление интерференции света – *интерферометрические* сенсоры или *интерферометры*.

Оптические сенсоры, в которых основную информацию об объекте несут изменения в поляризации света, называют *поляриметрическими*.

К классу оптических сенсоров принадлежат также сенсоры, в которых используются явления обычного ("*релеевского*") и *комбинационного рассеяния* света. Напомним, что, когда монохроматический свет проходит сквозь оптическую среду, взаимодействуя с его молекулами, он может возбуждать колебательные или вращательные движения групп их атомов, из-за чего в рассеянном свете появляются спектральные компоненты с характерным изменением частоты колебаний. Обнаруживая такие спектральные компоненты, измеряя их интенсивность и частотный сдвиг относительно зондирующего монохроматического света, сенсор может получить информацию о

наличии в объекте тех или иных молекул и об их концентрации (это так называемая "рамановская" спектроскопия).

К классу оптических принадлежат также сенсоры, в которых для получения информации используется активная световая локация, законы отражения и преломления света, прохождение его сквозь неоднородную среду, явления дифракции света и т.п.

18.1.2. Принципы работы спектрофотометрических сенсоров

Спектрофотометрический метод выявления присутствия и измерения концентрации биологически важных веществ давно известен и широко применяется на практике. Он основан на том, что большинство веществ имеют свои специфические спектры излучения и поглощения в той или иной области спектра. Поэтому при прохождении света сквозь вещество его спектральный состав изменяется. По этим изменениям можно выявить присутствие контролируемого вещества (аналита) (это качественный спектральный анализ), а измеряя величину изменений спектральных интенсивностей, – вычислить концентрацию аналита или его количество (это количественный спектральный анализ – спектрофотометрия).

В технике спектрофотометрические измерения производят обычно на плоскопараллельных прозрачных твердых пластинах, на тонких плоскопараллельных пленках, содержащих аналит, или на прозрачных растворах, залитых в плоскопараллельные кюветы калиброванной (точно заданной) толщины.

Известно много разновидностей (методов, методик) спектрофотометрии. Если измерения осуществляют с использованием одной кюветы с раствором (или одной пластины, пленки), то это – *одноканальная* спектрофотометрия. Если используют несколько кювет (пластин, пленок) разной толщины или с разной концентрацией аналита и сравнивают интенсивности прошедших сквозь них нескольких пучков света, то это – *многоканальная* спектрофотометрия.

Если спектральные интенсивности измеряют лишь на одной длине волны, то такой метод называют *одноволновым*, если на двух длинах волн, то – *двухволновым*, если на многих длинах волн, то – *многоволновым*. Может записываться также непрерывный спектр прошедшего сквозь исследуемые образцы излучения. Тогда для

получения результатов анализа используют всё распределение спектральных интенсивностей в выделенной области спектра (метод *непрерывного спектра*).

В зависимости от области спектра, в которой выполняются спектрофотометрические исследования, говорят об *инфракрасной, видимой, ультрафиолетовой* спектрофотометрии.

Напомним вкратце законы поглощения и рассеяния света. Основной закон ослабления света при прохождении сквозь вещество в дифференциальной форме имеет вид:

$$dI = -KI(x)dx \quad (18.1)$$

где $I(x)$ – интенсивность света в веществе на глубине x , dI – прирост интенсивности света после прохождения очень тонкого слоя вещества толщиной dx , K – коэффициент ослабления света в веществе. Знак минус означает, что при прохождении света сквозь вещество его интенсивность убывает. Ослабление света может происходить как за счет поглощения, так и за счет рассеяния света веществом. Коэффициент ослабления света веществом $K(\lambda)$ в общем случае зависит от длины волны света λ .

Если проинтегрировать дифференциальное выражение (18.1) по толщине слоя вещества от 0 до d , принимая, что на входе в слой (при $x=0$) интенсивность света равна I_0 , то получим *интегральный закон прохождения света через слой вещества*:

$$I(d) = I_0 \exp(-Kd) \quad (18.2)$$

Отношение интенсивности света после прохождения слоя вещества к интенсивности падающего на него света

$$T = I/I_0 \quad (18.3)$$

называют *пропусканием* света. Тогда интегральный закон прохождения света через слой вещества записывают в виде:

$$T(d) = \exp(-Kd) \quad (18.4)$$

Часто пользуются также понятием *оптической плотности* слоя вещества

$$D = -\lg T = \lg(I_0/I) \quad (18.5)$$

Тогда интегральный закон прохождения света через слой вещества записывают в виде:

$$D(d) = Kd \lg e = 0,4343 Kd \quad (18.6)$$

При работе с пластинами, тонкими пленками, кюветами с раствором (рис. 18.1) приходится учитывать также отражение света от их передней и задней граней.

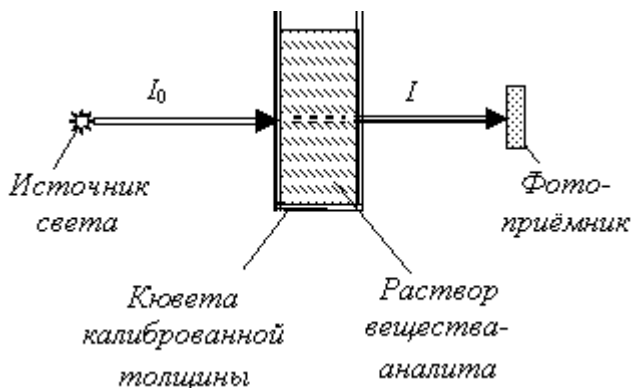


Рис. 18.1. Типичная оптическая схема спектрофотометрии "на пропускание" света

Тогда интенсивность света, прошедшего сквозь исследуемый образец, описывается известной формулой

$$I(d) = T_0 I_0 \exp(-Kd) \quad (18.7)$$

где T_0 – коэффициент пропускания кюветы (пластины, тонкой пленки), учитывающий только отражение света на гранях. Иногда в него включают также "фоновое" поглощение чистого растворителя (вещества пластины, пленки) в отсутствие аналита. В оптике аналит часто называют также "красителем", поскольку он придает или меняет окраску раствора. В этом случае коэффициент пропускания T_0 показывает, какая доля падающего света проходит сквозь кювету с чистым растворителем (сквозь пластинку, плёнку и т.д.) при отсутствии аналита.

Если мы имеем раствор лишь одного вида молекул (одного "красителя") в прозрачном растворителе, то

$$K = k_{mol}c \quad (18.8)$$

где k_{mol} – молярный коэффициент поглощения красителя; c – его молярная концентрация.

Измеряя спектральные интенсивности I_0 и I в полосе поглощения красителя и зная пропускание кюветы T_0 , значения k_{mol} и d , по формулам (18.7, 18.8) можно вычислить концентрацию красителя.

Если мы имеем раствор нескольких разных красителей в растворителе, который и сам частично поглощает свет, то

$$K = k_p c_p + k_1 c_1 + k_2 c_2 + \dots + k_n c_n \quad (18.9)$$

где

$$k_p, k_1, k_2 + \dots + k_n$$

– молярные коэффициенты поглощения вещества-растворителя и 1-го,

2-го, ..., n -го красителей соответственно; – их молярные концентрации.

Свет при прохождении сквозь вещество может ослабляться не только из-за поглощения, но и из-за рассеяния. Тогда в формулах (18.2) появляются аналогичные слагаемые, обусловленные рассеянием света.

18.1.3. Кратко о технике спектрального анализа

Еще в середине XX века обязательными узлами спектрофотометрических сенсоров были оптические призмы или дифракционные решетки, которые разлагали свет в спектр и позволяли выделять из него требуемые узкие спектральные интервалы. Но после разработки технологий расчета и изготовления небольших по размерам узкополосных интерференционных светофильтров и после создания лазерных диодов, излучающих почти монохроматический свет, во многих случаях оказалось возможным обойтись без указанных спектральных узлов. Это открыло путь к созданию портативных спектрофотометрических сенсоров, примеры которых мы рассмотрим в данном разделе.

Дальнейшим развитием стало создание и совершенствование т.н. "**Фурье-спектрометров**". Их действие основано на том, что базовое расстояние между отражающими поверхностями в интерферометре делают переменным и точно регулируемым. При его изменении соответственно меняется и длина волны света, при котором наблюдается максимум пропускания. Экспериментально найденная зависимость интенсивности пропускаемого света от толщины интерферометра ("*интерферограмма*") с помощью компьютера, выполняющего преобразование Фурье, легко пересчитывается в зависимость интенсивности пропускаемого света от длины волны, т.е. в обычный спектр пропускания. Интерферометр с регулируемым базовым расстоянием можно сделать весьма компактным.

Разработаны и нашли применение в оптических сенсорах также и т.н. "перенастраиваемые акустооптические фильтры". Они представляют собой акустический резонатор, заполненный оптически прозрачной средой. С помощью электронного генератора и пьезоэлектрического или магнитострикционного преобразователя в этой среде возбуждаются ультразвуковые стоячие волны. Расстояние между пучностями волн прямо зависит от частоты возбуждаемых колебаний. Плотность вещества в пучностях становится выше, чем в узлах. Проходящий сквозь оптически неоднородную среду акустооптического фильтра свет в результате интерференции в промежутках между пучностями разлагается в спектр, и на выход проходит только спектральная составляющая, длина волны которой соответствует интерференционному максимуму, т.е. удвоенному расстоянию между пучностями. Благодаря этому, длину волны проходящего сквозь фильтр света можно регулировать, изменяя частоту генерируемых ультразвуковых колебаний. Акустооптические фильтры тоже получаются весьма компактными.

Спектрофотометрический метод широко используют в биологии и медицине. Тем не менее, до последнего времени, как правило, работали с препаратами биологических веществ (*in vitro*). Т.е. готовили тонкие плоскопараллельные срезы тканей, растворы или вытяжки из биологических тканей и объектов и т.п. На нынешнем этапе биология и медицина стараются уже как можно больше информации получать от живого объекта (*in vivo*), без разрушения живой ткани, неинвазивно, с наименьшим влиянием на естественные процессы, происходящие в организме человека, животных, растений. И в этих случаях наиболее ценным инструментом исследования становится свет. Но это

потребовало развития новых технологий спектрофотометрических измерений, о которых мы расскажем в дальнейшем.

18.2. Фотоплетизмографы

Исторически одними из первых портативных интеллектуальных спектрофотометрических сенсоров стали фотоплетизмографы, оксиметры и пульсоксиметры.

Напомним, что *плетизмография* (от греческих слов "plethysmos" - набухание, наполнение и "grapho" - пишу) – это технология регистрации изменений объема тела в результате воздействия на него тех или иных факторов. Она начала применяться медиками еще в XIX веке. Одним из вариантов плетизмографии наряду с механической плетизмографией, электрической и другими видами является фотоплетизмография. Она основана на регистрации изменений интенсивности света после его прохождения сквозь биологическую ткань, обусловленных изменениями ее объема. В клинической практике фотоплетизмография чаще всего применяется для наблюдения т.н. "пульсовых волн" – изменений объема участка тела, обусловленных толчковыми притоками крови в фазе систолы (сокращения мышц сердца и повышения артериального давления).

18.2.1. Принцип фотоплетизмографии

Изменения интенсивности света, наблюдаемые при фотоплетизмографии, могут быть связаны с разными факторами – в зависимости от схемы наблюдения и от выбранной длины волны света. Поэтому и требуется не просто фотометрия, а именно спектрофотометрия. В классической фотоплетизмографии частей тела человека используют ближнее инфракрасное (БИК) излучение, которое меньше всего поглощается биологическими тканями и кровью. Поэтому интенсивность такого света после прохождения сквозь ткань зависит, в основном, от его рассеяния тканью, которое изменяется при пульсовых изменениях объема.

Соответственно были разработаны *одноволновые* фотоплетизмографы, использующие свет одной длины волны – между 600 и 700 нм. Поглощение такого света оксигемоглобином, который в основном и приносится с притоком артериальной крови в фазе систолы, и другими компонентами крови является незначительным. Поэтому при

пульсациях крови интенсивность такого света связана в основном с его рассеянием. Схема измерений обычно такова, что излучающий светодиод и фотоприемник размещаются с противоположных сторон пальца или мочки уха человека.

Типичный вид зависимости сигнала от времени на выходе фотоприемника показан на рис. 18.2. Слева (рис. 18.2, а) показан полный сигнал, в котором можно выделить постоянную (I_{Π}) и переменную ($I_{\text{пер}}$) составляющие. Справа (рис. 18.2, б) изображена выделенная и усиленная переменная составляющая сигнала. Именно ее называют *фотоплетизмограммой*.

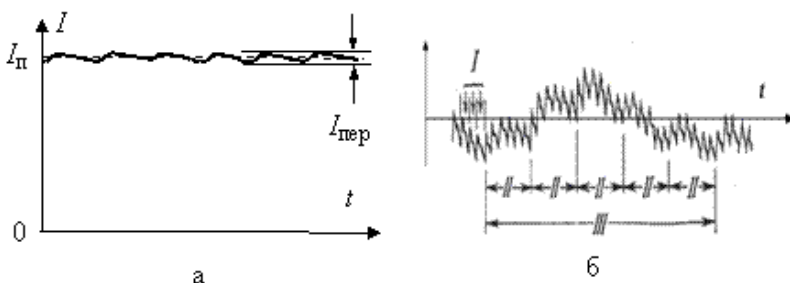


Рис. 18.2. Типичный вид зависимости сигнала от времени на выходе фотоприемника: а) полный сигнал; б) его увеличенная в масштабе переменная составляющая

На фотоплетизмограмме можно выделить "волны" 1-го, 2-го и 3-го порядка. Волны 1-го порядка (I) синхронизированы с сокращениями сердца. Именно их и называют "пульсовыми волнами". Волны 2-го порядка (II) синхронизированы с ритмом дыхания человека, их называют "дыхательными волнами". Причина их появления состоит в том, что сердце находится внутри грудной клетки, где давление меняется в процессе дыхания (снижается относительно атмосферного при вдохе и повышается при выдохе). Из-за этого в такт с дыханием соответственно меняются артериальное давление, а поэтому и изменения объема.

Волны 3-го порядка (III) связывают с периодической активностью центров нейрогуморального регулирования тонуса кровеносных сосудов.

Обработка пульсовых волн в микрокомпьютере, который входит в состав фотоплетизмографа, позволяет подсчитывать и выводить на дисплей частоту сердечных сокращений (в ударах за минуту), обнаруживать нарушения сердечного ритма, сигнализировать об опасных нарушениях и "выпадениях пульса", вычислять среднюю амплитуду пульсаций и сигнализировать, когда она выходит за критические пределы. И это еще не все.

На рис. 18.3 рис. 18.3 более детально показана структура пульсовой волны.

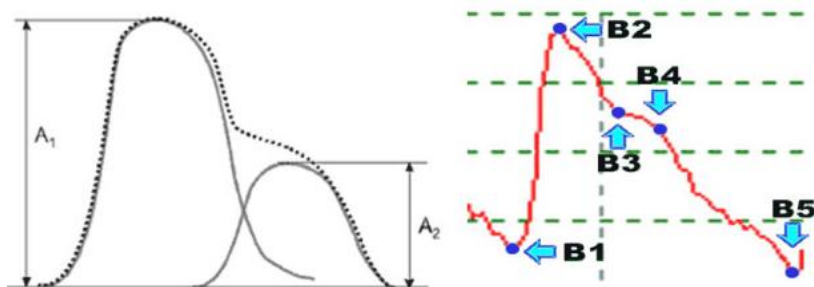


Рис. 18.3. Структура пульсовой волны: A_1 – амплитуда анакротической части пульсовой волны; A_2 – амплитуда дикротической части волны. Справа – нормативные точки для количественного оценивания пульсовой волны

Она состоит из двух основных частей (рис. 18.3, слева). Первая (A_1) соответствует так называемому "анакротическому периоду" – фазе наибольшего сокращения сердечных мышц, а вторая (A_2) – "дикротическому периоду". Амплитуда анакротической составляющей (A_1) отражает величину ударного объема крови, который выталкивается из сердца. Дикротическая составляющая связана с тем, что при выбросе крови сердцем под действием повышенного давления аорта и крупные магистральные артерии упруго растягиваются, а когда систолическое давление идет на убыль, то возвращаются в исходное состояние, выбрасывая при этом накопленный объем крови. Чем больше этот объем, тем выше амплитуда A_2 . Поэтому эта амплитуда позволяет судить об упругости аорты и магистральных артерий.

На рис. 18.3 справа показаны нормативные точки, предназначенные для количественного оценивания пульсовой волны. По координатам

этих точек (t – время, x – вертикальное отклонение) микрокомпьютер рассчитывает ряд важных количественных показателей: период сокращения сердца, амплитуды и продолжительность анакротической и диакротической составляющих и другие важные показатели, которые позволяют лучше оценить состояние и работу сердечно-сосудистой системы пациента.

Выделяя и оценивая дыхательные волны, микрокомпьютер может также контролировать наличие, глубину и "стиль" дыхания человека и подавать сигналы опасности в случаях продолжительной остановки или опасных нарушений дыхания.

Все эти возможности интеллектуальных фотоплетизмографов сделали их желательным инструментом анестезиологов во время сложных операций, а также дежурного медицинского персонала в реанимационных отделениях. В обоих случаях очень важно непрерывно следить за состоянием тяжело больных людей и своевременно реагировать на выявленные нарушения сердечной деятельности или дыхания. Отвлечение внимания и потеря бдительности могут стоить человеку жизни. А фотоплетизмограф оказался наиболее старательной "сиделкой", бдительным "сторожем".

Как видно на данном примере, медиков интересует часто не столько сам первичный, сырой сигнал фотоплетизмографии, сколько результаты анализа этого сигнала и вытекающие из него жизненно важные выводы для практической деятельности. Таковую, не просто наблюдательную, измерительную, а уже и диагностическую работу как раз и способны выполнять интеллектуальные сенсоры. Подобная ситуация возникает во многих областях их применения.

18.2.2. Фотоплетизмография "на отражение"

Кроме фотоплетизмографов, которые работают в традиционной оптической схеме на пропускание (сквозь палец или сквозь мочку уха), со временем были созданы и фотоплетизмографы, которые работают со световыми сигналами, обратно рассеянными от тела (рис. 18.4).

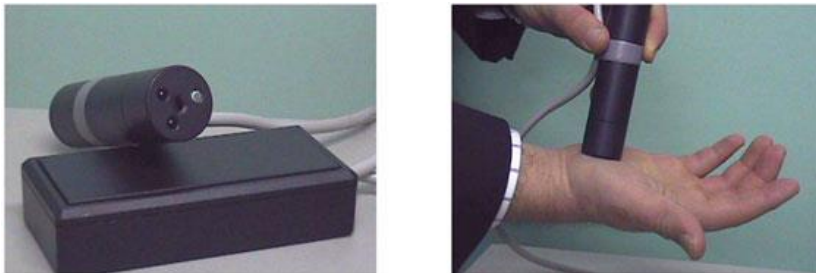


Рис. 18.4. Портативный фотоплетизмограф, работающий со световыми сигналами, обратно рассеянными телом: слева – внешний вид, справа – сенсор в работе при исследовании сигналов, снимаемых с ладони

Такой режим работы часто сокращенно называют фотоплетизмографией "на отражение", хотя на самом деле тут используется не прямо отраженный поверхностью кожи, а обратно рассеянный телом свет. Использование такого режима существенно расширило сферу возможных исследований практически на любую часть тела. Такую схему работы с обратно рассеянным светом мы рассмотрим детальнее в "Спектрофотометрия в обратно рассеянном свете. Гемоглобинометры и сенсоры кровенаполнения".

18.2.3. Оклюзионная фотоплетизмография

Следующим шагом в развитии фотоплетизмографии стала окклюзионная фотоплетизмография, при которой искусственно создаются преграды для притока и оттока крови из исследуемого участка тела. В типичном варианте окклюзионного исследования фотоплетизмограма записывается на конечной фаланге пальца, когда на предплечье той же руки надета компрессионная резиновая манжета. Манжета позволяет менять внешнее давление на кровеносные сосуды, а внешнее давление изменяет условия протекания крови по сосудам. Наблюдая происходящие изменения на фотоплетизмограмме, мы получаем возможность добывать дополнительную ценную информацию об организме человека.

Одной из таких возможностей является, например, возможность весьма точно измерять давление крови в плечевой артерии. Наиболее точные результаты получают при использовании так называемой декомпрессионной методики, которую иллюстрирует рис. 18.5.

Сначала наблюдают пульсирование крови в пальце в нормальных условиях, когда в манжете нет избыточного давления воздуха (участок I). Потом быстро начинают накачивать воздух, повышая давление в манжете до значения несколько выше систолического артериального давления крови P_c (участок II). Это давление передается на все кровеносные сосуды под манжетой. Как только давление становится выше давления крови в венах, вены перекрываются, и отток крови из них прекращается.

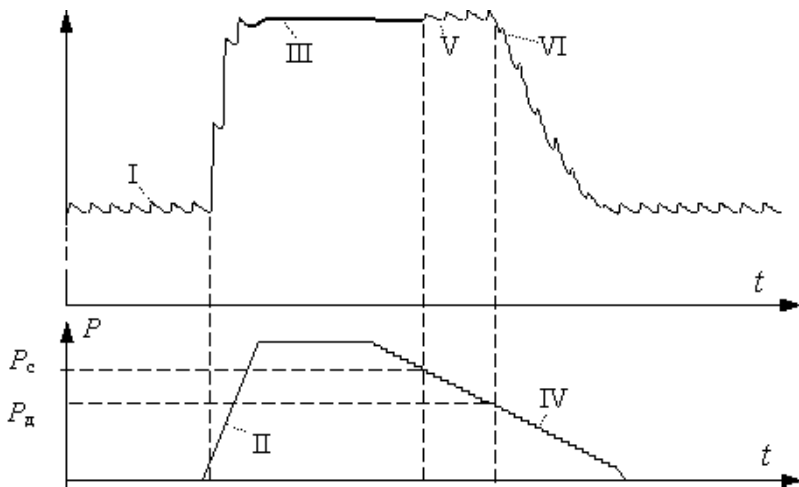


Рис. 18.5. Измерение артериального давления и частоты пульса с помощью окклюзионной фотоплетизмографии декомпрессионным методом. Внизу – график изменения давления в компрессионной манжете. Вверху – соответствующая фотоплетизмограмма

Пока давление в манжете остаётся ниже систолического, приток крови через плечевые артерии в кисть и пальцы руки с каждым сокращением сердца продолжается. Поэтому кровенаполнение пальца возрастает, соответственно возрастает и сигнал на фотоплетизмограмме. Когда же внешнее давление на артерии становится выше систолического, артерии перекрываются, и приток крови тоже прекращается. На фотоплетизмограмме исчезают пульсовые волны (участок III), уровень сигнала перестает изменяться, а давление в венах сравнивается с давлением в артериях.

После этого начинают постепенно снижать давление в манжете (участок *IV*). Когда давление в ней становится немного ниже систолического, на вершине "пика" сердечного выброса кровь получает возможность проталкиваться сквозь артерии, и на фотоплетизмограмме снова появляются пульсовые волны. Значение давления в манжете в этот момент времени принимается за систолическое давление P_c . Появление пульсовых волн, однако, не изменяет кровенаполнения пальца, так как отток крови еще перекрыт, и средний уровень сигнала остается постоянным (участок *V*). Это тот случай, когда пульсация крови есть, а кровотока сквозь палец нет. Лишь тогда, когда давление в манжете, т.е. внешнее давление на вены становится ниже диастолического P_d , возможным становится и отток крови из вен. Кровенаполнение пальца начинает уменьшаться, сигнал на фотоплетизмограмме идет на спад (участок *VI*). Давление P_d в манжете в момент начала спада принимается за диастолическое. Исследования показали, что по такой методике артериальное давление определяется точнее, чем обычными тонометрами с прослушиванием пульса.

В интеллектуальных фотоплетизмографах выполнением всех необходимых манипуляций (накачка и постепенное снижение давления воздуха в манжете, запись фотоплетизмограммы и профиля изменения давления, определение систолического и диастолического артериального давления, частоты пульса, их отображение на дисплее и т.п.) автоматически управляет микроконтроллер. В необходимых случаях он организует повторную автоматическую подкачку воздуха и более плавное снижение давления с целью уточнения результата измерения.

При окклюзионном исследовании периферийных кровеносных сосудов с помощью интеллектуального фотоплетизмографа давление в компрессионной манжете повышают лишь до уровня ниже диастолического, но выше обычного давления крови в венах – около 30 мм рт. ст. Принцип исследования иллюстрирует рис. 18.6.

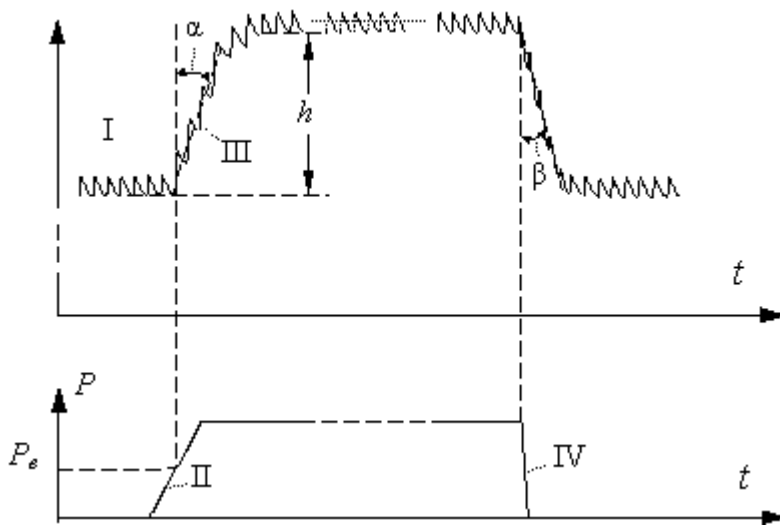


Рис. 18.6. Исследование периферического кровообращения с помощью окклюзионной фотоплетизмографии: внизу - график изменения давления в компрессионной манжете; вверху - соответствующая фотоплетизмограмма

Сначала наблюдают пульсовые волны в пальце при отсутствии воздуха в манжете (участок I). Если надо определить давление крови в венах, то постепенно повышают давление в манжете (участок II). Когда оно сравнивается с давлением крови в венах, вены перекрываются, отток крови из пальца прекращается, его кровенаполнение начинает возрастать. Соответственно возрастает сигнал на фотоплетизмограмме (участок III). Давление, при котором начинается рост, и принимают за венозное давление $P_{\text{встб}}$.

Скорость нарастания сигнала пропорциональна скорости притока крови к пальцу. Поэтому значение $\text{ctg } \alpha$ характеризует пропускную способность прекапиллярных кровеносных сосудов и величину объемного кровотока в пальце. Рост кровенаполнения приводит к постепенному повышению давления крови в венах. Когда оно становится выше внешнего давления, вены открываются, восстанавливается отток крови из пальца. И спустя некоторое время наступает равновесие: отток крови уравнивается ее притоком, кровенаполнение перестает изменяться. Если давление в манжете фиксировано, то прирост сигнала h тем больше, чем больше

эластичность кровеносных сосудов пальца. Поэтому эта величина тоже является характерным показателем фотоплетизмограммы. С ее помощью можно оценить эластичность мельчайших вен и отследить, как влияют на пациента лекарства, предназначенные для расширения или сужения сосудов.

Если быстро выпустить воздух из манжеты (участок *IV*), то внешнее давление на вены исчезает, отток крови через них становится беспрепятственным, кровенаполнение пальца начинает уменьшаться. Скорость уменьшения сигнала на фотоплетизмограмме зависит от гидравлического сопротивления посткапиллярных сосудов оттоку крови. Значение $\text{ctg } \beta$ характеризует это сопротивление и проходимость вен пальца.

18.2.4. Примеры фотоплетизмографов

В качестве примеров на рис. 18.7 показаны фотоплетизмографы Rheoscreen Light фирмы Medizinische Messtechnik Gmb (слева) и Rheo Dopplex II фирмы HUNTLEIGH (справа).



Рис. 18.7. Слева – фотоплетизмограф Rheoscreen Light фирмы Medizinische Messtechnik Gmb; справа – фотоплетизмограф Rheo Dopplex II фирмы HUNTLEIGH, объединенный с ультразвуковым доплеровским анализатором кровотока

Первый имеет размеры типичного портативного компьютера – "ноутбука". Его можно использовать как для обычной, так и для окклюзионной фотоплетизмографии на пальцах руки или ноги (с

помощью дополнительной выносной оптоэлектронной головки) и на других органах тела. Фотоплетизмограммы и результаты их обработки выводят на экран монитора.

В состав портативного прибора Rheo Dopplex II массой 0,3 кг, кроме фотоплетизмографа, входит также блок ультразвуковой доплероскопии кровеносных сосудов, о которой шла речь в "Интеллектуальные акустические сенсоры для УЗИ. Сенсоры для сейсморазведки. Сенсоры на ПАВ" .

Результаты измерений выводят на портативный принтер [<http://www.medalnet.ru/images/catalogue/diagnostics/dopplers/rheoDoppleXII.jpg>].

Оба сенсора имеют цифровой внешний интерфейс RS – 232 и все другие присущие интеллектуальным сенсорам возможности (самоконтроль, контроль источника питания, запоминание многих результатов измерения, звуковая и визуальная сигнализация и т.п.).

18.3. Оксиметры и пульсоксиметры

Еще в 30-х – 40-х годах XX в. начались разработки оксиметров – приборов для неинвазивного (без взятия пробы крови) измерения насыщения крови кислородом. Их действие основано на специфических спектрах поглощения молекул гемоглобина, которые переносят кислород из лёгких ко всем частям тела и входят в состав эритроцитов – красных кровяных телец крови. В альвеолах легких молекулы гемоглобина (Hb) химически присоединяют к себе кислород, превращаясь на оксигемоглобин (HbO₂). С потоком крови они попадают в разные органы и биологические ткани тела, где молекулы HbO₂ диссоциируют, отдают кислород окружающим клеткам и превращаются в восстановленный гемоглобин Hb. Этот процесс должен быть непрерывным потому, что без постоянного поступления кислорода клетки быстро теряют способность функционировать и отмирают. Особенно болезненно реагируют на недостатку кислорода нервные клетки головного мозга. Таким образом, функции, выполняемые в организме человека молекулами гемоглобина, без всяких натяжек, жизненно важны. И показатель насыщения крови кислородом является чрезвычайно важным.

18.3.1. Спектры поглощения разных форм гемоглобина

Спектры поглощения разных форм гемоглобина показаны на [рис. 18.8](#). По горизонтали здесь отложена длина волны света в нанометрах (нм), а по вертикали – десятичный логарифм молярного коэффициента поглощения.

Обычно в крови в значительных количествах присутствуют лишь оксигемоглобин и восстановленный гемоглобин. Спектры этих форм гемоглобина, как видно из рис. 18.8, на некоторых участках заметно отличаются. Сильное поглощение обеими этими формами гемоглобина фиолетового (380-450 нм), синего (450-480 нм), голубого (480-510 нм), зеленого (510-550 нм) света придает крови красную окраску. А существенно разное поглощение оксигемоглобином и восстановленным гемоглобином красного света (620-760 нм) предопределяет разные оттенки цвета артериальной (насыщенной кислородом) и венозной крови. Это различие и позволило создать интеллектуальные оксиметры, предназначенные для неинвазивного измерения насыщенности крови кислородом.

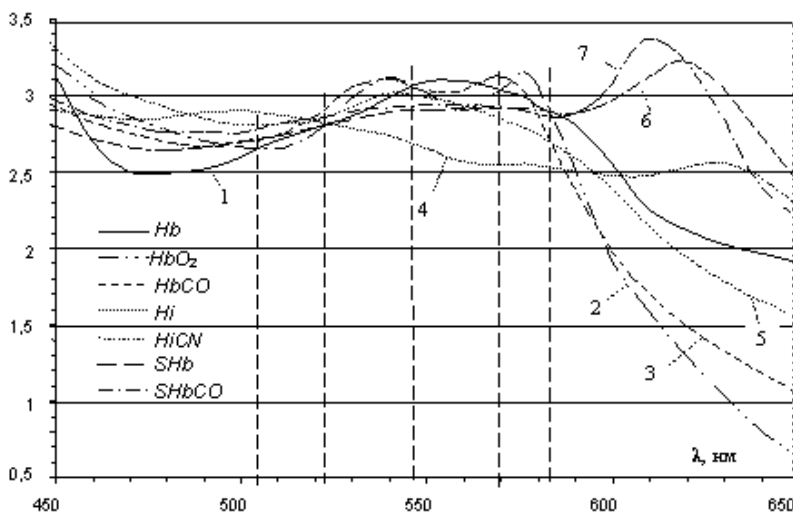


Рис. 18.8. Спектры поглощения разных форм гемоглобина: 1 – восстановленный гемоглобин (Hb); 2 – оксигемоглобин (HbO₂); 3 – карбоксигемоглобин (HbCO); 4 – метгемоглобин (Hi) при pH = 7,2; 5 –

цианметгемоглобин (HiCN); 6 – сульфогемоглобин (SHb); 7 – карбоксисульфогемоглобин (SHbCO)

18.3.2. Принцип действия оксиметров

Выбирают 2 разные длины волны: одну, которую называют "опорной" или "референтной", – в той области спектра, где HbO_2 и Hb поглощают свет одинаково слабо, например, при $\lambda_0=780$ нм; вторую, "измерительную", – в том спектральном интервале, где коэффициенты поглощения молекул HbO_2 и Hb значительно отличаются, например, при $\lambda_{\text{и}}=650$ нм. Если сквозь какую-то часть тела, например, сквозь мочку уха или сквозь палец пропустить пучок света, в котором имеются спектральные составляющие указанных длин волны, то при прохождении сквозь тело составляющая с "измерительной" длиной волны поглощается сильнее. И на выходе из тела она оказывается значительно слабее, чем "опорная" спектральная составляющая. Интенсивность "измерительной" составляющей к тому же тем меньше, чем ниже уровень насыщения крови кислородом. Измерение и сравнение спектральных интенсивностей указанных составляющих и позволяет количественно определить насыщенность крови кислородом.

Проведем количественный расчет. Спектральная интенсивность света на выходе из тела согласно законам (18.7, 18.9) на длине волны λ_0 (в опорном канале) составляет

$$I_O = T_O I_{O,0} \exp[-(K_{\phi,O} + k_{\text{Hb},O} c_{\text{Hb}} + k_{\text{Hb},O} c_{\text{HbO}}) d] \quad (18.10)$$

и на длине волны $\lambda_{\text{и}}$ (в измерительном канале) –

$$I_{\text{и}} = T_{\text{и}} I_{\text{и},0} \exp[-(K_{\phi,\text{и}} + k_{\text{Hb},\text{и}} c_{\text{Hb}} + k_{\text{Hb},\text{и}} c_{\text{HbO}}) d] \quad (18.11)$$

где T_O и $T_{\text{и}}$ – пропускание кожи на длинах волны λ_0 и $\lambda_{\text{и}}$ соответственно;

$I_{O,0}$, $I_{\text{и},0}$ – спектральные интенсивности светового зонда при входе в тело на длине волны λ_0 и $\lambda_{\text{и}}$ соответственно;

$K_{\phi,O}$ и $K_{\phi,\text{и}}$ – коэффициенты "фонового" поглощения света, т.е. поглощения всеми компонентами ткани тела, кроме гемоглобина и оксигемоглобина, на длине волны λ_0 и $\lambda_{\text{и}}$ соответственно;

$k_{Hb,O}$ и $k_{Hb,I}$ – молярные коэффициенты поглощения восстановленного гемоглобина на длине волны λ_O и λ соответственно;

$k_{Hb,OO}$ и $k_{Hb,OI}$ – молярные коэффициенты поглощения оксигемоглобина на длинах волны λ_O и λ соответственно;

c_{Hb} и c_{HbO} – молярные концентрации восстановленного гемоглобина и оксигемоглобина в ткани тела;

d – длина пути света в ткани.

Логарифмируя выражения (18.10) и (18.11) и преобразуя их, получаем

$$k_{Hb,O}c_{Hb} + k_{Hb,OO}c_{HbO} = [\ln (T_O I_{O,0} / I_O) - K_{\Phi,O}] / d \quad (18.12)$$

$$k_{Hb,I}c_{Hb} + k_{Hb,OI}c_{HbO} = [\ln (T_I I_{I,0} / I_I) - K_{\Phi,I}] / d \quad (18.13)$$

Полученные выражения можно рассматривать как систему двух линейных алгебраических уравнений относительно концентраций c_{HbO} и c_{Hb} .

Кислородную насыщенность крови (или насыщение крови кислородом) количественно определяют как отношение концентрации молекул оксигемоглобина к общей концентрации молекул гемоглобина и обычно выражают в %.

Решая систему (18.12-18.13), находим кислородную насыщенность крови в исследуемом участке тела

$$S = \frac{c_{HbO}}{c_{Hb} + c_{HbO}} = \frac{k_{Hb,I} - ak_{HbO,O}}{k_{Hb,I} + k_{HbO,I} - a(k_{Hb,O} + k_{HbO,O})} \quad (18.14)$$

где

$$a = [\ln (T_I I_{I,0} / I_I) - K_{\Phi,I}] / [\ln (T_O I_{O,0} / I_O) - K_{\Phi,O}] \quad (18.15)$$

Здесь $k_{Hb,I}$, $k_{Hb,OI}$, $k_{Hb,OS}$, $k_{Hb,OO}$ – константы, которые являются характеристиками молекул гемоглобина и оксигемоглобина; $K_{\Phi,I}$ и $K_{\Phi,O}$ – константы, являющиеся характеристиками других компонент

живой ткани; T_i , $T_{O,i}$ и $I_{i,0}$, $I_{O,0}$ – константы прибора. Величины I_i и I_O измеряются.

Как видим, в расчетные формулы не входит длина пути d света в ткани, поскольку при отношении концентраций она сокращается. Это очень важно, поскольку длина пути d света в ткани не является здесь фиксированной, так как толщина пальца или мочки уха у разных людей разная. Таким образом, определение не абсолютной, а относительной концентрации вещества, как в данном случае, существенно упрощает задачу построения медицинского спектрофотометрического сенсора.

Наличие микрокомпьютера позволило быстро выполнять все необходимые вычисления в самом сенсоре и выдавать пользователю найденный уровень насыщения крови кислородом в удобной для врача форме – в процентах.

18.3.3. Принцип действия пульсоксиметров

Оксиметр определяет среднюю насыщенность кислородом всей крови, которая находится в исследуемом участке тела, например в пальце. Но оказалось, что врачей больше интересует насыщенность кислородом артериальной крови, так как именно она свидетельствует об эффективности работы дыхательной системы человека. Решить эту задачу, да еще и соединить ее с выполнением задач, решаемых и фотоплетизмографами, удалось в пульсоксиметрах.

Как и оксиметры, они являются спектрофотометрическими двухволновыми сенсорами. Свет от двух светодиодов, излучающих свет один – на длине волны $\lambda_i=660$ нм, другой – на длине волны $\lambda_o=940$ нм, пропускают сквозь исследуемый участок тела (тоже чаще всего палец). Оксигемоглобин и восстановленный гемоглобин очень по-разному поглощают свет с длиной волны 660 нм. Фотодиод принимает свет на противоположной стороне пальца. Как и в фотоплетизмографе, сигналы на обеих длинах волны имеют не только постоянную, но и переменную составляющие, обусловленные пульсированием крови и дыханием. Анализируя сигнал в опорном канале, как выше описано для фотоплетизмографа, пульсоксиметр может выполнять все те задачи, что и фотоплетизмограф. Кроме того, он еще определяет и насыщение кислородом артериальной крови.

Если c_{Hb} и c_{HbO} – молярные концентрации восстановленного гемоглобина и оксигемоглобина в диастоле (фаза наиболее низкого артериального давления), то интенсивность света, который проходит на фотодиод в опорном и измерительном каналах, можно вычислить соответственно по формулам (18.10) и (18.11).

В фазе систолы, когда артериальное давление максимальное, молярные концентрации из-за притока артериальной крови временно возрастают соответственно на величину Δc_{Hb} и Δc_{HbO} . Следовательно, соотношение

$$S = \frac{\Delta c_{HbO}}{\Delta c_{Hb} + \Delta c_{HbO}} \quad (18.16)$$

и есть насыщенность кислородом именно артериальной крови.

Приросты Δc_{Hb} и Δc_{HbO} составляют обычно лишь несколько процентов от c_{Hb} и c_{HbO} . Поэтому модули прироста интенсивности сигналов $|\Delta I_O|$ и $|\Delta I_I|$ в опорном и измерительном каналах можно приблизительно вычислить, дифференцируя выражения (18.10) и (18.11) по переменным c_{Hb} и c_{HbO} . Поделив модули прироста на величину соответствующих интенсивностей и учитывая то, что на длине волны λ_O поглощение оксигемоглобина и восстановленного гемоглобина приблизительно одинаково ($k_{Hb,O} \approx k_{HbO,O} = k_O$), а на длине волны λ_I поглощение оксигемоглобина намного меньше ($k_{Hb,I} \gg k_{HbO,I}$), получим

$$\frac{|\Delta I_O|}{I_O} \approx k_O d(\Delta c_{Hb} + \Delta c_{HbO}); \quad \frac{\Delta I_I}{I_I} \approx k_{Hb,I} d\Delta c_{HbO} \quad (18.17)$$

Пользуясь выражениями (18.16) и (18.17), легко найти, что

$$S \approx k_{Hb,I} \frac{\Delta I_I}{I_I} / \left(k_O \frac{\Delta I_O}{I_O} \right) \quad (18.18)$$

Полученной формулой, как правило, и пользуются в пульсоксиметрах, хотя она и является приближительной.

Благодаря дополнительной возможности определения насыщения артериальной крови кислородом осуществляется более надёжный контроль процесса дыхания. Поэтому после появления на рынке пульсоксиметров врачи стали отдавать им предпочтение перед фотоплетизмографами при оснащении операционных и реанимационных палат в больницах.

18.3.4. Примеры пульсоксиметров

Ныне промышленность выпускает десятки разных вариантов пульсоксиметров. Некоторые из них показаны на рис. 18.9. Цифровой пульсоксиметр MARG 10-01 "Микролюкс" К1 предназначен для установки рядом с больным в операционных, послеоперационных, реанимационных залах и в палатах интенсивной терапии. Его размеры 160x140x60 мм. Выносная оптоэлектронная головка смонтирована в "клипсе", которая одевается как не сильно сжимающая "прищепка" на палец пациента. Через заданные врачом промежутки времени пульсоксиметр сам автоматически измеряет частоту пульса и насыщенность артериальной крови кислородом и выводит их значения на яркий цифровой дисплей. Яркость светового столбика посередине дисплея модулируется пульсовой волной, так что на расстоянии нескольких метров можно наглядно видеть наличие и оценивать наполнение пульса. По желанию пользователя пульсовые волны могут сопровождаться негромким звуковым сигналом. А в случае прекращения пульса, выхода его частоты или насыщения артериальной крови кислородом за указанные пределы, сенсор может подавать громкую звуковую тревогу. Он питается через адаптер от стандартной электросети. Его можно питать также от встроенного аккумулятора, рассчитанного на 6 часов работы, и тогда он может применяться в реанимационном автомобиле (см. Интернет сайт <http://www.microlux.ru/oxilux.htm>).

Цифровой пульсоксиметр -монитор 504 DX имеет размеры 144x178times;122 мм, современный дизайн, легко понятную систему меню, полный набор функций звуковых и визуальных тревожных сообщений. Он обеспечивает круглосуточный и ночной мониторинг, в том числе и за малыми детьми (при использовании сменной выносной оптоэлектронной головки детского размера). По своему желанию пользователь может купить дополнительно портативный принтер, который будет документировать результаты измерения на протяжении заданного времени, в том числе с построением графиков, таблиц,

отчетов заданного формата. Насыщение крови кислородом измеряется в диапазоне от 40 до 99 % с точностью $\pm 2\%$, частота пульса – в диапазоне от 20 до 300 уд./мин. На дисплей может быть выведена пульсовая волна и текстовые сообщения на одном из многих запрограммированных языков. Имеются порт RS-232, аналоговый и цифровой выходы.



Пульсоксиметр цифровой
МАРГ 10-01 «Микролюкс» К1



Цифровой пульсоксиметр-
монитор 504 DX



Пульсоксиметры фирмы Nonin, США: слева – AVANT 2120 с измерением артериального давления; справа – NONIN 9840 с измерением концентрации CO₂



Портативные пульсоксиметры 503 DX miniSPO2t (слева) и ONYX 9500

Рис. 18.9. Некоторые типы интеллектуальных пульсоксиметров

Пульсоксиметр AVANT 2120 фирмы NONIN (США), кроме частоты пульса и насыщения артериальной крови кислородом, может автоматически измерять также артериальное давление. Для этого он оснащен манжетой, портативным управляемым компрессором и манометром.

А пульсоксиметры серии NONIN 9840 той же фирмы могут дополнительно измерять парциальное давление CO_2 в воздухе, который выдыхает пациент.

Портативный пульсоксиметр 503DX miniSPO2t размером 146x91x33 мм предназначен для применения службами скорой помощи, в клиниках и в частных практиках. Благодаря универсальному набору оптоэлектронных головок, он позволяет обследовать людей любого возраста, обеспечивать круглосуточный мониторинг.

А наименьший в мире пульсоксиметр ONYX 9500 фирмы Nonin, показанный на рис. 18.9 внизу справа, можно на всякий случай всегда носить с собой в кармане или в сумочке. Он также позволяет быстро делать разовые измерения частоты пульса и насыщенности артериальной крови кислородом, проводить кратковременный мониторинг состояния больного (дело в том, что энергии встроенного миниаккумулятора хватает в нем лишь на 1 час работы).

В пульсоксиметрах ОП-32А производства ООО НЕЙРОСОФТ дополнительно отслеживается периферийная гемодинамика, рассчитывается количество артериальной крови, которая проходит через поперечное сечение оптоэлектронной головки за один удар пульса или за 1 мин.

19. Спектрофотометрия в обратно рассеянном свете. Гемоглобинометры и сенсоры кровенаполнения

19.1. Анализ трудностей, возникающих при реализации неинвазивных спектрофотометрических сенсоров

В фотоплетизмографах, оксиметрах и пульсоксиметрах не шла речь об измерении абсолютных концентраций тех или других биохимически важных веществ в человеческом теле. А такая потребность часто возникает в медицине и биологии. Раньше в таких случаях на анализ обязательно брали пробу крови или образец ткани, соответствующим образом препарировали их и лишь после этого производили анализы. Но сейчас биологи и медики, как уже подчеркивалось, стремятся как можно больше информации получать без травмирования живой ткани, с наименьшим влиянием на естественные процессы. Но такие, неинвазивные измерения принципиально исключают предварительное препарирование, перевод объекта исследования в форму, наиболее удобную для измерений. И с этим связаны значительные технические трудности при разработке неинвазивных оптических сенсоров. Они вытекают из того, что:

- живые биологические ткани (далее – биоткани) имеют сложную клеточную микроструктуру, и поэтому оптически очень неоднородны; кроме поглощения, в них происходит значительное рассеяние света, которое варьирует при переходе от одного участка тела к другому, от одного человека к другому, что значительно усложняет задачи анализа;
- в биоткани, как правило, кроме вещества-аналита присутствует большое количество других биохимических веществ, создающих "фоновое" поглощение; от него бывает не просто отделить поглощение именно аналита;
- в человеческом теле мало участков, пригодных для измерений "на просвет", причем у разных людей такие участки (например, мочка уха, конечная фаланга пальца) имеют разную толщину, которая к тому же зависит от физиологического состояния и от сжатия. Поэтому более универсальной для неинвазивных измерений в живом теле

- была бы схема измерений "на отражение", когда для измерений используют обратно рассеянный телом свет;
- однако при работе "на отражение" значительную роль играет способ выделения измеряемого пучка света и оптический контакт между телом и прибором, которые могут значительно варьировать от одного измерения к другому;
 - технология работы "на отражение" до 90-х г.г. XX века еще не была должным образом проработана.

Все эти трудности, по мнению некоторых специалистов, делают неинвазивные количественные спектрофотометрические измерения концентраций биологически важных веществ в человеческом теле якобы безнадежным делом.

19.1.1. Учет неконтролируемого рассеяния света

Однако не все так безнадежно, как это кажется скептикам. Начнем с проблемы выделения вклада именно поглощения при наличии рассеяния света. Усложним рассмотренную в "Спектрофотометрические сенсоры как один из видов оптических сенсоров. Фотоплетизмографы. Оксиметры и пульсоксиметры" (п. 18.1.2) классическую ситуацию с прохождением света сквозь плоскопараллельный слой раствора тем, что добавим в раствор вещество, которое не поглощает свет, но вызывает заметное его рассеяние (рис. 19.1). Тогда при прохождении сквозь раствор свет ослабляется уже не только из-за поглощения молекулами красителя, но также и в результате рассеяния. Поэтому вместо формулы (18.8) имеем

$$K = K_p + k_{mol}C \quad (19.1)$$

где K_p – коэффициент дополнительного ослабления света, обусловленного его рассеянием.

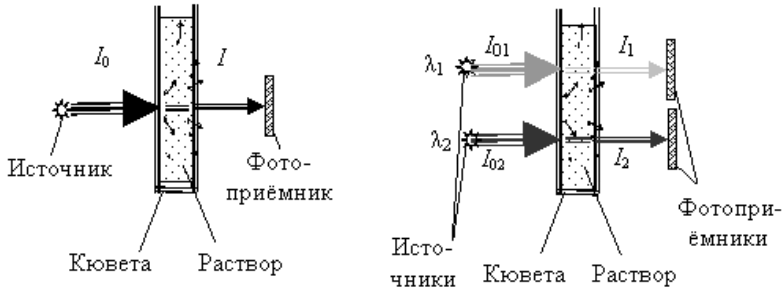


Рис. 19.1. Измерение концентрации красителя при наличии рассеяния света: слева – одноволновым, справа - двухволновым методом

Если значение K_P не превышает во много раз значения $k_{mol}c$, то, зная d , K_P , k_{mol} и измерив спектральные интенсивности I_0 , I , тоже можно определить концентрацию красителя.

Усложним ситуацию дальше. Пусть коэффициент рассеяния света K_{sc} нам не известен и *может меняться от одного измерения к другому*. Оказывается, что и это можно учесть, если вне основной полосы поглощения красителя существует такая длина волны λ_2 , на которой рассеяния света такое же, как и на длине волны полосы поглощения λ_1 . Тогда надо измерить спектральные интенсивности падающего и прошедшего сквозь кювету света на обеих длинах волны (рис. 19.1 справа). Имеют место соотношения:

$$I_1 = T_1 I_{1,0} \exp[-(K_{P,1} + k_{mol,1}c)d] ; \quad (19.2)$$

$$I_2 = T_2 I_{2,0} \exp[-(K_{P,2} + k_{mol,2}c)d] \quad (19.3)$$

где $I_1, I_{1,0}$ – спектральные интенсивности света, прошедшего сквозь раствор, и входящего в раствор, на длине волны λ_1 ;
 $I_2, I_{2,0}$ – спектральные интенсивности света, прошедшего сквозь раствор, и входящего в раствор, на длине волны λ_2 ;
 T_1, T_2 – пропускание кюветы на длине волны λ_1 и λ_2 соответственно;

$K_{P,1}$ и $K_{P,2}$ – коэффициенты рассеяния света на длине волны λ_1 и λ_2 соответственно; $k_{mol,1}$ и $k_{mol,2}$ – молярные коэффициенты поглощения красителя на длине волны λ_1 и λ_2 соответственно.

Если поделить выражение (19.2) на (19.3) и учесть, что $K_{P,1} \approx K_{P,2}$, то получаем

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{T_1 I_{1,0}}{T_2 I_{2,0} \exp[-(k_{mol,1} - k_{mol,2})cd]} \quad (19.4)$$

Это соотношение тоже позволяет определить концентрацию красителя в растворе, рассеивающем свет, по измеренным значениям I_1, I_2 и известным значениям $T_1, T_2, I_{1,0}, I_{2,0}, k_{mol,1}, k_{mol,2}, d$. Таким образом, *измерение спектральных интенсивностей на двух удачно подобранных длинах волны позволяет надёжно определять концентрацию вещества даже в условиях, когда рассеяние света раствором значительно и варьирует от измерения к измерению*. Главное, чтобы эти вариации были одинаковыми в обоих рабочих спектральных интервалах.

19.1.2. Учет неконтролируемого фонового поглощения

Двухволновая схема измерения позволяет избавиться также и от влияния неконтролируемого фонового поглощения света другими веществами, присутствующими в растворе, при условии, что это фоновое поглощение слабее поглощения молекулами красителя и является приблизительно одинаковым на обеих длинах волны λ_1 и λ_2 . Теоретический расчет для обоснования этого приблизительно таков же, как и выше. Только, кроме коэффициента рассеяния K_P , в формулах появляется слагаемое $K_{ФП}$ — коэффициент фонового поглощения. Если на длине волны λ_2 он практически такой же, как и на длине волны λ_1 , то от его влияния тоже можно избавиться, используя отношение спектральных интенсивностей. Результат измерения при этом почти не чувствителен к вариациям фонового поглощения, лишь бы только эти вариации были приблизительно одинаковыми в обоих рабочих спектральных интервалах.

Если излучение обеих спектральных компонент исходит из одного источника света, то *двухволновая схема делает измерение практически нечувствительным к некоторым вариациям мощности излучения, лишь бы только спектральные интенсивности изменялись одинаково в обоих рабочих спектральных интервалах*.

Если в исследуемом растворе присутствуют фоновые вещества, поглощение которых существенно отличается на двух выбранных длинах волны, тогда для определения концентрации аналита используют 3-волновой или *многоволновой* метод. Т.е. измеряют спектральные интенсивности света уже при трех или больше специально подобранных длинах волны с таким расчетом, чтобы фоновое поглощение можно было исключить путем соответствующих вычислений.

19.2. Спектрофотометрия в обратно рассеянном свете

Рассмотрим теперь внимательнее трудности, связанные с переходом от классической схемы спектрофотометрического измерения "на просвет" к схеме измерений "на отражение". При последней схеме входной пучок света проникает сквозь кожу в живую ткань тела. Проходя сквозь ткань, свет рассеивается и поглощается. За счет рассеяния часть света возвращается к поверхности тела и выходит наружу. Спектральный состав света при этом изменяется в зависимости от наличия и от концентрации разных веществ в исследуемом участке тела. В отличие от схемы измерения "на просвет", путь, который проходит свет в живой ткани, при такой схеме измерения, вообще говоря, не фиксирован.

Для фотоплетизмографических сенсоров, оксиметров и пульсоксиметров это не играет особой роли. Но когда нужно измерять не относительную, а абсолютную концентрацию аналита, тогда путь d , который проходит свет в ткани, надо знать обязательно. Ибо, только зная этот путь, можно корректно вычислять концентрацию.

Возможно ли в принципе определить этот путь в схеме измерений "на отражение"? И, если возможно, то как именно? Этот вопрос и встал в 90-х г.г. XX в. перед исследователями и разработчиками спектрофотометрических интеллектуальных сенсоров.

19.2.1. Модель обратного рассеяния света

Точная математическая модель процесса распространения света в оптически сложной среде, которая не только поглощает и рассеивает свет, но еще и является такой неоднородной и многослойной, как биоткань вблизи поверхности человеческого тела, оказывается

довольно сложной. Она не была столь разработана, чтобы из нее можно было сделать однозначные практические выводы.

Все более широкое применение в 70-80-х г.г. лазеров для диагностики и лечения разных заболеваний подтолкнуло физиков-оптиков детально изучить взаимодействие света с биологическими тканями. В этой области выполнено немало экспериментальных исследований. Экспериментально установлено, например, что средняя длина свободного пробега фотонов видимого света между рассеяниями в наружном (роговом) слое кожи человека составляет порядка 5 мкм, и при прохождении сквозь роговой слой свет рассеивается не больше 4

6 раз. Средняя длина свободного пробега света в эпидермисе составляет уже примерно 20 мкм, и при прохождении сквозь эпидермис видимый свет рассеивается приблизительно 6-8 раз. В более глубоких слоях тела средняя длина свободного пробега фотонов видимого света между рассеяниями возрастает и составляет порядка 50 мкм. Следовательно, при прохождении сквозь тело пути в 2-4 мм свет рассеивается приблизительно 40-80 раз. В сумме имеем примерно 50-100 актов рассеяния. В этом случае нельзя применять такие упрощенные модели, как модель однократных рассеяний на большие углы, модель кратных рассеяний или диффузионную модель, которая "работает" при числе рассеяний свыше 500-1000. Наиболее приемлемой для данного случая является модель многократных рассеяний. Однако и она довольно сложна для подсчетов, которые обычно выполняются на ЭВМ методом статистического моделирования Монте-Карло.

Из имеющихся экспериментальных данных и компьютерных расчетов вытекает, что интегральная интенсивность обратно рассеянного человеческого телом света может составлять от 5 до 30 %. Даже если свет входит в ткань перпендикулярно к поверхности кожи в виде узкого пучка, который можно назвать "световым зондом", то и в этом случае обратно рассеянный свет распределяется по довольно большой площади на поверхности ткани. Фотография на рис. 19.2 слева, сделанная на вертикальном разрезе матового стекла, в которое вводится "световой зонд", наглядно иллюстрирует характер распространения света в среде, рассеивающей свет. Справа показано диффузно размытое круглое пятно радиусом приблизительно 4-6 мм, которое наблюдается в обратно рассеянном сине-зеленом свете.

Снимок сделан цифровой фотокамерой сверху. Темную тень дает оптическое волокно, через которое в тело вводился "световой зонд".



Рис. 19.2. Фотография слева иллюстрирует характер распространения света в рассеивающей среде (матовое стекло); справа – фото обратно рассеянного от человеческой руки диффузно размытого пятна в сине-зеленом свете

19.2.2. Пучок наиболее вероятных траекторий света

В приближении геометрической оптики можно говорить о "траекториях" прохождения света в ткани. Обратное рассеяние света от тела теоретически может иметь место в результате нескольких его рассеяний на большие углы (см. рис. 19.3, *а*, где показано прохождение света в разрезе перпендикулярно к поверхности кожи).

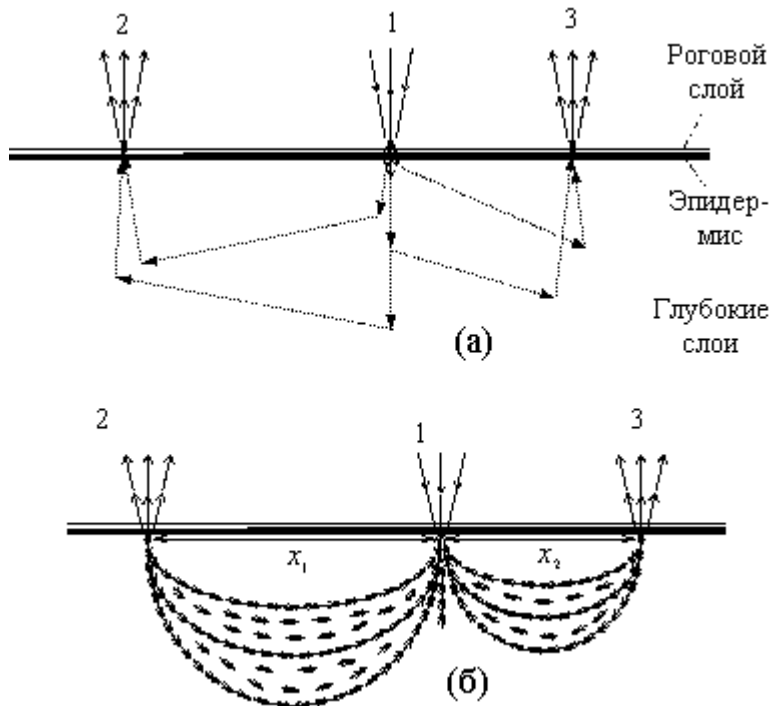


Рис. 19.3. а) Схематическое изображение обратного рассеяния светового пучка при нескольких рассеяниях на большие углы: 1 – первичный, 2 и 3 – обратно рассеянные световые пучки, отбираемые для измерений; б) пучки наиболее вероятных траекторий обратного рассеяния света посредством многократных рассеяний на малые углы

Кратчайший теоретически возможный путь света в ткани равняется при этом расстоянию x между точками входа и выхода света. Но для этого свет должен дважды (на входе и на выходе) рассеяться на большие углы. А вероятность рассеяния на большие углы намного меньше, чем вероятность рассеяния на малые углы. Поэтому такие траектории прохождения света в ткани являются наименее вероятными.

Более вероятными являются траектории прохождения света, обусловленные его многократными рассеяниями на малые углы (рис. 19.3, б). Пучок наиболее вероятных траекторий группируется вокруг

траектории, близкой к дуге окружности, вдоль которой многократные рассеяния происходят на одинаковые наименьшие возможные углы. Такой пучок траекторий специалисты в шутку называют "бананом".

Если от входа в тело до выхода из него световой луч разворачивается на угол β , то такие наименьшие углы рассеяния составляют $\alpha = \beta \cdot N$, где N – суммарное число рассеяний. Если световой зонд входит в тело по нормали, и мы отбираем для измерений световой пучок, который выходит из тела тоже по нормали к его поверхности, то угол разворота составляет 180 deg . Наименьшие углы рассеяния $\alpha = 180^\circ \cdot N$, что при $N = 100$ составляет $\alpha = 1,8^\circ$.

Таким образом, *при использовании остро сфокусированного светового зонда с небольшим углом расхождения, при фиксированном направлении его входа в тело и при фиксированном направлении выхода измеряемого обратно рассеянного пучка света из тела среднестатистический путь d света в ткани является более или менее фиксированным и пропорциональным к x . (Расстояние x между входящим и выходящим пучками должно быть больше радиуса светового зонда – порядка 0,5 мм).*

19.2.3. Характеристики светового поля обратного рассеяния света

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что, когда "световой зонд" входит перпендикулярно к поверхности тела, то интенсивность обратно рассеянного света зависит от расстояния до точки облучения и от направления выхода. Световое поле, создаваемое обратно рассеянным от тела светом, можно детально охарактеризовать с помощью распределений интенсивности этого света по координатам и по направлениям выхода. В тех случаях, когда структура биоткани тела одинакова во всех направлениях от точки входа светового зонда, световое поле обратного рассеянного света является осесимметричным. И в этих случаях для описания распределений лучше всего использовать полярную систему координат.

Характер зависимости интенсивности обратного рассеянного света от расстояния до точки облучения для таких случаев приблизительно показан на рис. 19.4. Здесь r_1 – радиус светового зонда, r_2 – расстояние, на котором интенсивность обратного рассеянного света становится максимальной. Положение максимума зависит от рассеивающих

свойств биоткани, от поглощения света в ней, от спектрального состава света.

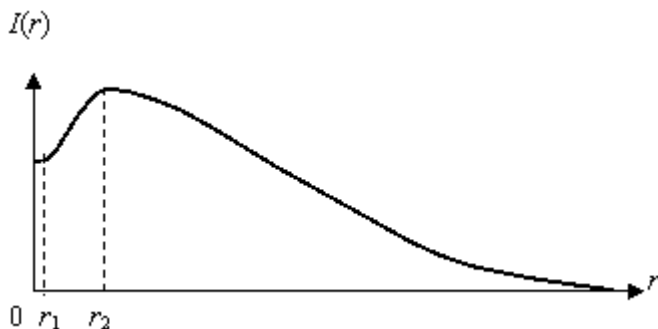


Рис. 19.4. Характер распределения интенсивности рассеянного света от расстояния до точки входа светового зонда

На рис. 19.5, например, показана экспериментально найденная зависимость от расстояния до точки облучения интенсивности зеленого света, обратно рассеянного мягкими тканями руки в направлении, перпендикулярном к поверхности кожи. Вдоль горизонтальной оси здесь отложено расстояние, по вертикальной оси – интенсивность света в относительных единицах. Интервалы между метками соответствуют расстояниям в 0,05 мм. Область в центре экранирована оптическим волокном с оболочкой, внутренний диаметр которого составляет 1 мм. Поэтому на расстояниях от центра, меньших 0,5 мм, отсчеты близки к нулю. Видно, что интенсивность света в этом случае после достижения максимума экспоненциально уменьшается с расстоянием в соответствии с законом Ламберта-Бэра (см. формулу 19.3).

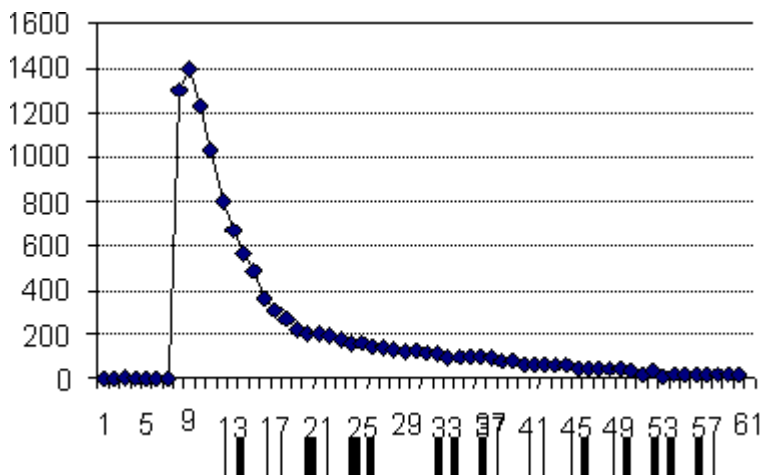


Рис. 19.5. Зависимость интенсивности обратно рассеянного зеленого света от расстояния до точки облучения

В каждой точке выхода из тела интенсивность обратно рассеянного света распределена по направлениям выхода. Каждое направление можно задать двумя углами: углом θ между направлением выхода и нормалью к поверхности кожи и азимутальным углом φ , который отсчитывается от луча, проведенного от точки входа светового зонда к точке выхода света.

Распределение интенсивности по углам θ зависит от расстояния до точки входа светового зонда. Характер распределений в плоскости, проведенной через перпендикуляр к поверхности кожи и радиус-вектор точки выхода, показан на рис. 19.6. Положительные углы отсчитываются от нормали в сторону радиус-вектора, проведенного в точку выхода от точки входа светового зонда.

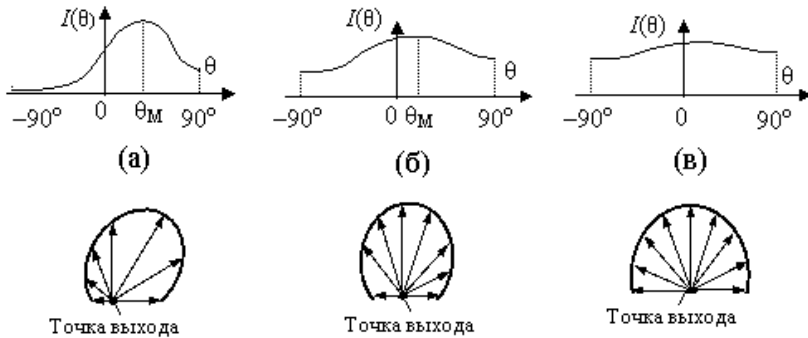


Рис. 19.6. Распределение обратно рассеянного света по углам θ : (а) недалеко от точки входа светового зонда; (б) на средних расстояниях; (в) на значительных расстояниях. Сверху – графики зависимости $I(\theta)$, снизу – индикатриссы рассеяния

Рис. 19.6, а дает картину распределения по углам θ вблизи от точки входа светового зонда, рис. 19.6, б – на средних расстояниях, а рис. 19.6, в – далеко от точки входа. Во всех случаях (а, б, в) сверху приведен график зависимости интенсивности обратно рассеянного света $I(\theta)$, а внизу – диаграмма (индикатрисса) рассеяния. Вблизи от точки входа света в тело картина распределения по углам θ обычно асимметрична: интенсивность света, выходящего под положительными углами θ (т.е. от точки входа), значительно больше интенсивности света, выходящего под отрицательными углами. Максимум углового распределения интенсивности смещен в сторону положительных углов θ . Далеко от точки входа распределение обратно рассеянного света по углам θ приближается к равномерному, а максимум находится вблизи нормали к поверхности. На средних расстояниях имеет место промежуточная асимметрия.

Характер распределения интенсивности обратно рассеянного телом света по азимуту показан на рис. 19.7. На рис. 19.7, а показана проекция направления обратно рассеянного света на плоскость поверхности тела. Проекция обозначена буквой R. Там же показано, как отсчитывается азимут φ . Типичный вид распределения по азимуту на небольших расстояниях от точки входа света показан на рис. 19.7, б. Распределение является неравномерным. Интенсивность света, выходящего из тела в направлении от точки входа света, – наибольшая, а выходящего в обратном направлении, – наименьшая. Типичное

распределение интенсивности обратно рассеянного света по азимуту на больших расстояниях от точки входа показано на рис. 19.7, в. Оно приближается к равномерному. На рис. 19.7, б и в сверху приведены графики зависимости $I(\varphi)$, а внизу – диаграммы (индикатриссы) рассеяния.

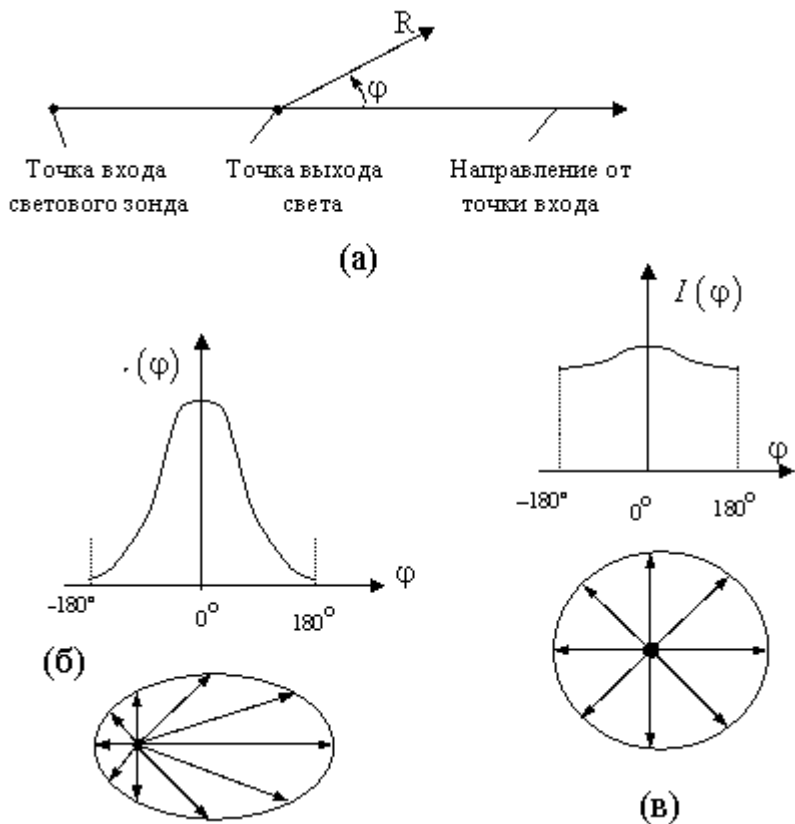


Рис. 19.7. Характер распределения интенсивности обратно рассеянного телом света по азимутальным углам: (а) схема отсчета азимута; (б) распределение вблизи от точки входа; (в) распределение далеко от точки входа

На небольших и средних расстояниях от точки входа светового зонда в принципе для каждой точки поверхности тела и каждого направления

выхода света из тела можно указать пучок наиболее вероятных траекторий прохождения света внутри тела и определить среднестатистическую длину траектории. На больших расстояниях от точки входа зонда пучок наиболее вероятных траекторий уже трудно выделить, а дисперсия их длины уже приближается к самой длине. Поэтому на больших расстояниях от точки зондирования тела путь, пройденный в теле обратно рассеянным светом, становится неопределенным. Такие расстояния непригодны для спектрофотометрии в обратно рассеянном свете.

19.2.4. Технология измерений в обратно рассеянном свете

Из описанной модели обратного рассеяния света человеческим телом, вытекающей из теоретических и экспериментальных исследований, стало ясным, что спектрофотометрические исследования и измерения при работе "на отражение" возможны при выполнении четырёх важных условий:

1. Зондирующий световой пучок должен входить в исследуемый участок тела в виде остро направленного светового "зонда".
2. Направление светового зонда должно быть фиксировано конструкцией сенсора. (Обычно пучок света перпендикулярен к поверхности тела).
3. Для измерения спектральных интенсивностей следует выделять пучок обратно рассеянного света, выходящий на определенном расстоянии от точки входа светового зонда и в строго определенном направлении.
4. Точка отбора измеряемого пучка обратно рассеянного света должна находиться на средних расстояниях от точки зондирования (1-5 мм), когда обратно рассеянный свет не стал еще "диффузным" (равномерно распределенным по всем направлениям).

Только при этих условиях можно говорить о пучке наиболее вероятных траекторий прохождения света и о среднестатистическом пути, пройденном обратно рассеянным светом в исследуемом участке тела.

В конструкции сенсора эти условия проще всего реализовать, используя оптические волокна с небольшой угловой апертурой. По одним из них, входящим в оптический контакт с телом, в исследуемый участок тела вводится световой зонд. А с помощью других,

расположенных на заданном расстоянии от точки входа светового зонда и тоже имеющих оптический контакт с телом, отбираются для измерений только те обратно рассеянные световые лучи, которые выходят из тела в заданном направлении.

Надежный оптический контакт между телом и оптическими волокнами, из которых вводится световой зонд и отбирается для анализа нужная часть обратно рассеянного света, можно обеспечить, размещая между оптической головкой и телом тонкий слой иммерсионной жидкости с показателем преломления, близким к эффективному показателю преломления кожи. Если эта жидкость еще и поверхностно активна, то она заполняет все поры, которые всегда имеются в коже, и тем самым заметно уменьшает чисто поверхностное рассеяние света, увеличивая глубину его проникновения в тело. Такой иммерсионной жидкостью в простейшем случае могут быть обычная вода, физиологический раствор, глицерин..

19.3. Неинвазивные гемоглобиномеры

19.3.1. Первый сенсор гемоглобина, работавший "на отражение"

Принцип действия и конструкция первого интеллектуального неинвазивного гемоглобиномера – сенсора, предназначенного для измерения концентрации гемоглобина, были запатентованы в 1994 г.. Структура его оптоэлектронной части показана на рис. 19.8.

В середине 90-х годов еще не было достаточно узкополосных синезеленых светодиодов, излучающих свет в нужных для гемоглобиномера спектральных интервалах. Поэтому в качестве источника света использовалась миниатюрная импульсная лампа-вспышка (1) высокого давления для фотоаппаратов, располагавшаяся из соображений электробезопасности внутри корпуса прибора. (Для работы лампы требовалось напряжение до 300 В, а сила разрядного тока в коротком миллисекундном импульсе достигала 50 А).

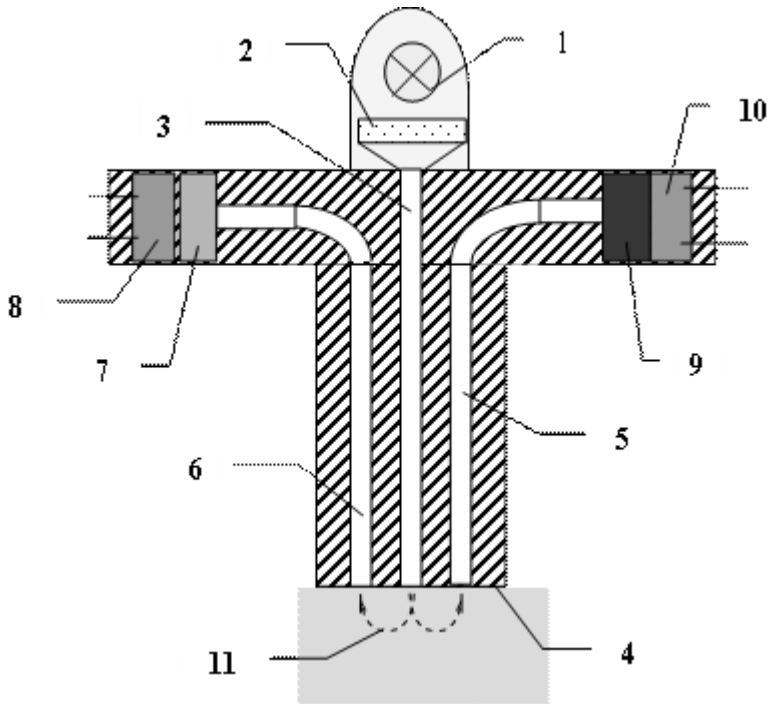


Рис. 19.8. Оптоэлектронная часть неинвазивного гемоглобинометра "ИГН-300": 1 - миниатюрная лампа-вспышка; 2 - вспомогательный светофильтр; 3 - световод зондирующего пучка; 4 - плоскость выхода световодов; 5 - световод опорного пучка; 6 - световод измерительного пучка; 7 - сине-зеленый светофильтр; 8 - фотоприемник измерительного канала; 9 - БИК светофильтр; 10 - фотоприемник опорного канала; 11 - условно показан путь света сквозь исследуемый участок тела

Лампа-вспышка излучает свет непрерывного спектра в диапазоне длин волны приблизительно от 300 до 1300 нм. Коротковолновая часть спектра (до 450 нм) сразу отсекалась вспомогательным светофильтром (2). Остальной свет с помощью пучка оптических волокон (3) направлялся к исследуемому участку тела человека. Из обратно рассеянного телом света с помощью волоконно-оптических световодов (5) и (6) отбирались симметрично расположенные пучки, выходящие из тела на расстоянии 1,5 мм от места входа зондирующего светового пучка перпендикулярно поверхности тела. Для этого волоконно-

оптические световоды 3, 5 и 6 были выведены торцами в общую плоскость (4). Расстояние между ними было конструктивно фиксировано, плоскость 4 сошлифована и оптически отполирована. Отобранные для измерений пучки обратно рассеянного телом света через волоконно-оптические световоды 5 и 6 направлялись к опорному и измерительному каналам. В измерительном канале перед фотоприемником (8) был установлен узкополосный интерференционный светофильтр (7), который пропускал на фотоприемник только излучение узкого спектрального интервала из сине-зелёной области спектра. В опорном канале перед фотоприемником (10) был установлен узкополосный интерференционный светофильтр (9), который пропускал на фотоприемник только излучение узкого спектрального интервала из ближней инфракрасной области спектра.

При измерениях т.н. "общего (*total*) гемоглобина крови" результат измерения не должен зависеть от насыщенности крови кислородом. Поэтому длина волны света $\lambda_{и}$, пропускаемого светофильтром 7 в измерительном канале была выбрана так, чтобы коэффициенты поглощения двух главных форм гемоглобина совпадали. Изучение показало, что для этого пригодны такие спектральные интервалы: (506,5 7) нм, (523 \pm 7) нм, (549 \pm 7) нм, (569 \pm 7) нм, (586 \pm 7) нм. Опорная длина волны $\lambda_{о}$ была выбрана между 830 и 960 нм, где все формы гемоглобина, как и другие компоненты крови и живой ткани, поглощают свет относительно слабо. Рассеяние и фоновое поглощение света на обеих указанных длинах волны приблизительно одинаковы.

Для фильтрации полезных сигналов от помех, кроме оптических интерференционных светофильтров, использован тот факт, что излучение света лампой-вспышкой длится лишь несколько миллисекунд. Усиленные сигналы от фотоприемников с помощью операционных усилителей интегрировались на конденсаторах. Интегрирование в обоих каналах прекращалось, когда напряжение на конденсаторе в опорном канале достигало заданного порога. Поэтому светосумма, набранная в опорном канале, всегда была одинакова. Если пропускание кожи было меньше обычного, например, из-за пигментации или загара, то интегрирование продолжалось дольше, а в случае более прозрачной кожи время интегрирования автоматически сокращалось. Тем самым компенсировалось и влияние флуктуаций интенсивности излучения лампы-вспышки. Благодаря интегрированию в течение порядка 1 мс, автоматически отфильтровывались шумы и помехи с частотами выше 3 кГц.

Воспроизводимость результатов измерений на одном и том же участке тела одного и того же человека иллюстрирует рис. 19.9, где показаны результаты 60 проведенных подряд измерений. По горизонтали отложены измеренные значения, по вертикали – количество полученных результатов из выделенного диапазона значений (от 130 до 132, от 132 до 134 и т.д.). Приблизительно гауссовское распределение свидетельствует о случайном характере разброса результатов.

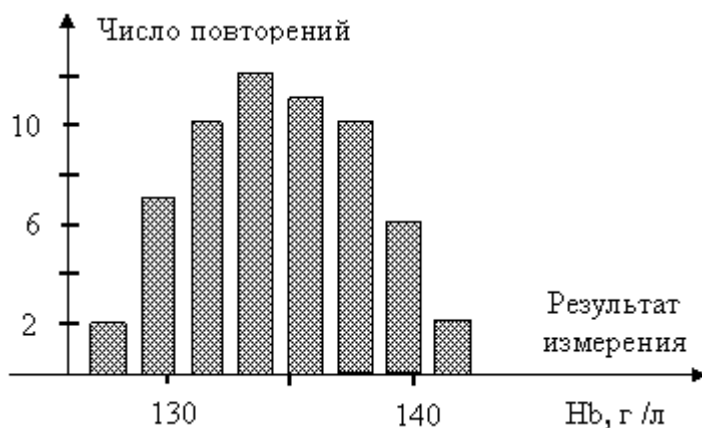


Рис. 19.9. Гистограмма результатов неинвазивных измерений концентрации гемоглобина сенсором ИГН-300 на руке человека

Дисперсия отклонений не превышала 5-7 % от среднего значения. Сенсор хорошо отслеживал изменения концентрации гемоглобина в ткани, вызванные различными факторами: приливами и оттоками крови, повышением (понижением) артериального давления, уменьшением (повышением) концентрации гемоглобина в крови, вызванным, например, кровотечением или внутривенным вливанием крови, и т.д.

19.3.2. Принцип измерения концентрации гемоглобина

Спектральные интенсивности света, отбираемого оптическими волокнами для измерений на выходе из тела, описываются уравнениями:

$$I_O = T_O I_{O,0} \exp[-(K_{P,O} + K_{\Phi,O} + k_{Hb,O} c_{Hb}) d] \quad (19.5)$$

$$I_I = T_I I_{I,0} \exp[-(K_{P,I} + K_{\Phi,I} + k_{Hb,I} c_{Hb}) d] \quad (19.6)$$

где индексы " O " и " I " указывают на опорную и измерительную длину волны λ_O и λ_I соответственно;

$I_{O,0}, I_{I,0}$ – спектральные интенсивности света на входе в тело;

T_O и T_I – безразмерные коэффициенты, учитывающие пропускание света кожей, эффективность отбора и передачи оптических сигналов к фотоприемнику, пропускание светофильтров и спектральную чувствительность фотоприемников в опорном и измерительном каналах;

$K_{P,O}$ и $K_{P,I}$ – коэффициенты рассеяния света тканью на исследуемом участке тела, задаются в мм^{-1} ;

$K_{\Phi,O}$ и $K_{\Phi,I}$ – коэффициенты фонового поглощения света, т.е. всеми другими компонентами ткани, кроме гемоглобина, также в мм^{-1} ;

$k_{Hb,O}$ и $k_{Hb,I}$ – молярные коэффициенты поглощения света гемоглобином (Hb), задаются л/(моль*мм);

c_{Hb} – молярная концентрация гемоглобина, моль/л;

d – средняя длина пути, который проходит в ткани свет, выделяемый и принимаемый оптическими волокнами (мм).

Если выражение (19.5) поделить на выражение (19.6) и учесть то, что при длинах волны λ_O и λ_I рассеяние и фоновое поглощение света практически одинаковы, а молярные коэффициенты поглощения гемоглобином отличаются сильно, то получим:

$$I_O / I_I = (T_O I_{O,0}) / (T_I I_{I,0}) \exp[k_{Hb,I} - k_{Hb,O} c_{Hb} d] \quad (19.7)$$

Это выражение можно рассматривать как уравнение для нахождения концентрации гемоглобина c_{Hb} . Решив его, находим

$$c_{Hb} = [\ln(I_O/I_H) - \ln(T_O I_{O,0}) + \ln(T_H I_{H,0})] / [(k_{Hb,H} - k_{Hb,O}) d] \quad (19.8)$$

Величины T_O , T_H , $I_{O,0}$, $I_{H,0}$ и d – это константы прибора и определяются его конструкцией, а величины $k_{Hb,O}$ и $k_{Hb,H}$ – оптические константы гемоглобина. Поэтому выражение для вычисления концентрации гемоглобина можно представить в виде

$$c_{Hb} = a \ln(I_O/I_H) - b \quad (19.9)$$

где a и b – константы, которые можно определить при калибровке прибора.

19.3.3. Современный вариант сенсора гемоглобина

Когда на рынке появились лазерные светодиоды, излучающие свет нужных длин волн, оказалось возможным существенно упростить конструкцию и улучшить технические характеристики сенсора гемоглобина. Новая принципиальная оптическая схема показана на рис. 19.10.

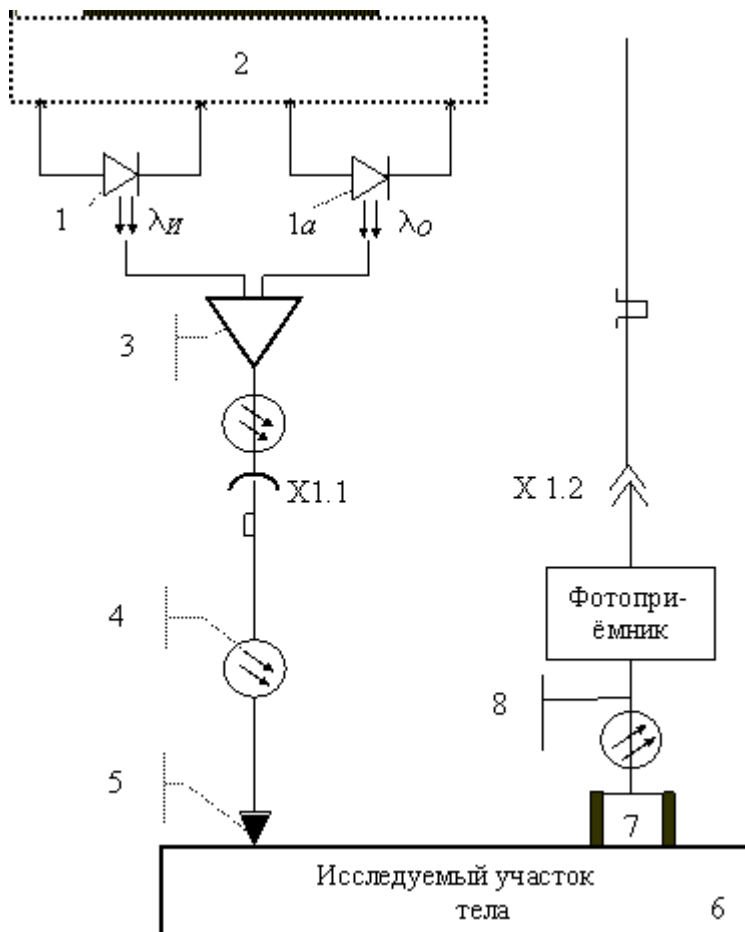


Рис. 19.10. Принципиальная оптическая схема сенсора гемоглобина

Здесь используются лазерные диоды 1 и 1а, один из которых излучает свет с требуемой длиной волны $\lambda_{И}$, а второй – свет с длиной волны $\lambda_{О}$. Электронная схема управления излучением лазерных диодов 2 включает их поочередно. С помощью оптического концентратора и смесителя 3 свет от обоих лазерных диодов направляется через оптический соединитель X1.1 в гибкий волоконно-оптический кабель 4. Этот кабель электрически и оптически соединяет основной корпус прибора с легкой выносной оптоэлектронной головкой. Внутри этой головки свет по оптическому волокну подается к центру 5 выхода

головки, который приводится в оптический контакт с исследуемым участком тела 6. Из волокна острогофокусированный пучок света ("световой зонд") входит сквозь кожу в живую ткань. Часть прошедшего сквозь ткань и обратно рассеянного света выходит наружу. Оптический узел 7 выделяет из этого света нужную составляющую. По оптическому волокну 8 выделенная составляющая направляется на фотоприемник. В те интервалы времени, когда излучает лазерный диод 1, фотоприемник формирует электрический сигнал, пропорциональный спектральной интенсивности I_{λ} , а когда излучает лазерный диод 1а, то формируется сигнал, пропорциональный спектральной интенсивности I_{λ_0} .

При применении лазерных диодов удается ввести в оптическое волокно почти весь излучаемый ими световой поток, при использовании обычных светодиодов – до 30% светового потока. Ранее же, при использовании миниатюрной лампы-вспышки, удавалось ввести лишь 5-10% излучаемого светового потока. Это существенно улучшило использование оптических сигналов и позволило существенно сэкономить энергию питающих аккумуляторных батарей.

Конструкция выносной оптоэлектронной головки показана на рис. 19.11.

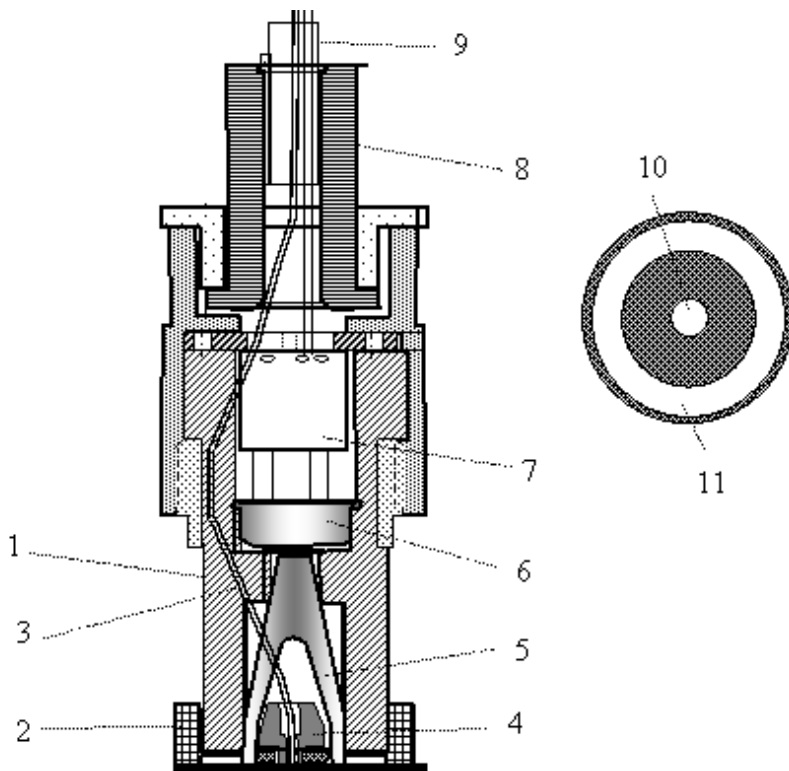


Рис. 19.11. Конструкция выносной оптоэлектронной головки сенсора гемоглобина: 1 – корпус головки; 2 – насадка-диафрагма; 3 – оптическое волокно; 4 – фиксатор облучателя; 5 – конусообразный оптический фокон; 6 – фотоприемник; 7 – предварительный усилитель фототока; 8 – фиксатор соединительного кабеля; 9 – кабель

Головка приводится в оптический контакт с исследуемым участком тела со стороны насадки 2, которая одновременно является и диафрагмой для ограничения не используемой частью обратно рассеянного телом света. Конусообразный оптический фокон 5 является внутри полым, имеет форму воронки. Внутри его полости расположен фиксатор облучателя 4, позволяющий точно центрировать выход оптического волокна. Оптическое волокно 3 входит в эту полость сквозь небольшое отверстие в стенке фокона. Собираемый фоконем 5 обратно рассеянный свет поступает на фотоприемник 6. Получаемый электрический сигнал, пропорциональный интенсивности

собранного света, усиливается в миниатюрном предварительном усилителе сигналов 7, тоже размещенном внутри головки.

Фиксатор 8 механически крепит соединительный кабель и препятствует проникновению внутрь головки постороннего света. Геометрия торца насадки-дифракмы 2, которая приводится в оптический контакт с телом, показана на рис. 19.11 справа. Прозрачный круг 10 в центре – это торец входного оптического волокна 3, имеющий диаметр 1 мм. Через него зондирующий пучок света вводится в ткань. Прозрачное кольцо 11, концентрическое с кругом 10, – это торец конусообразного оптического фокона, через который отбирается для измерения только та часть обратно рассеянного телом света, которая выходит на заданном расстоянии от точки входа светового зонда. Условия внутреннего отражения в фоконе таковы, что к фотоприемнику 6 доходят только составляющие обратно рассеянного света, выходящие перпендикулярно к поверхности тела $\pm 10\text{-}20\text{ deg}$.

Таким образом, конструкция выносной оптоэлектронной головки обеспечивает выполнение всех сформулированных в п. 19.2.4 требований технологии измерений в обратно рассеянном свете. Применение описанного фокона, размещение в головке также фотоприемника и предварительного усилителя фототока на порядок повысило эффективность использования светового сигнала. По соединительному кабелю передается теперь значительно усиленный электрический сигнал с низким выходным омическим сопротивлением, что резко уменьшает влияние шумов. Благодаря узкополосности излучения лазерных диодов стали не нужны сложные и дорогие интерференционные светофильтры. Используется только один фотоприемник и тракт усиления. Для питания источников света не требуется высокое напряжение, что повышает электробезопасность прибора.

Общий вид современного варианта сенсора гемоглобина показан на рис. 19.12.

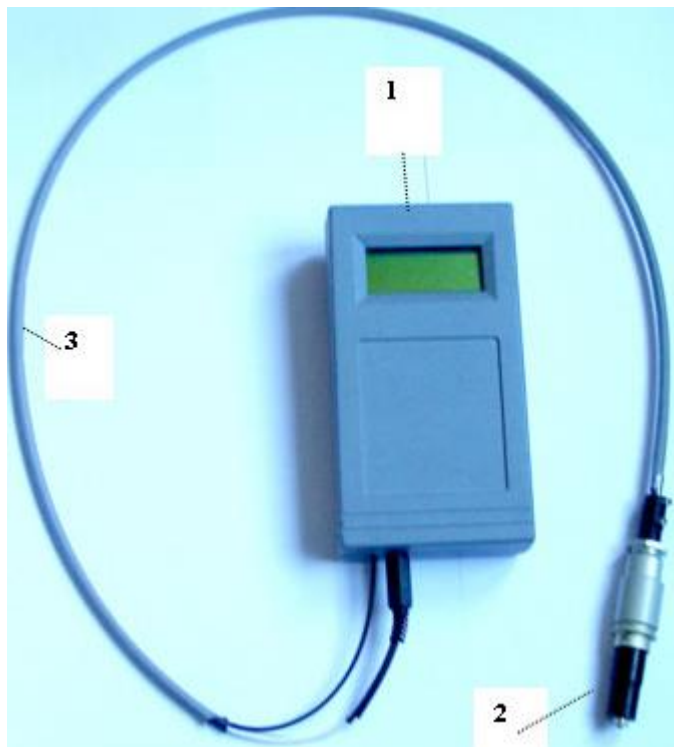


Рис. 19.12. Общий вид портативного сенсора гемоглобина: 1 – корпус сенсора; 2 – выносная оптоэлектронная головка; 3 – соединительный кабель

Размеры основного блока сенсора – 145x52x40 мм, масса – 0,3 кг. Масса выносной оптоэлектронной головки – до 40 г. Длина соединительного кабеля 0,5 м или 1 м. При измерениях торец головки приводится в оптический контакт с исследуемым участком тела. Головка не должна оказывать никакого существенного давления на тело, чтобы не менять его кровенаполнение. После нажатия кнопки "Пуск" встроенный микроконтроллер организует весь процесс измерения: включение источников света, модуляцию их светового потока, прием и усиление сигналов, поступающих от головки, их демодуляцию, разделение, измерение спектральных интенсивностей, расчет концентрации гемоглобина. Имеется функция автоматического регулирования интенсивности зондирующего пучка света (порядка 0,1 мВт) в зависимости от оптических свойств кожи. Результаты

измерения выводятся на жидкокристаллический дисплей, запоминаются в долговременной памяти, откуда могут быть переданы во внешний компьютер. Энергоёмкости встроенного аккумулятора хватает на проведение до 20 тыс. измерений.

19.4. Неинвазивный сенсор кровенаполнения

Технология неинвазивного спектрофотометрического измерения концентрации гемоглобина в тканях человека создала и возможность неинвазивного измерения кровенаполнения живых тканей. До этого медицина такой возможности не имела. Фотоплетизмография ведь позволяет отслеживать только небольшие пульсовые изменения кровенаполнения, но не абсолютный его уровень, например, в объёмных %. А без такой возможности оказываются нежизнеспособными почти все неинвазивные технологии измерения абсолютных концентраций биологически важных веществ в крови человека (например, билирубина, глюкозы, карбоксигемоглобина и т.д.), поскольку результаты измерения концентрации этих веществ в ткани не удается корректно пересчитать именно на кровь.

Известно, что гемоглобин присутствует только в крови человека и нигде в организме не выходит из кровеносного русла наружу. Концентрация общего гемоглобина одинакова во всех звеньях системы кровообращения человека. Изменяется лишь степень его насыщения кислородом. Поэтому именно общий гемоглобин является наилучшим индикатором присутствия крови в ткани. Концентрация общего гемоглобина в ткани $c_{Hb,T}$, которую измеряет гемоглобиномер, – это число молекул гемоглобина, приходящихся в среднем на единицу объема ткани. Они находятся в заполняющей эту ткань крови, объём которой

$$V_K = \varphi V_T, \quad \text{где } \varphi = V_K / V_T \quad (19.10)$$

и есть относительное кровенаполнение ткани или, другими словами, – объёмная доля крови в ткани. Поэтому средняя концентрация общего гемоглобина в ткани $c_{Hb,T}$ напрямую зависит от кровенаполнения этой ткани и пропорциональна концентрации гемоглобина в крови $c_{Hb,K}$:

$$c_{Hb,T} = \varphi c_{Hb,K} \quad (19.11)$$

Значит, измерив с помощью гемоглобиномера концентрацию общего гемоглобина в ткани $c_{Hb,T}$ и зная концентрацию $c_{Hb,K}$ его в крови, можно вычислить кровенаполнение ткани по формуле

$$\Phi = c_{Hb,T} / \varphi c_{Hb,K} \quad (19.12)$$

Концентрация общего гемоглобина в крови $c_{Hb,K}$ – достаточно стабильный во времени показатель. Обычно она может заметно измениться лишь за несколько недель или даже месяцев, тогда как кровенаполнение конкретного участка тела и соответственно концентрация гемоглобина в нем могут меняться довольно быстро и существенно. Поэтому в большинстве случаев концентрацию гемоглобина в крови достаточно контролировать периодически, раз в несколько месяцев, и хранить в медицинской карточке пациента. Интеллектуальный сенсор гемоглобина легко превращается также и в сенсор кровенаполнения. Для этого в его внутреннее программное обеспечение вводят микропрограмму вычислений относительного кровенаполнения по формуле (19.12).

Неинвазивные измерения кровенаполнения полезны во многих случаях диагностики и лечения травм, ожогов, опухолей, рожистых и других заболеваний кожи. Они могут также значительно ускорить разработку приборов для неинвазивного измерения концентрации в крови человека других биологически важных веществ, например, сахара.

19.5. Интеллектуальный сенсор для неинвазивного исследования микроциркуляторного русла системы кровообращения

С применением сенсора кровенаполнения оказалось возможным неинвазивно оценивать состояние мельчайших кровеносных сосудов микроциркуляторного звена системы кровообращения человека, измерять количественные характеристики этих сосудов и даже небольшие их изменения. Микроциркуляторное русло – это самая разветвленная часть системы кровообращения человека, состоящая из сети капилляров диаметром 5-10 мкм, из мельчайших подводящих к ним кровь артериол и отводящих кровь венул. Сосудики эти даже не видны невооруженным глазом. Но именно здесь происходят процессы обмена веществ между кровью и всеми клетками тела. Клетки берут здесь из крови кислород, все другие питательные вещества, витамины, гормоны, лекарства и отдают в кровь продукты своей

жизнедеятельности. Именно в микроциркуляторном русле постоянно находится свыше 80% всего объема крови. И для здоровья организма очень важна проходимость этого русла для крови, эластичность его сосудов, их способность открываться и закрываться, сокращаться и расширяться. Многие серьезные болезни начинаются с невидимых нарушений именно в микроциркуляторном русле крови.

Возможность исследовать и оценивать его состояние даёт наблюдение динамики изменений кровенаполнения участка тела при изменении внешних условий. Теоретическая модель изменений кровенаполнения показала, что эта динамика непосредственно связана с такими характеристиками сосудов микроциркуляторного русла, как их текущее гидравлическое сопротивление протеканию крови и комплианс. Комплианс (от англ. compliance – податливость, уступчивость) кровеносных сосудов исследуемого участка тела – это мера эластичности этих сосудов, определяемая увеличением их объёма, приходящимся на единичное приращение трансмурального давления в сосудах.

Структурная схема интеллектуального сенсора для неинвазивного исследования микроциркуляторного русла системы кровообращения человека приведена на рис. 19.3.

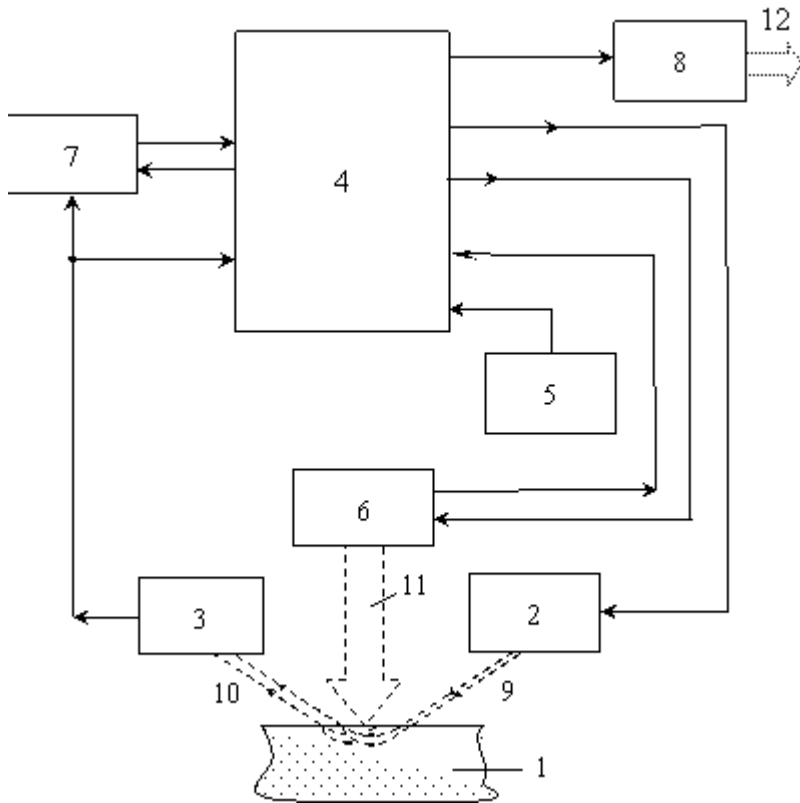


Рис. 19.13. Структурная схема интеллектуального сенсора для неинвазивного исследования микроциркуляторного русла системы кровообращения человека

Тут схематически показан исследуемый участок тела 1, узел облучения 2, измеритель спектральных интенсивностей 3, микрокомпьютер 4, клавиатура управления 5, блок 6 изменения внешних условий, от которых зависит кровенаполнение, узел памяти 7 и узел выдачи результатов 8. Пунктирными стрелками 9 и 10 условно показаны оптические связи с исследуемым участком тела 1 (это могут быть, например, волоконно-оптические световоды), а также прохождение и обратное рассеяние зондирующего пучка света в живой ткани. Широкая пунктирная стрелка 11 условно показывает воздействие блока 6 на исследуемый участок тела, а широкая пунктирная стрелка

12 – выдачу результатов исследования пользователю (врачу-специалисту) или во внешний компьютер.

Почти всей работой сенсора автоматически управляет микрокомпьютер 4 в соответствии с заложенными в его память микропрограммами и данными. Он организует через узел 2 облучение исследуемого участка тела, получает от узла 3 и обрабатывает значения измеряемых спектральных интенсивностей, управляет работой блока 6 и памятью 7, поддерживая с ними обратную связь. Он же формирует и передает всю необходимую пользователю информацию на дисплей 8 или в канал связи с внешним компьютером. Через клавиатуру 5 пользователь может отдавать микрокомпьютеру свои команды и вводить дополнительную информацию, изменяющую, например, режимы работы, критерии или уставки.

Опишем один из возможных вариантов работы сенсора для конкретного случая, когда исследуемый участок тела находится на руке, а её кровенаполнение, как и при окклюзионной фотоплетизмографии, изменяется путем изменения давления в манжете, надетой на предплечье этой руки. Блок 6 состоит в этом случае из манжеты, баллона, в котором поддерживается заданное давление, и двух управляемых от микропроцессора клапанов, первый из которых соединяет манжету с баллоном, а второй – с атмосферой. В начале работы оптоэлектронную головку приводят в оптический контакт с исследуемым участком руки и выдерживают пару минут для адаптации и успокоения организма пациента. Когда дают старт, микрокомпьютер соединяет манжету с атмосферой и активизирует узел облучения. Свет зондирует исследуемый участок тела и после прохождения сквозь него попадает в измеритель спектральных интенсивностей. Измеренные значения передаются в микрокомпьютер, который вычисляет кровенаполнение исследуемого участка руки и запоминает его в качестве исходного значения. Затем микрокомпьютер соединяет манжету с баллоном, в результате чего в ней устанавливается заданное давление P_m , кровенаполнение исследуемого участка тела начинает нарастать. Через заданные интервалы времени микрокомпьютер организует очередные измерения кровенаполнения и накапливает результаты в памяти. Когда три-четыре измерения подряд дадут один и тот же результат, полученное значение фиксируется в памяти как конечное. Затем микрокомпьютер снова соединяет манжету с атмосферой, и давление в ней падает до нуля. Вены открываются, и кровенаполнение начинает уменьшаться, пока не достигнет исходного

значения. Сенсор производит измерения кровенаполнения и фиксирует в своей памяти динамику обратных изменений.

Типичная зависимость кровенаполнения от времени при таких измерениях показана на рис. 19.14. На участке 1 измеряется исходное значение кровенаполнения. Участок 2 отражает динамику увеличения кровенаполнения исследуемого участка тела после создания повышенного давления в манжете, а участок 3 – динамику уменьшения кровенаполнения после снятия внешнего давления на сосуды. Прирост кровенаполнения позволяет количественно оценить комплианс сосудов микроциркуляторного русла в исследуемом участке тела

$$C = (\varphi_n - \varphi_0) / P_M \quad (19.13)$$

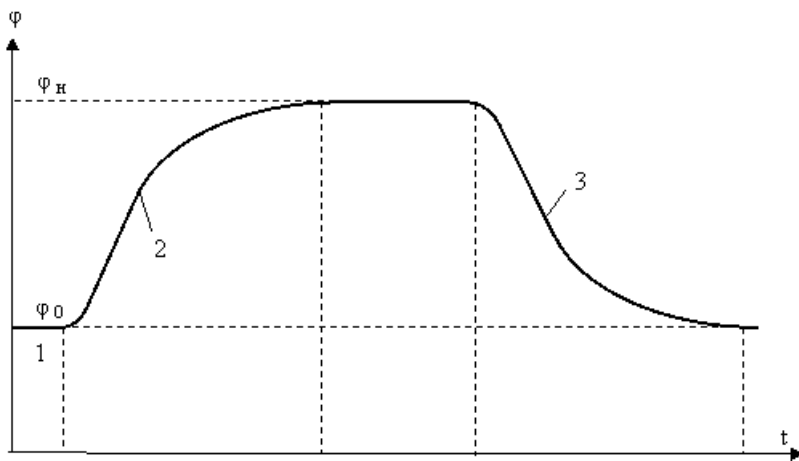


Рис. 19.14. Типичная зависимость кровенаполнения от времени при функциональном тестировании

На участках 2 и 3 микрокомпьютер находит места наибольшей крутизны – те, на которых кровенаполнение быстрее всего меняется со временем, и вычисляет на соответствующих интервалах производную $\varphi' = \Delta\varphi / \Delta t$. Значение этой производной на участке 2 позволяет количественно определить гидравлическое сопротивление микроциркуляторного русла притоку крови

$$R_{\Pi} = P_M / \varphi'_2 \quad (19.14)$$

А наибольшее значение производной на участке 3 позволяет количественно определить сопротивление микроциркуляторного русла оттоку крови

$$R_0 = P_M / \varphi'_3 \quad (19.15)$$

В конце измерений и вычислений, занимающих несколько минут, интеллектуальный сенсор выдает на дисплей всю полученную информацию: комплианс C , гидравлические сопротивления притоку и оттоку крови R_{Π} и R_0 , значения $\Delta\varphi = \varphi_{\Pi} - \varphi_0$, φ'_2 , φ'_3 и динамическую кривую нарастания и спада кровенаполнения. Выходные данные могут быть переданы также в медицинский компьютер.

После исследования состояния микроциркуляторного русла пациента в спокойном физиологическом состоянии можно количественно определить изменения в нём после воздействия разных факторов. Например, после приёма сосудорасширяющих или сосудосуживающих препаратов, под действием повышенной или пониженной температуры окружающей среды, после сауны, спортивной тренировки, массажа, электростимуляции и т.п. Это позволяет врачу получить максимально полное представление о состоянии микроциркуляторного русла пациента, точнее диагностировать его, количественно зафиксировать полученные данные, чтобы с ними можно было сравнивать результаты исследований через некоторое, в том числе и достаточно продолжительное время. Повторные исследования позволяют контролировать и корректировать ход лечения и возрастные изменения в этом важнейшем звене системы кровообращения.

Краткие итоги

В 90-х г.г. XX века проведены углубленные исследования взаимодействия света с человеческим телом, имеющим сложную микроструктуру и сильно рассеивающим свет. Уточненная модель взаимодействия показала, что при определенных условиях возможны неинвазивные спектрофотометрические измерения в обратно отраженном свете. Условия эти таковы: зондирующий световой пучок должен входить в исследуемый участок тела в виде остро направленного светового "зонда"; направление светового зонда должно быть фиксировано конструкцией сенсора; для измерения спектральных интенсивностей следует выделять пучок обратно рассеянного света, выходящий на определенном расстоянии от точки входа светового

зонда и в строго определенном направлении; точка отбора измеряемого пучка обратно рассеянного света должна находиться на средних расстояниях от точки зондирования, когда обратно рассеянный свет не стал еще "диффузным". Эти условия проще всего реализовать, используя оптические волокна с небольшой угловой апертурой.

Указанные принципы успешно реализованы, например, при создании сенсоров, неинвазивно измеряющих концентрацию гемоглобина в исследуемом участке тела. В измерительном канале используется свет с длиной волны, при которой оксигемоглобин и восстановленный гемоглобин поглощают одинаково и сильно, а в опорном канале – свет с длиной волны, при которой все компоненты ткани поглощают свет слабо, а рассеяние света и фоновое поглощение остаются примерно такими же, как в измерительном канале.

Функции интеллектуального сенсора гемоглобина оказалось возможным расширить за счет дополнительного программного обеспечения и использовать его также для неинвазивного измерения кровенаполнения биоткани. А с применением сенсора кровенаполнения оказалось возможным неинвазивно оценивать состояние мельчайших кровеносных сосудов микроциркуляторного русла системы кровообращения человека, измерять количественные характеристики этих сосудов и даже небольшие их изменения.

Интеллектуальный сенсор для неинвазивного исследования микроциркуляторного русла системы кровообращения человека, кроме узлов для измерения кровенаполнения исследуемого участка тела, включает в себя также блок изменения внешних условий, от которых зависит это кровенаполнение. Как и в случае окклюзионной фотоплетизмографии, это может быть, например, одетая на предплечье исследуемой руки резиновая манжета, давление внутри которой автоматически изменяется под управлением микрокомпьютера. Отслеживая динамику изменений кровенаполнения при изменениях давления в манжете, сенсор вычисляет такие количественные характеристики, как гидравлические сопротивления сосудов микроциркуляторного русла притоку и оттоку крови и их комплианс (эластичность). Эти характеристики и динамика изменений позволяют врачу точнее диагностировать состояние микроциркуляторного русла пациента, контролировать и корректировать ход лечения и возрастные изменения в этом важнейшем звене системы кровообращения.

20. Неинвазивные глюкометры. Спектрофотометрический сенсор хлорофилла

20.1. Неинвазивные глюкометры

Глюкометрами сокращенно называют интеллектуальные сенсоры для измерения содержания глюкозы в крови человека. Иногда их называют также "приборами для измерения сахара крови". Остановимся вкратце на важности создания таких сенсоров.

Известно, что регулирование концентрации глюкозы в крови (КГК) является одним из жизненно важных процессов саморегулирования человеческого организма. В норме КГК поддерживается в пределах от 60 до 100 мг% (от 3,3 до 5,5 ммоль/л). В этих пределах обеспечивается оптимальная жизнедеятельность клеток и органов, особенно нервных клеток и мозга человека. Глюкоза является для клеток источником жизненной энергии и исходным материалом для многих биохимических синтезов. Как уже отмечалось в лекции 17, сейчас в мире до 200 млн. людей больны диабетом. Эта болезнь на сегодня, к сожалению, считается неизлечимой и сопровождает человека всю жизнь. Во избежание тяжелых осложнений заболевшие диабетом люди вынуждены придерживаться специального режима жизни и питания и периодически брать пробы своей крови "на сахар". Поэтому еще в 70-х гг. XX в., когда стало ясно, что диабет является массовым заболеванием, начались интенсивные разработки неинвазивных методов измерения КГК для того, чтобы избавить людей от необходимости частого травмирования тела. Конгресс США, а за ним правительства и некоторых других стран выделили на эти разработки значительные средства. Тем не менее, задача оказалась трудноразрешимой.

В 80-90 годы XX в. наибольшие надежды возлагались именно на спектрофотометрические методы. С самого начала было ясно, что видимая область спектра не подходит для этих измерений, поскольку глюкоза здесь прозрачна, т.е. практически не поглощает свет. Поэтому усилия были направлены на создание неинвазивного спектрофотометрического глюкометра в инфракрасной (ИК) области спектра. Главным препятствием в этой области оказалась всегда присутствующая в биологической ткани в большом количестве вода,

которая сильно поглощает инфракрасный свет. Тем не менее, она имеет здесь (см. рис. 20.1) несколько спектральных "окон прозрачности" в диапазонах длин волны до 1,35 мкм, от 1,55 до 1,85 мкм и от 2,1 до 2,3 мкм.

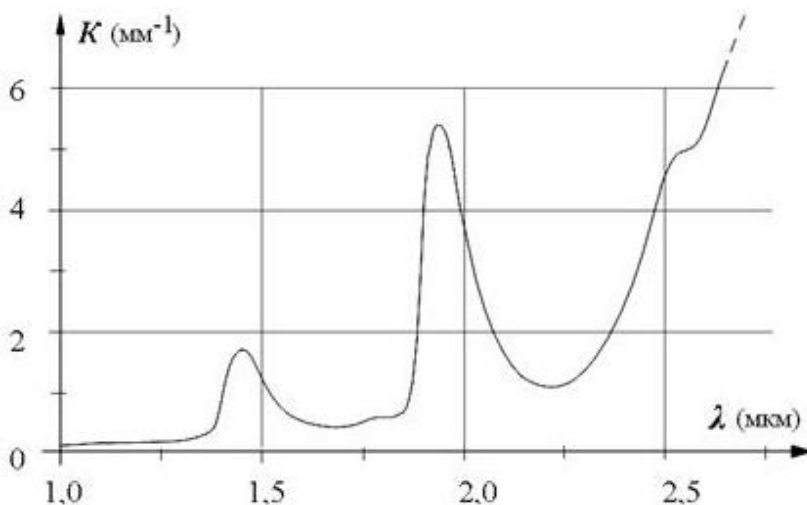


Рис. 20.1. Спектр поглощения воды в ближней инфракрасной области спектра

При длине волны $\lambda > 2,8$ мкм коэффициент поглощения воды превышает уже 6 мм^{-1} , т.е. на каждом миллиметре пути только за счет поглощения молекулами воды такой ИК свет ослабляется в $e^6 \approx 400$ раз.

20.1.1. Первые спектрофотометрические глюкометры фирмы Futrex

Одними из первых на разработку промышленного неинвазивного спектрофотометрического глюкометра отважились R. Rosenthal и его фирма *Futrex Inc.* (США). Для измерений они просвечивали светом с непрерывным спектром палец руки. Свет, прошедший сквозь палец, разлагался в спектр, и измерялись спектральные интенсивности этого света на нескольких длинах волны. В БИК области до 1,8 мкм были отобраны спектральные интервалы, характерные для поглощения света глюкозой и для поглощения другими, "фоновыми" веществами тела (вода, жиры, гемоглобин и другие белки). Для расчета концентрации

глюкозы применялись методики многоволновой спектрофотометрии, чтобы можно было выделить вклад и определить относительно небольшую концентрацию именно глюкозы. Разработчикам удалось улавливать и измерять малые концентрации глюкозы на уровне 100 мг% в кюветах с калиброванными растворами глюкозы и фоновых веществ. Был создан и выпущен во многих экземплярах для испытаний экспериментальный образец неинвазивного ИК глюкометра, внешний вид которого показан на рис. 20.2.



Рис. 20.2. Вид прибора "Dream Beam" для неинвазивного измерения сахара крови, разработанного фирмой Futrex

Однако при испытаниях на реальных объектах – пальцах человека – все оказалось намного хуже. Разработчики не учли то, что кровь в тканях пальца занимает лишь 1-5 % объема, т.е. средняя концентрация глюкозы в ткани пальца составляет не 100 мг %, как в крови, а в 20–100 раз меньше. Количество молекул глюкозы на пути света в человеческом теле почти на 4 порядка меньше, чем количество

молекул воды, и на 2 порядка меньше, чем количество молекул гемоглобина. Это обстоятельство, а также непонимание разработчиками проблемы корректного пересчета измеряемой концентрации глюкозы в тканях на КГК помешали доведению разработки неинвазивного глюкометра до промышленных образцов.

20.1.2. Другие попытки создания спектрофотометрического глюкометра

J.T. Olesberg из университета штата Айова вместе со своими сотрудниками надеялся достичь успеха, работая в третьем "окне прозрачности" воды, т.е. в диапазоне длин волн от 2 до 2,5 мкм, где имеются три характерных пика поглощения глюкозы, показанных на рис. 20.3. Вдоль горизонтали здесь отложена длина волны в мкм, а по вертикали – разность оптических плотностей 1 мм слоя раствора глюкозы и чистой воды

$$\Delta D = D - D_{\text{ВОД}} \quad (20.1)$$

Absorbance,

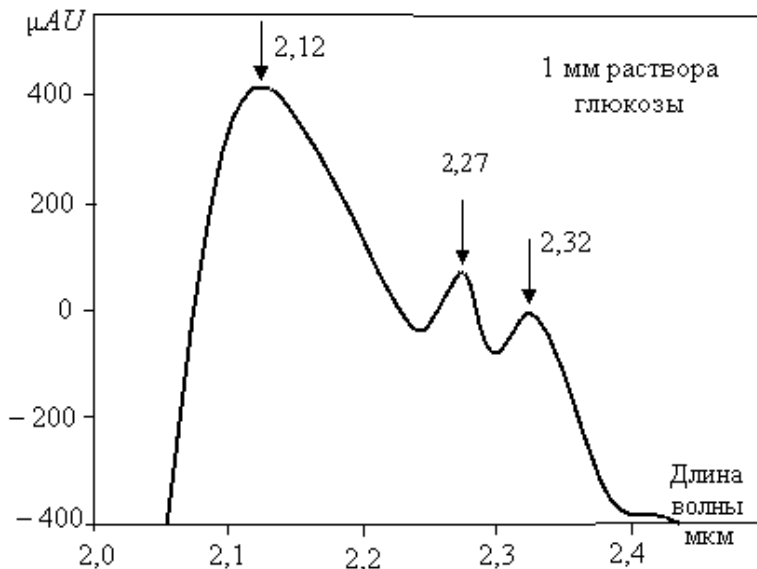


Рис. 20.3. Спектр поглощения 5-миллимолярного раствора глюкозы в воде

Т.е. это – т.н. "дифференциальный спектр поглощения глюкозы". Вертикальная шкала (Absorbance) проградуирована в единицах оптической плотности μAU . Напомним, что 1 AU (Absorbance Unit) – это оптическая плотность такого слоя, при которой десятичный логарифм пропускания слоя $\lg T = -1$, т.е. свет ослабляется таким слоем в 10 раз. Единица $1\mu\text{AU} = 10^{-6}\text{AU}$. При тех длинах волны, при которых раствор глюкозы поглощает свет сильнее, чем вода $\Delta D > 0$. А там, где поглощение раствора глюкозы слабей, чем поглощение чистой воды, имеем $\Delta D < 0$.

На рис. 20.3 стрелками указаны 3 максимума поглощения. В наибольшем из них (на длине волны 2,12 мкм) $\Delta D = 400\mu\text{AU} = 4 \times 10^{-4}\text{AU}$. Поскольку $10^{0,0004} \approx 1,00092$, то пропускание 1 мм слоя 5-миллимолярного раствора глюкозы примерно лишь на 0,1 % больше пропускания чистой воды. И все же, используя специальные алгоритмы (partial least squares regression) для выделения вклада в эти спектры именно глюкозы, разработчикам удалось измерять концентрацию глюкозы в модельных растворах глюкозы с разными фоновыми веществами. Хотя вода в этом окне прозрачности уже довольно сильно поглощает (слой воды толщиной 1 мм ослабляет свет в 40-50 раз), разработчики преодолели это препятствие, используя новейший БИК полупроводниковый лазер, разработанный в Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik (Freiburg, ФРГ: <http://www.iaf.fraunhofer.de>), способный изменять длину волны излучения. Изучение публикаций разработчиков показало, что и они недостаточно понимали разницу между концентрацией глюкозы в крови человека и измеряемой спектрофотометрическим методом средней концентрацией глюкозы в участке тела, который просвечивается светом. Пока что никаких сообщений разработчиков об испытаниях созданного сенсора на реальных объектах, к сожалению, нет.

Для быстрого получения спектра пропускания использовался перенастраиваемый акустооптический осцилляционный фильтр (acousto-optic variable oscillation tunable filter), о котором мы уже кратко рассказали в "Спектрофотометрические сенсоры как один из видов оптических сенсоров. Фотоплетизмографы. Оксиметры и пульсоксиметры". Это позволило использовать весь арсенал непрерывных методов селекции слабого сигнала глюкозы. Но о решающих успехах на реальных объектах и эти разработчики тоже пока и не сообщали.

Фирмы *Fovioptics Inc.* (Lexington, Kentucky, США: Интернет-страницы <http://www.fovioptics.com/> и <http://www.3rddimensiondesign.com/vonallmen/companies/FoviOptics.pdf>) и *Visionary Medical Products Corporation* (Reno, Nevada: <http://www.vmpc.com>) сообщили о проводимой ими разработке неинвазивного спектрофотометрического сенсора глюкозы, использующего "естественное окно для доступа света к крови" – человеческий глаз. Речь идет о зондировании светом определенных длин волны, об измерении и анализе спектральных интенсивностей света, отраженного от богатой кровеносными сосудами сетчатки глаза. Методы расчета концентрации глюкозы в крови на основе анализа отраженного света пока не раскрывались, так как являются предметом патентования.

Фирма *Infratec Inc.* (Wilton, Connecticut, США) разрабатывает спектрофотометрический сенсор глюкозы, в котором для измерений используется не внешний свет, а собственное инфракрасное тепловое излучение самих биологических тканей. В области длин волны от 8 до 14 мкм (средняя ИК область спектра) были выявлены характерные полосы теплового излучения глюкозы при 9,6 мкм и 10,9 мкм. Используя методы и достижения термоэмиссионной спектрофотометрии и возможности микроминиатюризации, разработчикам удалось вместить чувствительную часть прибора в габариты крохотной капсулы. Ее вставляют пациенту в слуховой канал уха и измеряют тепловое излучение на указанных длинах волны от барабанной перепонки, которая давно считается одной из наиболее термостабильных частей человеческого тела. Сообщено, что предварительные медицинские испытания показали возможность измерять КГК в диапазоне от 30 до 300 мг % с относительной погрешностью примерно 12 %.

20.1.3. Оклюзионный спектрофотометрический глюкометр

Предложен способ неинвазивного измерения КГК спектрофотометрическим методом. Один из возможных вариантов реализации этого способа показан на рис. 20.4. При подготовке к измерению пациент вставляет конечную фалангу своего пальца 2 сквозь кольцо-манжету 11 и кладет пучку пальца на измерительное ложе 1. Поверхность пальца автоматически входит в оптический контакт с выведенными в это ложе волоконно-оптическими световодами 17-19.

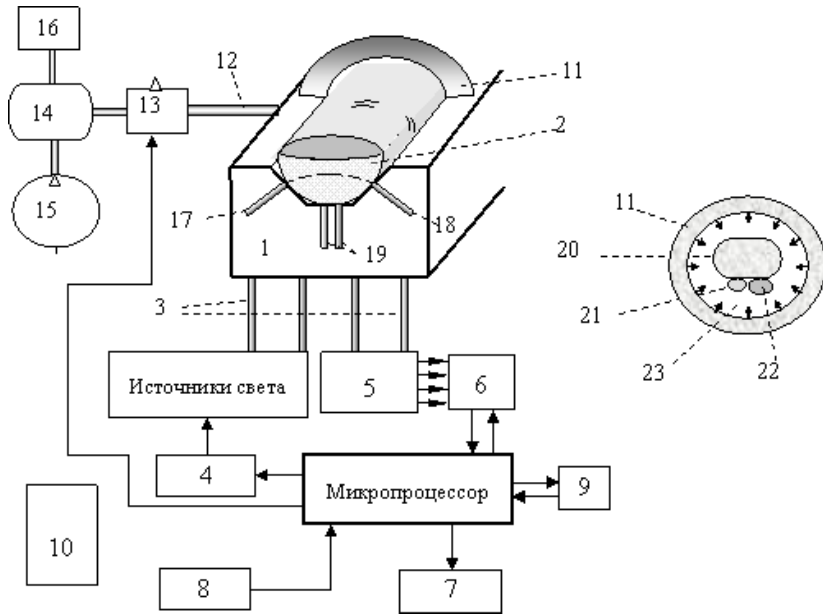


Рис. 20.4. Функциональная схема окклюзионного спектрофотометрического неинвазивного глюкометра: 1 – измерительное ложе для пальца; 2 – передняя фаланга пальца; 3 – оптические связи; 4 – модулятор источников света; 5 – фотоприемники и усилители сигналов; 6 – демодулятор и АЦП; 7 – дисплей; 8 – клавиатура управления; 9 – интерфейс с внешним компьютером; 10 – блок питания; 11 – надувное кольцо-манжета; 12 – соединитель; 13 – управляемый 2-ходовой вентиль; 14 – ресивер; 15 – нагнетатель воздуха; 16 – манометр; 17-19 – волоконно-оптические световоды. Справа – кольцо-манжета 11 и сжимаемый палец в условном сечении: 20 – костная ткань; 21 и 22 – артериальные и венозные сосуды; 23 – мягкие ткани

Перед измерениями с помощью компрессора 15 (это может быть и обычная резиновая "груша") в ресивер 14 нагнетается воздух до достижения заданного давления (например, 50-60 мм рт. ст.), которое контролируется манометром 16. Трёхходовой вентиль 13 сначала пневматически соединяет надувное эластичное кольцо-манжету 11 с атмосферой, и на первом этапе измерений дополнительного давления в ней нет.

После нажатия кнопки "Пуск" на клавиатуре 8 микропроцессор через схему управления светодиодами 4 включает источник света с длиной волны λ_G , характерной для поглощения глюкозой, и по заранее заданной программе модулирует его интенсивность, одновременно управляя синхронной демодуляцией соответствующего светового сигнала в узле 5. Модулированный свет через волоконно-оптический световод 17 поступает к пучке пальца 2 и входит перпендикулярно к его поверхности в мягкие ткани пальца в виде остро направленного светового зонда. Часть света от этого зонда, рассеиваясь вблизи наиболее вероятной траектории, условно изображенной на рисунке штриховой линией, проходит сквозь ткани пальца и попадает в приемный световод 18. Вдоль соответствующего оптического волокна выделенный световой сигнал передается к фотоприемнику 5, превращается в электрический сигнал, усиливается, демодулируется и в узле 6 превращается в двоичный код измеренной спектральной интенсивности. В микропроцессоре этот двоичный код ($NG^{(1)}$) запоминается.

Дальше микропроцессор через схему управления 4 выключает первый и включает второй источник света с длиной волны λ_H , характерной для поглощения гемоглобином. Модулированный свет от этого второго источника через волоконно-оптический световод 19 передается к пальцу. И, аналогично описанному выше, осуществляется измерение второй спектральной интенсивности и запоминается ее двоичный код $NH^{(1)}$.

После этого по сигналу от микропроцессора клапан 13 перекрывает выход кольца-манжеты 11 в атмосферу и присоединяет его к ресиверу 14. Поскольку объем ресивера во многие десятки раз больше внутреннего объема кольца-манжеты, то давление в манжете 11 быстро возрастает до заданного уровня. Она, в свою очередь, создает такое же давление на ткани пальца. На рис. 20.4 справа это схематически показано стрелками. Через мягкую ткань пальца 23 давление передается на костные ткани 20 и на артериальные (21) и венозные (22) кровеносные сосуды. Давление в ресивере выбрано так, чтобы давление в артериальных сосудах оставалось выше, чем давление извне. Благодаря этому, кровь продолжает поступать в палец. А давление внутри венозных сосудов оказывается ниже давления извне, поэтому вены перекрываются, и отток крови из пальца прекращается. Конечная фаланга пальца дополнительно наполняется кровью до тех пор, пока давление внутри вен не сравняется с внешним давлением манжеты.

Для слежения за кровенаполнением пальца микропроцессор организует периодическое измерение спектральной интенсивности на длине волны λ_H . Когда значение этой спектральной интенсивности стабилизируется (это означает стабилизацию после достижения нового уровня кровенаполнения), микропроцессор запоминает соответствующий код $N_H^{(2)}$. Затем производится измерение спектральной интенсивности на длине волны λ_G при новом уровне кровенаполнения и запоминается соответствующее значение $N_G^{(2)}$. После окончания измерений микропроцессор подает сигнал на управляемый клапан 13, который перекрывает выход кольца-манжеты 11 к ресиверу 14 и открывает выход в атмосферу. Давление в манжете снижается и уравнивается с атмосферным. Теперь пациент может свободно вынуть палец из измерительного пальцевого ложа. Микропроцессор рассчитывает концентрацию глюкозы в крови пациента и высвечивает полученное значение на дисплее 7.

20.1.4. Расчет концентрации глюкозы в крови

Чтобы вывести расчетную формулу для вычисления концентрации глюкозы в крови пациента, рассмотрим детальнее прохождение света сквозь мягкие ткани пальца. Используем такие обозначения:

λ_G – длина волны света при измерении поглощения глюкозой;

λ_H – длина волны света при измерении поглощения гемоглобином;

$\Phi_{G,0}$, $\Phi_{H,0}$ – интенсивности света соответственно с длинами волн λ_G и λ_H при входе в ткани пальца;

Φ_G , Φ_H – интенсивности света соответственно с длинами волн λ_G и λ_H при выходе из тела и входе в приемные оптические волокна;

s_G , s_H – средние длины пути, который проходит свет с длинами волн λ_G и λ_H между входом в ткань и выходом из нее;

K_{SG} , K_{SH} – коэффициенты ослабления света, обусловленные рассеянием тканью, на длинах волн λ_G и λ_H соответственно;

k_G – удельный коэффициент поглощения глюкозы на длине волны λ_G ;

k_H – удельный коэффициент поглощения гемоглобина на длине волны λ_H ;

$K_{ФП,G}$, $K_{ФП,H}$ – коэффициенты фонового поглощения света на длинах волны λ_G и λ_H соответственно;

Z – множитель, который учитывает общие потери света, связанные с тем, что для измерений собирается, доходит к фотоприемнику и преобразуется в электрический сигнал лишь часть обратно рассеянного телом света;

$c_{G,K}$, $c_{G,T}$ – концентрации глюкозы в крови и в ткани.

По закону Ламберта-Бэра на длине волны λ_G для двух разных уровней кровенаполнения имеют место соотношения:

$$\Phi_G^{(1)} = \Phi_{G,0} Z \exp[-(K_{S,G}^{(1)} + K_{ФП,G}^{(1)} + k_G c_{G,T}^{(1)}) s_G] \quad (20.2)$$

$$\Phi_G^{(2)} = \Phi_{G,0} Z \exp[-(K_{S,G}^{(2)} + K_{ФП,G}^{(2)} + k_G c_{G,T}^{(2)}) s_G] \quad (20.3)$$

Здесь учтено то, что удельный коэффициент поглощения глюкозой k_G не зависит от кровенаполнения. Мало зависит от кровенаполнения и коэффициент рассеяния света тканью ($K_{S,G}^{(1)} \approx K_{S,G}^{(2)}$). Но в коэффициентах фонового поглощения $K_{ФП,G}^{(1)}$ и $K_{ФП,G}^{(2)}$ следует явным образом выделить те слагаемые, которые зависят от кровенаполнения ткани φ_1 и φ_2 ,

$$K_{ФП,G}^{(1)} = K_{ФП,0} + (k_{V,G} c_{V,K} + k_{Hb,G} c_{Hb,K}) \varphi_1 \quad (20.4)$$

$$K_{ФП,G}^{(2)} = K_{ФП,0} + (k_{V,G} c_{V,K} + k_{Hb,G} c_{Hb,K}) \varphi_2 \quad (20.5)$$

Здесь $K_{ФП,0}$ – коэффициент фонового поглощения всеми компонентами ткани, которые находятся вне кровеносного русла, при длине волны λ_G ;

$k_{V,G}$ – удельный коэффициент поглощения воды при длине волны λ_G ;

$c_{V,K}$ – концентрация воды в крови;

$c_{\text{Hb},K}$ – концентрация гемоглобина в крови;

$k_{\text{Hb},G}$ – удельный коэффициент поглощения гемоглобина при длине волны .

Эти величины ($K_{\text{ФП},0}$, $k_{\text{В},G}$, $k_{\text{Hb},G}$) не зависят от кровенаполнения ткани. В выражениях (20.4) и (20.5) учтены лишь те компоненты крови, которые существенно поглощают свет с длиной волны λ_G . В случае необходимости могут быть учтены и другие.

Если поделить (20.2) на (20.3) с учетом (20.4) и (20.5), то получим

$$\Phi_G^{(1)} / \Phi_G^{(2)} = \exp [(k_{\text{В},G}c_{\text{В},K} + k_{\text{Hb},G}c_{\text{Hb},K} + k_{\text{G}}c_{\text{G},K})(\varphi_2 - \varphi_1)s_G] \quad (20.6)$$

Отсюда можно найти

$$c_{\text{G},K} = \langle \ln \Phi_G^{(1)} / \Phi_G^{(2)} \rangle / (k_{\text{G}}s_G(\varphi_2 - \varphi_1)) - [(k_{\text{В},G}c_{\text{В},K} + k_{\text{Hb},G}c_{\text{Hb},K}) / k_{\text{G}}] \quad (20.7)$$

В этой формуле параметры k_{G} , $k_{\text{В},G}$, $k_{\text{Hb},G}$ – физические константы соответственно глюкозы, воды, гемоглобина; s_G – константа, которая определяется конструкцией прибора; $c_{\text{В},K}$ и $c_{\text{Hb},K}$ – параметры состава крови, которые для конкретного пациента стабильны.

Теперь покажем, как можно определить разность $(\varphi_2 - \varphi_1)$ в формуле (20.7). Для этого запишем уравнения, аналогичные уравнениям (20.2) и (20.3), но на этот раз для света с длиной волны λ_H (тоже для двух уровней кровенаполнения φ_1 и φ_2):

$$\Phi_H^{(1)} = \Phi_{H,0} Z \exp [-(K_{S,H}^{(1)} + K_{\text{ФП},H}^{(1)} + k_H c_{\text{Hb},T}^{(1)}) s_H] \quad (20.8)$$

$$\Phi_H^{(2)} = \Phi_{H,0} Z \exp [-(K_{S,H}^{(2)} + K_{\text{ФП},H}^{(2)} + k_H c_{\text{Hb},T}^{(2)}) s_H] \quad (20.9)$$

Коэффициенты рассеяния света $K_{S,H}$ и фонового поглощения $K_{\text{ФП},H}$ тканью тела очень мало зависят от кровенаполнения ткани (так как все другие компоненты ткани, кроме крови, остаются неизменными). Поэтому можно считать, что $K_{S,H}^{(1)} = K_{S,H}^{(2)}$ и $K_{\text{ФП},H}^{(1)} = K_{\text{ФП},H}^{(2)}$. От кровенаполнения не зависит и удельный коэффициент поглощения света гемоглобином k_H . Кроме гемоглобина, одной из основных составляющих крови является вода. Но она на длине волны λ_H прозрачна и практически не поглощает свет. А концентрация других

составляющих крови настолько мала по сравнению с водой и гемоглобином, что их поглощением на длине волны λ_H можно пренебречь. В "Спектрофотометрия в обратно рассеянном свете. Гемоглобиномеры и сенсоры кровенаполнения" мы показали, что

$$c_{\text{Hb,T}} = \varphi c_{\text{Hb,K}} \quad (20.10)$$

Поэтому

$$c_{\text{Hb,T}}^{(1)} = \varphi_1 c_{\text{Hb,K}}; \quad c_{\text{Hb,T}}^{(2)} = \varphi_2 c_{\text{Hb,K}} \quad (20.11)$$

Поделим (20.8) на (20.9). Тогда после преобразований с учетом (20.11) находим

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \ln(\Phi_H^{(1)} / \Phi_H^{(2)}) / (k_H c_{\text{Hb,K}} s_H) \quad (20.12)$$

Подставив (20.12) в (20.7), получаем следующую формулу для вычисления концентрации глюкозы в крови:

$$c_{G,K} = A c_{\text{Hb,K}} <B[\ln(\Phi_G^{(1)} / \Phi_G^{(2)}) / \ln(\Phi_H^{(1)} / \Phi_H^{(2)})] - 1 > - C \quad (20.13)$$

где

$$A = k_{\text{Hb,G}} / k_G; \quad B = s_H / s_G; \quad C = k_{B,G} c_{B,K} / k_{\text{Hb,G}} \quad (20.14)$$

константы, которые можно определять при калибровке прибора.

После аналого-цифрового преобразования отношения световых потоков заменяются отношениями полученных соответствующих двоичных кодов $N_G^{(1)}$, $N_G^{(2)}$, $N_H^{(1)}$, $N_H^{(2)}$. Приходим к окончательной расчетной формуле:

$$c_{G,K} = A c_{\text{Hb,K}} <B[\ln(N_G^{(1)} / N_G^{(2)}) / \ln(N_H^{(1)} / N_H^{(2)})] - 1 > - C \quad (20.15)$$

Величину $c_{\text{Hb,K}}$ для конкретного пациента заносят в память микропроцессора, который автоматически использует ее при вычислениях. Обновление значения $c_{\text{Hb,K}}$ можно проводить раз в 4-6 месяцев и лишь в необходимых случаях (это устанавливает врач) – чаще.

Описанный активный, "окклюзионный" способ измерения эффективно решает проблему корректного пересчета результатов измерения на концентрацию глюкозы в крови.

Тем не менее, всё еще остаются большие трудности, связанные с очень малой средней концентрацией глюкозы в биологической ткани, а также с тем, что глюкоза, как оказалось, не имеет характерных сильных полос поглощения не только в видимой, но и во всей доступной инфракрасной области спектра.

20.1.5. Имплантируемый спектрофотометрический глюкометр

Из-за указанных выше трудностей наибольшие шансы на практическую реализацию пока что имеют лишь спектрофотометрические сенсоры глюкозы, рассчитанные на имплантацию под кожу пациента. Входной световой зонд в этом случае входит непосредственно в достаточно крупный кровеносный сосуд сквозь его стенку. А выходящий из противоположной его стенки свет берется для спектрофотометрического анализа. Миниатюрная оптическая головка сенсора надолго имплантируется под кожу на сосуд. Это позволяет избавиться от оптических помех, связанных с прохождением света сквозь кожу и другие биологические ткани вне кровеносного русла, и измерять непосредственно КГК. О разработке такого спектрофотометрического сенсора глюкозы сообщила, например, американская фирма *Animas Inc.* (<http://www.animascorp.com>).

20.2. Сенсор для измерения хлорофилла в листьях растений

Поучительным специфическим примером спектрофотометрического сенсора, благодаря особенностям объекта исследования, является сенсор для измерения содержания хлорофилла в листьях растений. Речь идет о среднем количестве хлорофилла, которое приходится на единицу площади зеленого листка растения и измеряется в мг/см². Для специалистов по физиологии растений и агрономов-практиков это – очень важный показатель нормального развития и функционирования растения. В молодых листочках поверхностная плотность хлорофилла невелика, но со временем возрастает. Чем больше она становится, тем быстрее повышается производительность процессов фотосинтеза и скорость наращивания биомассы растения. Специалисты по физиологии растений и агрономы-практики могут сделать по этому показателю ряд важных выводов, и если требуется, своевременно принять соответствующие агротехнические меры.

Классический метод определения этого параметра состоит в том, что из листьев растения пустотелой трубочкой стандартного диаметра делают "высечки" фиксированной площади, растирают их, готовят спиртовую вытяжку хлорофилла, заливают ее в кюветы и спектрофотометрическим методом определяют концентрацию хлорофилла в растворе. Полученное значение пересчитывают в поверхностную плотность с учетом известной площади высечки.

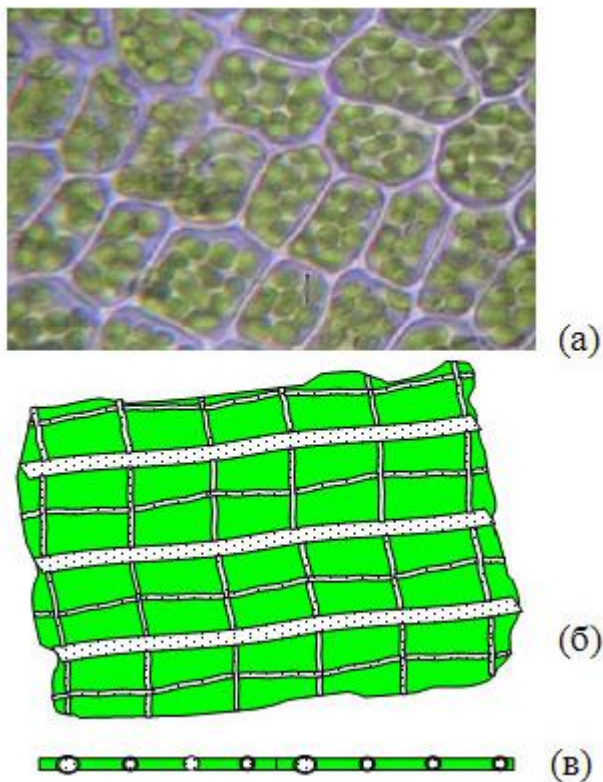


Рис. 20.5. Вид одного из участков зеленого листка при 30-кратном увеличении: а) фотография; б) схема на просвет; в) схема в разрезе

Мы видим сеть сосудов, в промежутках между которыми размещаются пластинки с хлоропластами. Стенки сосудов и находящаяся в них жидкость поглощают свет значительно меньше, чем хлоропласты, и

потому пропускают больше света и выглядят значительно светлее. Хлоропласты поглощают свет сильнее, поэтому выглядят темными.

Интенсивность света, который проходит сквозь хлоропласты, может быть вычислена по известной формуле

$$I_x = I_0(1-R) \exp(-K_x d) \quad (20.16)$$

где I_0 – интенсивность падающего света; R – коэффициент отражения от поверхности листка; K_x – коэффициент ослабления света в хлоропласте (мм^{-1}); d – толщина хлоропласта (листка).

При прохождении сквозь хлоропласт свет ослабляется как из-за поглощения, так и вследствие рассеяния на оптических неоднородностях. Поэтому

$$K_x d = k_{\text{ПХСП}} + K_{\text{РФП}} d \quad (20.17)$$

где $k_{\text{ПХСП}}$ – удельный коэффициент поглощения света хлорофиллом; $c_{\text{П}}$ – поверхностная концентрация хлорофилла, которую и нужно определять; $K_{\text{РФП}}$ – коэффициент ослабления света из-за рассеяния и фонового поглощения всеми другими компонентами ткани листка, кроме хлорофилла. Этот коэффициент не зависит от концентрации хлорофилла.

Интенсивность света, который проходит сквозь светлые места листка (сквозь его сосудистую сеть), может быть вычислена по формуле

$$I_c = I_0(1-R) \exp(-K_{\text{РФП}} d) \quad (20.18)$$

Интенсивность эта, как правило, на порядок превышает интенсивность света, проникающего сквозь темные участки листка. И хотя суммарная площадь темных участков в 6...20 раз больше, чем суммарная площадь светлых участков, интегральный (по всей площади) световой поток, который проходит сквозь светлые участки, вполне сопоставим с интегральным световым потоком, проникающим сквозь темные участки листка. А при больших концентрациях хлорофилла световой поток сквозь светлые участки в синей области спектра может стать определяющим.

Участки с хлоропластами перекрывают часть $\alpha=0,85\dots, 0,95$ всей поверхности листка. Размеры этих участков значительно меньше размера области диаметром 3-5 мм, которую обычно просвечивает световой зонд. Поэтому при вычислении интенсивности суммарного светового потока I_{Σ} , проникающего сквозь листок, можно применить статистический подход. Тогда приходим к формуле

$$I_{\Sigma} = I_0(1-R)[\alpha \exp(-k_{ПХ}c_{П} - K_{РФП}d) + (1-\alpha) \exp(K_{РФП}d)] \quad (20.19)$$

Первое слагаемое в квадратных скобках соответствует световому потоку сквозь пластинки с хлоропластами, а второе – световому потоку сквозь сосудистую сеть листка. Параметры $(\alpha, d, K_{РФП}, R)$ изменяются от листка к листку, от одного вида растений к другому, с возрастом листка. Поэтому, измерив только суммарный световой поток I_{Σ} , прошедший сквозь листок, нельзя однозначно определить поверхностную концентрацию хлорофилла $c_{П}$, которая интересует растениеводов.

У связи с этим применяется особый подход. Выберем две длины волны: одну в красной области спектра, где хлорофилл имеет сильную полосу поглощения, другую – в ближней инфракрасной области спектра, где поглощение хлорофилла уже незначительное. В то же время коэффициенты фонового поглощения и рассеяния света на обеих длинах волны приблизительно одинаковы. Для красной (измерительной) длины волны формулу (20.19) можно записать в виде

$$I_{\Sigma}^{(K)} = I_0^{(K)}(1-R)[\alpha \exp(-k^{(K)}_{ПХ}c_{П} - K^{(K)}_{РФП}d) + (1-\alpha) \exp(K^{(K)}_{РФП}d)] \quad (20.20)$$

где $K^{(K)}_{ПХ}$ и $K^{(K)}_{РФП}$ – соответственно удельный коэффициент поглощения света хлорофиллом и фоновый коэффициент ослабления света другими компонентами ткани листка в красном интервале спектра; $I_0^{(K)}$ – интенсивность первичного пучка красного света.

Для инфракрасной (опорной) длины волны, где поглощение хлорофилла слабо и практически не отличается от фона, формулу (20.19) можно записать в виде

$$I_{\Sigma}^{(ИК)} = I_0^{(ИК)}(1-R)\alpha \exp(-K^{(ИК)}_{РФП}d) \quad (20.21)$$

где $K^{(ИК)}_{PФЛГ}$ – фоновый коэффициент ослабления света в инфракрасном интервале спектра; $I_0^{(ИК)}$ – интенсивность первичного пучка инфракрасного света.

Если $K^{(ИК)}_{PФЛГ} \approx K^{(К)}_{PФЛГ}$, то выравнивая (соответствующим регулированием тока через светодиоды) интенсивности падающего света в обоих каналах, мы можем добиться, чтобы выполнялось условие $I_0^{(ИК)} = I_0^{(К)}$. Тогда, поделив равенство (20.20) на равенство (20.21), получаем

$$I_{л}^{(К)} / I_{л}^{(ИК)} = \alpha \exp(-k^{(К)}_{лхсп}) + (1-\alpha) \quad (20.22)$$

Решая это уравнение относительно поверхностной концентрации хлорофилла, находим:

$$c_{П} = \ln[\alpha I_{л}^{(ИК)} / (I_{л}^{(К)} (1-\alpha))] / k^{(К)}_{ПХ} \quad (20.23)$$

Итак, измеряя интенсивности красного и инфракрасного света, прошедших сквозь листок, и зная параметры α и $k^{(К)}_{ПХ}$, можно по формуле (20.23) рассчитать поверхностную концентрацию хлорофилла.

Относительная доля α площади листка, которую занимают "темные" участки с хлоропластами, зависит, вообще говоря, от вида растений и от возраста листьев. Но в среднем можно принять значение $\alpha \approx 0,9$.

Поскольку в листьях присутствуют 2 формы хлорофилла (a и b), которые поглощают свет несколько по-разному (рис. 20.6), то для определения концентрации общего хлорофилла длину волны лучше выбрать там, где обе формы поглощают свет одинаково, например, при $\lambda \approx 640$ нм.

Структура выносной оптоэлектронной головки сенсора показана на рис. 20.7. Головка выполнена в виде клипсы (прищепки) и содержит в одной щечке (2) красный (4) и инфракрасный (5) светодиоды, а в другой щечке (3) – фотоприемник 6. Листок 1, не отрывая от растения, вставляют между щечками клипсы, просвечивают поочередно красным и инфракрасным светом.

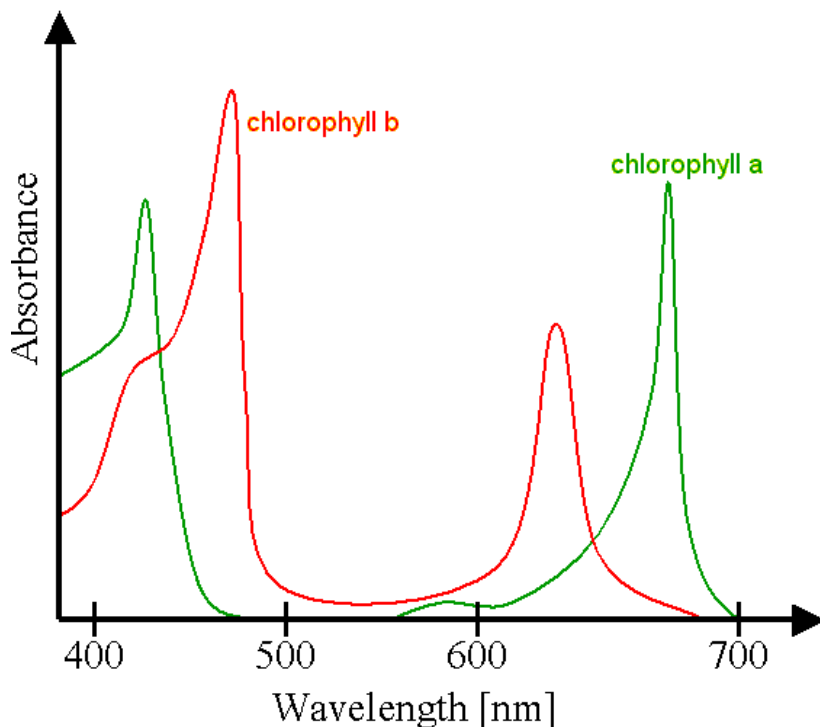


Рис. 20.6. Спектры поглощения двух основных форм хлорофилла

По результатам измерений микрокомпьютер рассчитывает поверхностную концентрацию хлорофилла. Результаты сотен измерений могут сохраняться в долговременной памяти сенсора. В микрокомпьютере могут вычисляться средние значения по многим листьям одного растения, по открытой для света кроне или по затененным нижним листьям, среднее значение для группы однородных растений и т.п. Могут также вычисляться дисперсия и другие статистические величины, – всё, что нужно пользователю (агроному, биологу).

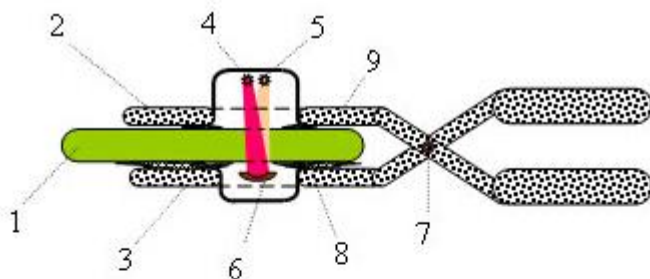


Рис. 20.7. Вверху – конструкция оптоэлектронной головки для определения плотности хлорофилла в листьях растений; внизу – головка в действии

Подобный интеллектуальный спектрофотометрический сенсор ССМ-200 (Chlorophyll Content Meter – см. рис. 20.8) выпустила на рынок также американская фирма Opti-Sciences [<http://www.optisci.com/ccm.htm>]. Оптоэлектронный узел здесь не является выносным, а встроен в корпус сенсора. Головка с фотоприемником и встроенным усилителем сделана подвижной. Исследуемую часть листка вставляют между головкой и расположенными в корпусе светодиодами, прижимают головкой.

После этого выполняются измерения и вычисление концентрации хлорофилла. Одновременно отсчитывается координата головки по вертикали, что позволяет определить толщину листка. Это позволяет вычислить не только поверхностную, но и объемную среднюю концентрацию хлорофилла.



Рис. 20.8. Сенсор для измерения содержания хлорофилла в листьях растений фирмы Opti-Sciences (США). Размеры 152 x 82 x 25 мм, масса 162 г

Сенсор размерами 152x82x25 мм и массой 162 г имеет память на 8000 измерений, встроенный аккумулятор электропитания, рассчитан на длительное применение в полевых условиях. К нему прилагаются кабель интерфейса RS-232 и программное обеспечение для организации считывания накопленных в нем данных во внешний компьютер.

Краткие итоги

Уже в 70-х годах XX в. одной из важных задач стала необходимость создания сенсора для неинвазивного измерения концентрации глюкозы в крови (КГК). Наибольшие надежды при этом возлагались именно на спектрофотометрические сенсоры. Было предпринято много попыток создания неинвазивных спектрофотометрических глюкометров с использованием методов многоволновой и непрерывной спектрофотометрии. Долгое время разработчики не осознавали разницу между КГК и концентрацией глюкозы в просвечиваемых тканях. В начале XXI в. предложена идея окклюзионного спектрофотометрического глюкометра, которая, благодаря измерениям при разных уровнях кровенаполнения просвечиваемого участка тела, успешно решает проблему корректного пересчета результатов измерений спектральных интенсивностей на КГК. И тем не менее, создать и выпустить на рынок неинвазивный спектрофотометрический глюкометр пока не удалось из-за того, что не только в видимой, но и в доступной ИК области спектра молекулы глюкозы не имеют сильных специфических полос поглощения. К тому же средняя концентрация глюкозы в тканях тела в 20-100 раз меньше её концентрации в крови и составляет лишь порядка 10^{-5} - 10^{-4} моль/л.

Интересным примером спектрофотометрического сенсора, благодаря особенностям объекта исследования, является сенсор для измерения содержания хлорофилла в листьях растений. Препятствием здесь стала гетерогенная структура листовой пластинки. Лист всегда пронизан сосудистой сетью, которая поглощает свет значительно слабей, чем хлоропласты, и потому пропускает больше света и выглядит на просвет значительно светлее. И хотя суммарная площадь темных участков гораздо больше, чем суммарная площадь светлых участков, интегральный (по всей площади листка) световой поток, который проходит сквозь светлые участки, вполне сопоставим со световым потоком, проникающим сквозь темные участки листка. Однако внимательный количественный анализ позволил всё же найти способ не травмирующего лист растения спектрофотометрического измерения содержания хлорофилла. Такие интеллектуальные сенсоры уже выпускаются промышленно. Специалисты по физиологии растений и агрономы-практики могут сделать по этому показателю ряд важных выводов, и если требуется, своевременно принять соответствующие агротехнические меры.

21. Теоретические основы работы люминесцентных сенсоров.

21.1. Общие сведения о люминесценции

Напомним, что *люминесценцией называют вызванное каким-то возбуждающим фактором избыточное (над тепловым) излучение тел, которое запаздывает относительно возбуждения на время, значительно больше периода световых колебаний.*

В зависимости от причины возбуждения атомов или молекул различают:

- *фотолюминесценцию*, которая возникает в результате поглощения возбуждающего света;
- *рентгенолюминесценцию*, возникающую в результате возбуждения рентгеновским излучением;
- *катодолюминесценцию*, которая возникает в результате бомбардировки быстрыми электронами;
- *электролюминесценцию*, которая возникает в результате возбуждения электрическим полем или током;
- *биолюминесценцию*, возникающую в результате возбуждений, возникающих при протекании биохимических реакций и других биологических процессов в живом организме;
- *хемилюминесценцию*, которая возникает в результате возбуждений при химических реакциях, и т.п.

Каждый из этих видов люминесценции может быть использован для построения разнообразных люминесцентных сенсоров.

По времени задержки люминесценции относительно возбуждения различают такие ее виды, как *флуоресценция* и *фосфоресценция*. При *флуоресценции* время задержки очень мало (не больше условной границы в 1 мс). Она достаточно быстро затухает после прекращения возбуждения. При *фосфоресценции*, наоборот, задержка и затухание люминесценции после прекращения возбуждения очень значительны – больше условной границы в 1 с. Иногда фосфоресценция продолжается в течение многих десятков часов. Люминесценция с промежуточными значениями задержки во времени (между 1 мс и 1 с) специального названия не имеет. *Изменения задержки люминесценции относительно*

возбуждения могут нести ценную информацию об объекте наблюдения.

Спектральный состав люминесценции зависит от свойств излучающего тела и при фотолюминесценции, например, отличается от спектрального состава возбуждающего света. Энергия квантов люминесценции обычно меньше энергии, полученной атомом, молекулой или кристаллом в результате возбуждения. Поэтому, скажем, спектр фотолюминесценции всегда сдвинут относительно спектра возбуждающего излучения в сторону красной области спектра. *Изменения в спектральном составе люминесценции также могут быть первичным информационным сигналом в интеллектуальном сенсоре.*

Интенсивность флуоресценции, как правило, пропорциональна интенсивности возбуждения (например, интенсивности возбуждающего света, интенсивности рентгеновского облучения, силе тока электронного пучка и т.п.). Интенсивность эта может зависеть от ряда внешних факторов. Например, с повышением температуры интенсивность флуоресценции, как правило, уменьшается. Это явление называют *температурным тушением* люминесценции. Некоторые факторы, наоборот, могут благоприятствовать люминесценции, интенсивность которой возрастает. Поэтому, измеряя интенсивность люминесценции, можно получить информацию о наличии и поведении каждого из таких "факторов".

Люминесценцию уже давно применяют для выявления дефектов в изделиях, для исследования художественных полотен, свойств кристаллов, выявления примесей, для считывания невидимых без специального возбуждения штрих-кодов или маркировок и т.п.

Наблюдение, измерение и анализ люминесцентного излучения биологических объектов может давать много ценной информации о состоянии и функционировании этих объектов. Рассмотрим один из важных для практики примеров.

21.2. Теоретические основы метода индукции флуоресценции хлорофилла

Одним из фундаментальных процессов жизнедеятельности растений является фотосинтез – образование под действием света углеводов,

глюкозы и других органических веществ из молекул воды и углекислого газа с выделением кислорода. Именно фотосинтез является главным источником наращивания биомассы на планете, очищения атмосферы Земли от углекислого газа и обогащения её кислородом. В этом отношении совсем не является преувеличением утверждение о том, что *фотосинтез лежит в основе всей жизни на Земле.*

По тому, насколько эффективно происходит в растениях фотосинтез, можно судить об их здоровье и о состоянии окружающей среды, определять оптимальные условия произрастания, прогнозировать дальнейшее развитие растений и их плодородие. Нарушения в фотосинтезе начинаются, как правило, еще задолго до того, как изменится внешний вид растения. *Обнаружив нарушения фотосинтеза, можно еще на ранней стадии выявить заболевания растений, ухудшение состояния окружающей среды и своевременно помочь растениям, проведя соответствующие агротехнические мероприятия* (увлажнение, подкормку, обработку против болезней и т.п.).

21.2.1. Краткие сведения о механизме фотосинтеза

К сожалению, сами растения не могут сразу же сообщить нам о том, что им стало плохо. Но живая природа оставила нам возможность, которая позволяет с помощью интеллектуальных сенсоров своевременно выявить нарушения фотосинтеза. Чтобы объяснить эту возможность, напомним вкратце механизм фотосинтеза.

Первичными для этого процесса являются акты поглощения света в хлоропластах молекулами хлорофилла и других биологических пигментов ("светосборщиков"), которые обеспечивают эффективное собирание на нужды фотосинтеза энергии из почти всего спектра дневного света. Электронные возбуждения, которые возникают в результате поглощения света, передаются на так называемые "реакционные центры" хлоропластов. Доставленная сюда энергия возбуждения может быть использована:

- а) на стимулирование фотохимических реакций;
- б) на флуоресценцию в красной области спектра;

в) на безизлучательную диссипацию с преобразованием энергии возбуждения в тепловую энергию.

Безизлучательная диссипация определяется в основном температурой листьев и мало зависит от эффективности расходования энергии на фотосинтез. Таким образом, биохимические реакции фотосинтеза и флуоресценция являются конкурирующими каналами утилизации собранной энергии возбуждения. Чем больше поглощенной в хлоропластах световой энергии идет на фотосинтез, тем меньше интенсивность флуоресценции хлорофилла. И, наоборот, если фотосинтез тормозится, угнетается какими-то факторами, тогда возрастает интенсивность флуоресценции хлорофилла. Таким образом, флуоресценция хлорофилла – это "изобретенный" и предоставленный нам природой механизм сигнализации о ходе фотосинтеза в живом хлоропласте.

Известно, что фотосинтез – это сложный многостадийный биохимический процесс. Сначала ряд так называемых "световых" реакций в хлоропластах и находящихся в них молекулах хлорофилла обеспечивает перенос в два этапа (на т.н. "фотосистемах I и II") валентных электронов от молекул воды (ионов гидроксила) к молекулам НАДФ (никотинамидадениндинуклеотидфосфата) – одному из важных промежуточных ферментов фотосинтеза, с повышением их энергии. В переносе электронов принимают участие и ряд других промежуточных ферментов. Дальше происходит ряд так называемых "темновых" реакций фотосинтеза, известных под названием "цикла Кальвина", в ходе которых происходит синтез углеводов с поглощением молекул углекислого газа (CO_2) и выделением молекул кислорода (O_2), и фосфорилирование аденозиндифосфорной кислоты (АДФ).

21.2.2. Единицы измерения интенсивности освещения при фотосинтезе

Для хода процессов фотосинтеза важна не столько суммарная энергия поглощенного света, сколько количество поглощаемых квантов света за единицу времени. Ведь фотосинтез, как и фотоэффект, – это сугубо квантовый физико-химический процесс. Поэтому интенсивность возбуждающего фотосинтез света принято выражать в квантовых единицах – в "молях фотонов на квадратный метр площади за секунду" (моль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$). Такая интенсивность означает, что на квадратный метр

поверхности каждую секунду падает 1 моль, т.е. $N_A = 6 \times 10^{23}$ (число Авогадро) фотонов видимого света. Энергия одного фотона с длиной волны $\lambda = 500$ нм составляет $(hc/\lambda) \approx 4 \times 10^{-19}$ Дж. Если приять это за среднюю энергию фотонов всего видимого света, тогда интенсивность 1 моль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ эквивалентна энергетическому потоку $240 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Это – весьма мощный поток. Поэтому чаще пользуются квантовой единицей интенсивности в миллион раз меньшей – 1 мкмоль фотонов/ $(\text{м}^2\text{с})$, которая эквивалентна энергетическому потоку $240 \text{ мВт}/\text{м}^2$ или в единицах освещенности приблизительно 140 люкс (лк).

Указанные соотношения для видимого света, возбуждающего фотосинтез,

$$1 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2\text{с}) \sim 240 \text{ мВт}/\text{м}^2 \sim 140 \text{ лк} \quad (21.1)$$

надо иметь в виду при дальнейшем рассмотрении.

Уровень квантовой интенсивности возбуждающего света в 20 - 500 мкмоль/ $(\text{м}^2\text{с})$ считают физиологически нормальным. Квантовую интенсивность света до 10 мкмоль/ $(\text{м}^2\text{с})$ считают низкой. Интенсивность порядка 2000 мкмоль/ $(\text{м}^2\text{с})$ и выше называют "насыщающей", поскольку она достаточна для быстрого восстановления всех первичных акцепторов электронов, т.е. для полного насыщения квантами возбуждения всех каналов фотосинтеза.

21.2.3. Индукция флуоресценции хлорофилла

Если зеленый листок продолжительное время (15 - 45 мин.) выдержать в темноте, то все запасы возбуждений (активированных молекул и ионов, в том числе ферментов) исчерпываются, и фотосинтез прекращается. Когда на такой адаптированный к темноте живой листок начинает действовать свет, то на реакционные центры хлоропластов направляется поток электронных возбуждений. В начальный момент все каналы фотосинтетического переноса электронов полностью открыты, они максимально интенсивно "откачивают" энергию в цепь реакций фотосинтеза, и флуоресценция хлорофилла минимальна. Ее интенсивность в этот момент обозначают F_0 . Собранный энергия возбуждений в основном идет на восстановление первичных акцепторов электронов. Концентрация еще не восстановленных первичных акцепторов начинает уменьшаться. Из-за этого замедляется откачка электронных возбуждений на фотосинтез, вследствие чего интенсивность флуоресценции хлорофилла возрастает. В

биохимической цепи фотосинтеза по мере накопления активированных молекул-ферментов предыдущего звена начинают активироваться следующие звенья. Весь фотосинтетический процесс развивается (как бы "разворачивается") во времени. А вместе с ним изменяется во времени и интенсивность флуоресценции хлорофилла, сигнализируя о развитии процесса фотосинтеза. Это явление было открыто еще в 30-х годах прошлого века и получило название "индукции флуоресценции хлорофилла" (ИФХ). А график зависимости интенсивности флуоресценции хлорофилла от времени, начиная от начала освещения, (см. рис. 21.1) назвали "кривой индукции флуоресценции хлорофилла" ("кривой ИФХ" или же "кривой Каутского" – в честь первооткрывателя). Среди специалистов принято разбивать её на ряд характерных участков, которые получили уже общепринятые обозначения *O-I-D-P-S-M-T*. Вдоль горизонтали использовали логарифмическую шкалу времени в секундах. Вдоль вертикали интенсивность флуоресценции представлена в относительных единицах. Участок *O-I-D-P*, на котором изменения интенсивности флуоресценции происходят весьма быстро (за доли секунды), называют "быстрой фазой" ИФХ, а участок *P-S-M-T* – "медленной фазой" ИФХ. Для каждого из участков в табл. 21.1 указаны интервалы времени (после начала освещения), на которых они наблюдаются. Там же указаны и стадии фотосинтетического процесса, которым они соответствуют и которыми регулируются.

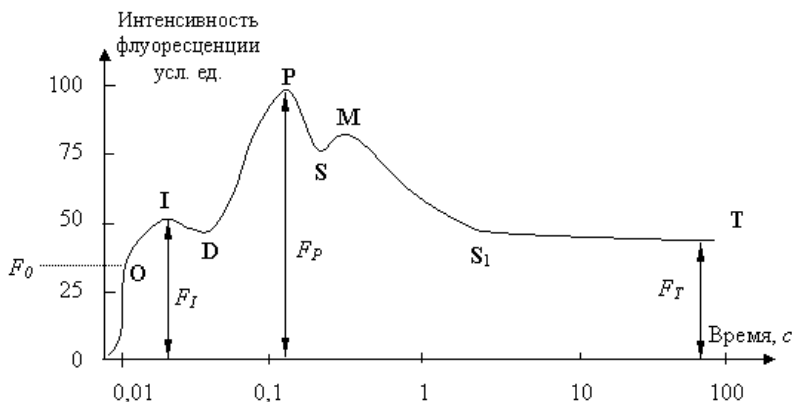


Рис. 21.1. Типичная кривая ИФХ и общепринятые обозначения ее характерных точек

Таблица 21.1.

№ п/п	Участок кривой ИФХ	Вид (признак) участка	Интервал времени	Стадии фотосинтетического процесса, информацию о которых дает этот участок
1	Точка О	Начальный участок	0...5 мс	Эффективность собирания света и реакционных центров фотосистемы II
2	<i>O-I-D-P</i>	Выход на главный максимум	0,1...10 с (0,01...1 с)	Электронтранспортное звено (от H ₂ O к Фд и НАДФ) – "световая стадия" фотосинтеза
3	<i>P-S-M</i>	Спад и выход на второй максимум	3...50 с (0,5...10 с)	Активация (через Фд) белков-ферментов цикла Кальвина, установление градиента рН в мембранах, восстановление конкурирующих акцепторов (O ₂ , NO ₂ и т.п.)
4	М-Т	Спад и выход на стационарный режим	10...300 с (10...2000 с)	Налаживание реакций цикла Кальвина и потоков веществ по сосудам листка
4,а	М-S ₁	Выход на промежуточный минимум	10...100 с	Налаживание реакций цикла Кальвина
4,б	S ₁ -M ₁ -Т	Выход на стационарный режим	50... 300 с (100...2000 с)	Отладка транспорта веществ через мембраны и по сосудам листка

Интервалы времени могут существенно различаться для разных видов растений и даже для разных листьев одного растения, которые имеют разный возраст или адаптировались к разным условиям освещения (например, растут возле корней или на кроне, на старых ветвях или на молодых побегах, хорошо освещены или все время затенены). Поэтому в графе таблицы "Интервал времени" приведены по два разных варианта значений, – чтобы был ясен диапазон варьирования.

Интенсивность флуоресценции хлорофилла в главном максимуме (точка Р кривой ИФХ) принято обозначать F_R или F_{\max} , а интенсивность в стационарном режиме – F_T . Выход на стационарный режим после второго максимума в точке М может быть монотонным или же проходить еще через один промежуточный минимум в точке S_1 . Для второго случая в табл. 21.1 выделены строки 4,а и 4,б.

Богатые информационные возможности метода ИФХ детально проанализированы в литературе. Они еще более возрастают, когда для исследования, кроме основного источника света, применяют и другие импульсные источники света. В настоящее время индукцию флуоресценции хлорофилла стали понимать в более широком смысле, – как любые изменения интенсивности флуоресценции хлорофилла, вызываемые воздействием внешних факторов.

Ценную дополнительную информацию о процессах фотосинтеза можно также получить, если исследовать их зависимость, например, от температуры или от других факторов, если измерять не только флуоресценцию, но и фосфоресценцию (длительное послесвечение) хлорофилла, а также если дополнить чисто флуоресцентный метод еще и спектральным. В этом случае, например, нацелено возбуждают флуоресценцию отдельных форм хлорофилла светом узкого спектрального интервала и/или измеряют не только интегральную интенсивность флуоресценции, но и интенсивность отдельных ее спектральных составляющих.

Из вышеизложенного вытекает, что *методом ИФХ можно на живом растении, без его повреждения определять ряд важных характеристик*. Это – квантовые выходы фотосинтеза (фактический и потенциально возможный) и тепловой диссипации энергии, оптимальные условия функционирования фотосинтетического аппарата растения, скорость светового повреждения (в результате слишком интенсивного освещения) и самовосстановления фотосинтетических систем, соотношение между концентрациями разных видов фотосистем и т.п..

21.2.4. Влияние внешних факторов на кривую ИФХ

Чтобы продемонстрировать чувствительность кривой ИФХ как индикатора изменения физиологического состояния растений и условий окружающей среды, приведем уже хорошо изученное

экспериментально влияние некоторых внешних факторов на эту кривую.

1. *Повышение температуры внешней среды* относительно оптимального для данного вида растений значения вызывает уменьшение величины $F_V = F_P - F_0$. Причиной является снижение активности электрон-транспортной цепи, т.е. световой стадии фотосинтеза. Исчезает промежуточный пик O-I-D. Наиболее вероятная причина – преобразование части реакционных комплексов фотосистемы *IIa* в комплексы *IIb*.

При возрастании температуры выше жизненно допустимого уровня (выше 45-50 degC) начинает заметно возрастать интенсивность F_0 .

По этим признакам можно, например, быстро (еще не выращивая следующее поколение растений) отбирать сорта и экземпляры растений, более стойкие к жаре.

2. *Снижение температуры внешней среды* относительно оптимального для данного вида растений значения тоже вызывает уменьшение величины $F_V = F_P - F_0$. Причиной является снижение фотохимической активности фотосистемы II. Замедляется рост интенсивности флуоресценции на участке O-I-D-P; возрастает отношение $(F_I - F_0)/F_V$. Причиной является увеличение концентрации так называемых Q_B – невосстанавливающих реакционных центров. Здесь F_I – интенсивность флуоресценции в точке I кривой ИФХ. При повреждении листы холодом исчезает S-M-T максимум, замедляется P-T– спад интенсивности флуоресценции.

По указанным признакам кривой ИФХ можно быстро отбирать более морозостойкие экземпляры и сорта растений.

3. *Засоление почвы* приводит к снижению интенсивностей F_P и F_0 . Наиболее вероятная причина: ускорение миграции поглощенной световой энергии к фотосистемам I. Уменьшается также отношение F_V/F_P , замедляется P-S спад интенсивности флуоресценции. Причина: угнетение активности фотосистем II, торможение транспорта электронов.

По указанным признакам кривой ИФХ теперь можно быстро отбирать растения, более стойкие к засолению почвы.

4. *Водный дефицит* вызывает уменьшение разности интенсивностей $F_V = F_P - F_0$ – примерно пропорционально уменьшению водного потенциала листьев. Наиболее вероятная причина – задержка восстановления первичного акцептора фотосистемы II из-за угнетения выделения кислорода, торможение межсистемного переноса электронов. Замедляется спад интенсивности флуоресценции на участке P-T. Вероятная причина: замедление переноса электронов фотосистемой I. Уменьшается (сглаживается) максимум S-M-T. Причина: заметные изменения в темновом метаболизме, угнетение темновой стадии фотосинтетического процесса.

Совокупность указанных признаков можно использовать для целенаправленного отбора засухоустойчивых сортов и экземпляров растений.

Можно приводить и много других примеров влияния изменения условий внешней среды на ход фотосинтеза в зеленых растениях, служащих причиной изменений в кривых ИФХ. И всё это можно использовать для ускорения селекции нужных сортов растений.

Ботаники установили, что практически всегда можно подобрать виды или сорта растений, в которых кривые ИФХ особенно чувствительны к интересующему нас фактору ухудшения окружающей среды. Периодическое наблюдение ИФХ в них может быть эффективным инструментом для непрерывного мониторинга состояния окружающей среды, особенно в т.н. "зонах риска". С помощью соответствующих водорослей, в частности, можно надежно выявлять ухудшение или подтверждать улучшение состояния акваторий (озёр, болот, каналов, рек, морей).

21.3. Хронофлуорометры

Сенсоры, которые позволяют отслеживать зависимость интенсивности флуоресценции от времени, называют хронофлуорометрами (от греческого "хронос" – время). Когда еще не было микрокомпьютеров, для лабораторных исследований быстрой и медленной фаз ИФХ использовали стационарные приборы: для записи быстрой фазы применяли осциллографы, а для регистрации медленной фазы –

самописцы. Это было громоздкое стационарное оборудование, не приспособленное для использования в полевых условиях. Наличие микрокомпьютера в интеллектуальных сенсорах существенно улучшило ситуацию и позволило проводить исследования и в поле, а также выполнять измерения интенсивности флуоресценции через любые заданные переменные промежутки времени, т.е. регистрировать кривую ИФХ в любой наперед заданной шкале времени.

21.3.1. Хронофлуорометр "ИФХ-1"

Один из первых интеллектуальных сенсоров-хронофлуорометров под названием "ИФХ-1" был создан в 1994 г. в Институте кибернетики им. В. М. Глушкова НАН Украины под руководством А. А. Снегура. Функциональная схема этого портативного хронофлуорометра показана на рис. 21.2. В его состав входили:

- выносной оптоэлектронный датчик ("прищепка"), в одной "щечке" которого располагался миниатюрный источник света и механическая шторка, а во вторую – фототранзистор со светофильтром; между ними вставлялся живой зеленый листок растения;

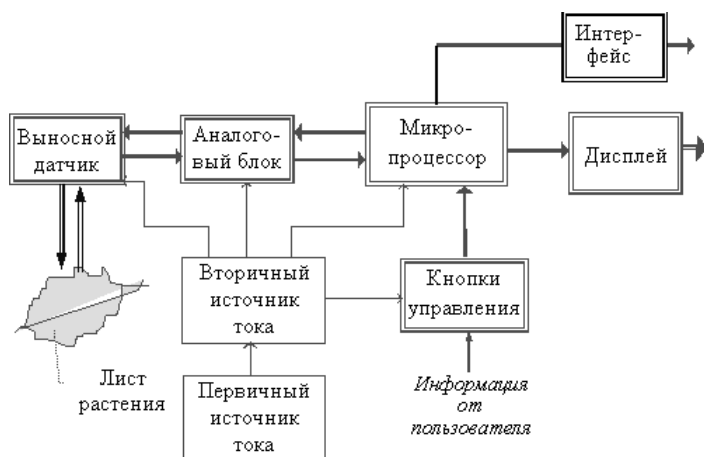


Рис. 21.2. Функциональная схема сенсора – хронофлуорометра "ИФХ-1"

- аналоговый блок, который усиливал и обрабатывал электрические сигналы от фотодетектора и превращал их в цифровую форму;
- микропроцессор, который управлял всей работой сенсора, в цифровой форме обрабатывал, накапливал полученную информацию, переводил ее в удобную для пользователей форму, вычислял значения диагностических величин;
- интерфейс RS232, через который полученная информация могла передаваться в персональный (профессиональный) компьютер для накопления и длительного хранения, дальнейшей обработки;
- дисплей – цифровой индикатор, на который выводили результаты измерений и обработки данных, другую информацию для пользователя;
- кнопки управления, с помощью которых пользователь мог выбрать нужный ему режим работы и управлять работой сенсора;
- первичный и вторичный источники электрического тока, обеспечивавшие автономное питание прибора в полевых условиях.

Первичным источником тока была аккумуляторная батарея. Вторичный источник вырабатывал все необходимые для работы сенсора номиналы питания.

Выносной оптоэлектронный датчик, благодаря установленной на его оси пружине, мог раскрываться и закрываться как прищепка. Когда листок, прошедший темновую адаптацию, вставляли между щечками, то автоматически включался переключатель и шторка отходила. На листок начинал действовать активный сине-голубой свет, выделяемый с помощью соответствующего светофильтра, и одновременно замыкалась контактная пара. По этому сигналу в микропроцессоре запускались таймер, отсчитывающий время от начала освещения, и микропрограмма измерения интенсивности флуоресценции хлорофилла. Сине-голубой свет полностью поглощался красным светофильтром. Поэтому на фототранзистор попадало лишь красное излучение флуоресценции хлорофилла. Фототранзистор превращал его в пропорциональный электрический сигнал, который через гибкий кабель передавался в основной корпус сенсора, там усиливался в аналоговом блоке и превращался в цифровой код. Последний передавался в микропроцессор, где обрабатывался и

запоминался. Отсчет и запоминание интенсивности флуоресценции производились по командам от микропроцессора в наперед заданные моменты времени.

На рис. 21.3 изображены спектр флуоресценции хлорофилла и спектральные характеристики светофильтров. Рисунок объясняет, как именно происходит спектральная фильтрация полезного, но слабого (меньше 0,1% от интенсивности возбуждающего света) сигнала флуоресценции.

Уже в первые образцы сенсора "ИФХ-1" была заложена нелинейная шкала времени, пропорциональная корню 8-й степени от времени, заданного в миллисекундах. Она была подобрана экспериментально и оказалась довольно удобной для пользования, поэтому была сохранена и в последующих модификациях этого хронофлуорометра.

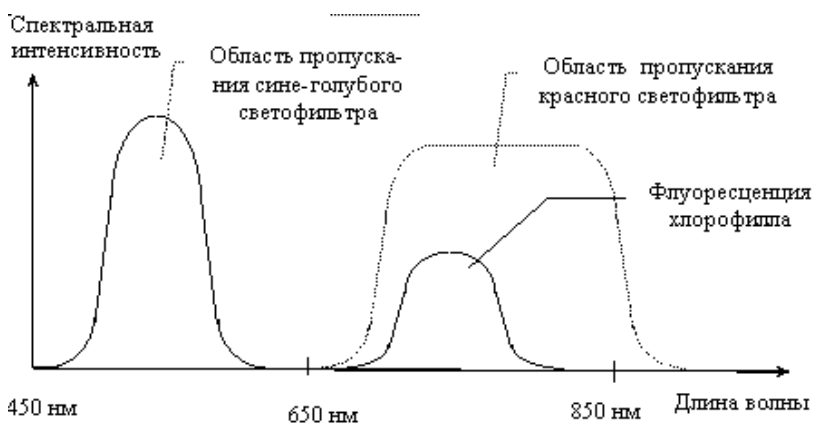


Рис. 21.3. Спектральные характеристики светофильтров и флуоресценции хлорофилла

21.3.2. Хронофлуорометр "Флоратест-1"

После успешных предварительных испытаний сенсора в Институте садоводства Аграрной академии наук Украины конструкция этого сенсора была усовершенствована, и вместе с научно-производственной фирмой "РОСТ" была выпущена исследовательская (12 экз.) партия

хронофлуорометров под названием "Флоратест-1". Внешний вид этого сенсора показан на рис. 21.4.

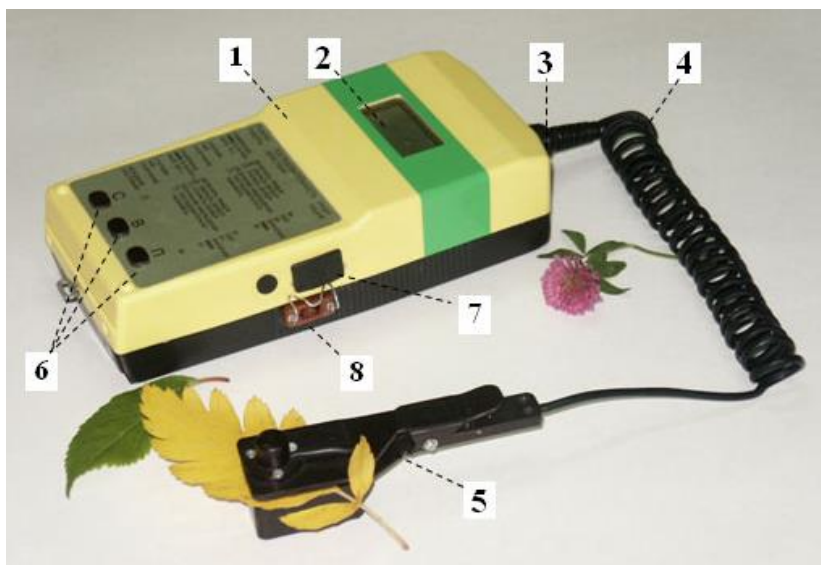


Рис. 21.4. Внешний вид хронофлуорометра "Флоратест-1": 1 – корпус прибора; 2 – жидкокристаллический индикатор; 3 – разъем; 4 – соединительный кабель; 5 – выносной оптический датчик; 6 – кнопки управления; 7 – выключатель / выключатель питания; 8 – разъем внешнего питания сенсора

Он состоял из базового блока 1 размерами 168x95x30 мм и выносного оптоэлектронного датчика 5, который через разъем 3 и кабель 4 контактировал с базовым блоком. На рис. 21.4 обозначены также окно жидкокристаллического индикатора 2, кнопки управления 6, выключатель 7 и разъем 8 для подключения внешнего питания. На лицевой стороне корпуса были размещены указания относительно порядка работы (возможные режимы, последовательность действий). Корпус имел отдельный отсек для аккумуляторов. Компоненты электронного блока (микропроцессор, микросхемы памяти, преобразователь входных сигналов, ЖК индикатор, кнопки управления и т.п.) размещались на печатной плате, которая крепилась в корпусе. Для длительной эксплуатации сенсора непосредственно в поле было предусмотрено его питание от блока солнечных батарей.

Сенсоры-хронофлуорометры "Флоратест-1" успешно использовались для экспериментальных исследований в Институте садоводства, в Никитском ботаническом саду, в Институте земледелия Аграрной АН Украины, в нескольких тепличных хозяйствах. Весьма полезным оказалось использование сенсора для проведения ряда лабораторных работ по физиологии растений в учебном процессе биологического факультета Киевского национального университета им. Тараса Шевченко, а также в Национальном аграрном университете Украины.

Одним из эффективных применений хронофлуорометра оказалась оптимизация расхода гербицидов при весенней обработке полей. Действие многих гербицидов основано на том, что они необратимо угнетают фотосинтетический аппарат растений. Сорняки, прорастающие раньше культурных растений, после обработки гербицидами погибают. А культурные растения, прорастающие позже сорняков, этой участи избегают. Производители гербицидов указывают в своих рекомендациях нормы расхода гербицидов, наверняка гарантирующие гибель сорняков. Как правило, эти нормы весьма завышены по сравнению с реальной потребностью. С помощью хронофлуорометра за считанные минуты можно точно определить, насколько повредился в результате обработки фотосинтетический аппарат сорняков. Благодаря этому, на конкретном поле можно предварительно обработать гербицидами только несколько небольших участков – каждый со своей дозой расхода гербицидов. И уже через несколько часов, необходимых для проникновения гербицидов в листья растений, с помощью хронофлуорометра можно быстро установить, какая дозировка гербицидов является оптимальной для данного конкретного поля. Как правило, это давало существенную (в среднем двукратную) экономию дорогостоящих гербицидов и существенно уменьшало вредное содержание этих веществ в почве, в выращенных на этом поле продуктах, в осадочных стоках с этих полей в реки. Отметим и такой примечательный факт: разработчики предложили фирмам, продающим гербициды, использовать у себя хронофлуорометр для объективной проверки и доказательства высокого качества предлагаемых покупателям гербицидов. Некоторые из них сначала заинтересовались, но потом сообразили, что применение такого сенсора потребителями приведет к существенному уменьшению объемов закупок гербицидов и к уменьшению их прибылей. И сделали все для того, чтобы затруднить продвижение таких сенсоров в производство.

В тепличных хозяйствах применение хронофлуорометра позволило оптимизировать расходы на подогрев, освещение и увлажнение теплиц в зимнее время. Оказалось возможным использовать не предписанные, а выбирать оптимальные для конкретной посадки дозы химреактивов при обработках растений против плесени и др. заболеваний, подбирать оптимальные дозы применяемых удобрений и т.д.

21.3.3. Хронофлуорометр "Флоратест-2"

Когда в широкую продажу поступили яркие светодиоды, то появилась возможность и была осуществлена разработка усовершенствованного образца хронофлуорометра. При этом были устранены все недостатки хронофлуорометра "Флоратест-1", выявленные за время исследовательской эксплуатации этих сенсоров:

- сравнительно низкий уровень квантовой интенсивности возбуждающего света в 20...40 мкмоль/(м²с);
- наблюдение флуоресценции только на просвет, что делало невозможным исследование толстых листьев растений;
- инерционность и недостаточная надежность механической шторки;
- ограниченная точность, малая внутренняя память и недостаточная эксплуатационная надежность всего сенсора;
- отсутствие автоматической адаптации сенсора к изменению видов растений, возраста листьев, условий освещения и т.п.

В табл. 21.2 приведены светотехнические параметры ярких и суперярких светодиодов и полупроводниковых лазеров начала XXI в., которые излучают нужный в данном случае ("актиничный") синеголубой свет. Следует также заметить, что диапазон силы света можно регулировать, изменяя силу тока через светодиод.

Таблица 21.2. Светотехнические параметры светодиодов и полупроводниковых лазеров

№ п/п	Тип	Длина волны [нм]	Сила света (при 20 ма) [миликандел]	Расчетная мощность [мВт]	Телесный угол излучения [стерадиан]
1	2	3	4	5	6

1	L0494 PBL 4-BOG	465...475	145...550	0,23...0,58	1,13
2	L0574 PBL 4-BOG	465...475	200...550	0,37...1,02	1,28
3	КИПМ 15Г (Н,Р,Р,С) 30-1С-П1	470	700...3500	0,47...2,35	0,46
4	HLMP–PB _{xx} /HLMP–5B _{xx}	470	20...270	0,04...0,53	1,355
5	HLMP–AB _{xx} /HLMP–BB _{xx}	472	≥205	≥1,46	0,795
6	HLMP-AB01/AB11/BB01/BB11	472	400	0,58	0,79
7	КИПД 40Л (М,Н,П,Р,С) 20-1С-П4	475	500...3000	0,26...1,53	0,35
8	NSPB 346 BS	475	200...860	0,37...1,6	1,2
9	NSPB 546 BS	475	300...860	0,58...1,5	1,2
10	HLMP – CB 15	475	630...1575	0,2...0,5	0,22
11	HLMP – CB 30	475	560	0,38	0,46

В портативном хронофлуорометре вполне приемлемо освещать на поверхности листка круг площадью до 20 мм² (диаметр до 5 мм). Чтобы получить квантовую интенсивность 20...500 мкмоль/(м²с), что эквивалентно энергетическому потоку 5...120 Вт/м², на этот круг должен падать световой поток мощностью 0,1...2,4 мВт. В зависимости от вида источника света и от оптической схемы на исследуемый листок растения можно направить от 5 до 80% светового потока, излучаемого источником. Круг площадью 20 мм² на расстоянии 5 мм от светодиода виден под телесным углом 0,8 стерадиана. Расчеты показывают, что эти условия могут быть выполнены с применением нескольких типов светодиодов.

Конструкция выносной оптоэлектронной головки нового поколения хронофлуорометров показана на рис. 21.5.

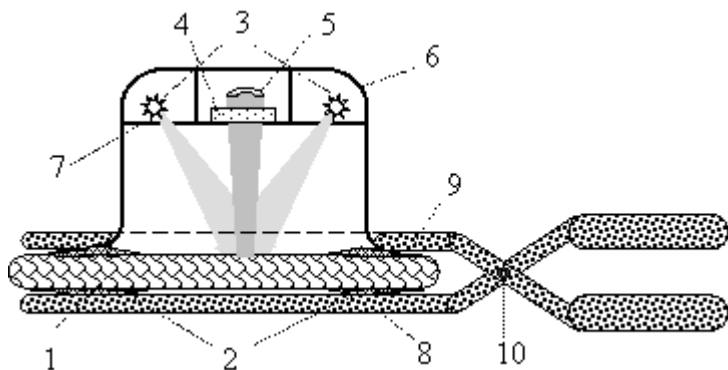


Рис. 21.5. Конструкция оптоэлектронной головки: 1 – листок растения; 2 – мягкие черные прокладки; 3 – светодиоды; 4 – красный светофильтр; 5 – фотоприемник; 6 – крышка; 7 – диафрагма; 8 и 9 – нижняя и верхняя "щечки"; 10 – ось с пружиной

В головке применена пара ярких светодиодов. Их малоинерционность (задержка излучения после подачи тока меньше 0,1 мс) позволила обойтись без механической шторки. Исчезла необходимость в применении сине-голубого светофильтра. Фотоприемник 5 размещен посередине между светодиодами с той же самой стороны листка. Поэтому флуоресценция хлорофилла наблюдается "на отражение", что позволяет работать и с толстыми листьями растений. Чтобы сделать невозможным попадание на фотоприемник возбуждающего света от светодиодов, и для селекции слабых сигналов флуоресценции перед фотоприемником установлен красный светофильтр, а сам фотоприемник отделен непроницаемыми для света перегородками.

Фотография хронофлуорометра "Флоратест-2" с открытой верхней крышкой показана на рис. 21.6. Здесь 1 и 2 – основа и крышка корпуса; 3 – матричный дисплей; 4 – кнопка включения прибора; 5 – кнопка выбора режима "меню"; 6 – кнопка ввода; 7 – кнопка "Пуск"; 8 – печатная плата с компонентами электрической схемы; 9 – выносная оптоэлектронная головка; 10 – разъем для ее подключения; 11 – внешний интерфейс USB; 12 – аккумуляторная батарея питания; 13 – разъем интерфейса. В его встроенной памяти можно накапливать

множество данных измерений и потом передавать их в сеть связи или в персональный компьютер.

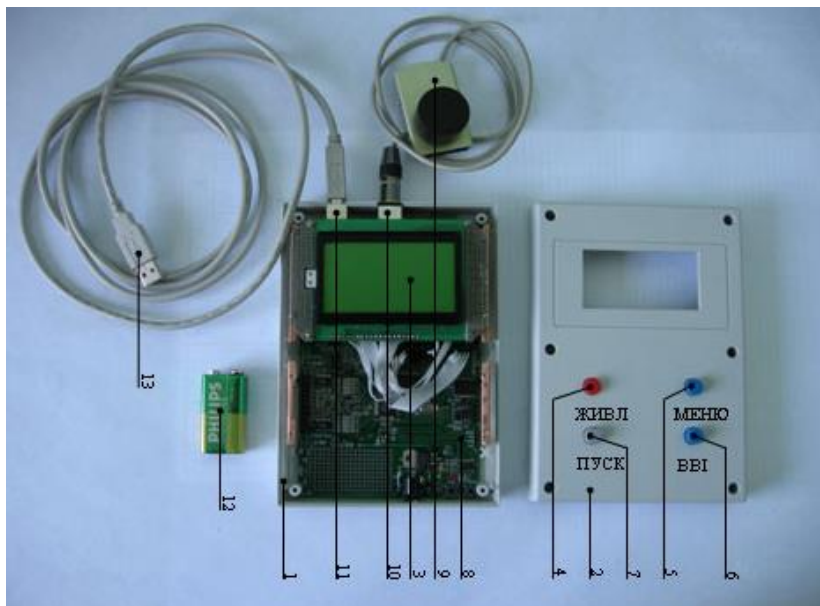


Рис. 21.6. Внешний вид хронофлуорометра "Флоратест-2"

Еще больше информации о фотосинтетическом процессе, физиологическом состоянии растения, о состоянии окружающей среды можно получить, наблюдая так называемую "модулированную" флуоресценцию хлорофилла.

Оптическая схема хронофлуорометра с модуляцией показана на рис. 21.7.

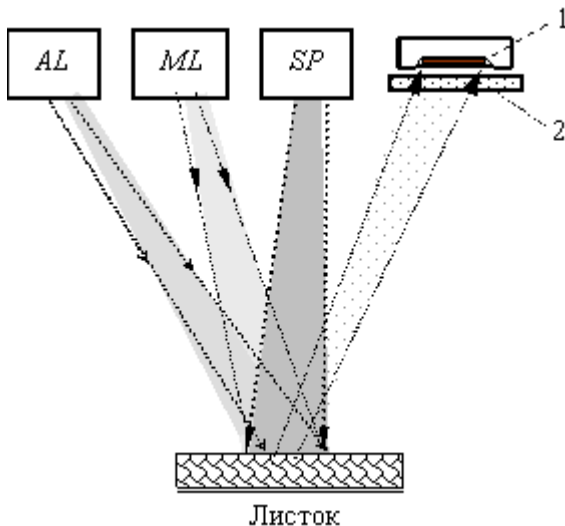


Рис. 21.7. Оптическая схема хронофлуорометра с модуляцией света: AL – источник непрерывно "действующего" облучения; ML – источник слабого модулированного "измерительного" света; SP – источник импульсов "насыщающего" света; 1 – фотодетектор; 2 – светофильтр

Здесь: *AL* (actinic light) – источник непрерывного актиничного освещения с квантовой интенсивностью 20...500 мкмоль/(м²с), которое стимулирует и поддерживает процесс фотосинтеза в листке растения;

ML (measuring light) – источник слабого "измерительного" света, модулированного с частотой 2...600 кГц. Его квантовая интенсивность на поверхности листка 0,2...1 мкмоль/(м²с), которая на 2 порядка меньше интенсивности актиничного света, не вызывает существенных изменений состояния фотосинтетических систем, но позволяет проводить достаточно точные измерения. При этом выделяются, детектируются и измеряются только синхронные импульсные изменения интенсивности флуоресценции;

SP (saturation pulses) – вспышки "насыщающего" света продолжительностью 0,5...2 с с квантовой интенсивностью не менее 2000 мкмоль/(м²с), которые быстро закрывают (насыщают) практически все каналы оттока электронных возбуждений на

фотосинтез. При этом энергия поглощенного света идет только на флуоресценцию или на тепловую диссипацию.

Источником непрерывно действующего света может быть и естественное внешнее освещение листьев растений, например, солнечное. Тогда процесс фотосинтеза исследуется в его естественном (стационарном) протекании. Источниками "измерительного" и "насыщающего" света управляет микрокомпьютер, входящий в состав модулируемого хронофлуорометра. Он включает и выключает их в соответствии с заданным пользователем алгоритмом, что предоставляет специалистам по физиологии растений широкие возможности для разнообразных исследований.

Если к описанной оптической схеме добавляют источник красного света, который активирует только фотосистемы I, то прибор позволяет нацелено изучать фотохимические процессы, которые происходят именно в этих фотосистемах. Еще больше информации можно получить, если вместо одного фотодетектора и светофильтра использовать два комплекта, каждый из которых измеряет свою спектральную составляющую флуоресценции.

Встроенный микрокомпьютер может не только управлять модуляцией излучения, включением/выключением дополнительных источников света, но и организовывать сложные эксперименты, например, с изменением температуры листочка, его увлажнением и т.д.

21.4. Обзор выпускаемых марок хронофлуорометров

В табл. 21.3 приведены данные об интеллектуальных сенсорах-хронофлуорометрах, выпускаемых сейчас для наблюдения и изучения процессов фотосинтеза.

Как видим, наиболее широкий выбор хронофлуорометров для исследований ИФХ предлагает ныне американская фирма Opti-Sciences. Фотографии этих интеллектуальных сенсоров показаны на рис. 21.8.

Наибольшим спросом в США пользуется хронофлуорометр OS5-FL, обеспечивающий наиболее широкие возможности. Источником действующего света регулируемой интенсивности является в нем

твердотельный лазер с длиной волны излучения 685 нм.
Модулированный "измерительный" свет излучает светодиод с узкополосным светофильтром на 690 нм.

Таблица 21.3. Выпускаемые марки хронофлуорометров

Название сенсора	Марка	Фирма-производитель
Портативный флуорометр хлорофилла (Portable Chlorophyll Fluorometer)	PAM-2100, MINI-PAM	Heinz Walz Gmb (ФРГ) http://www.walz.com/chloro.htm
Модулированный флуорометр хлорофилла (Modulated Chlorophyll Fluorometer)	OS5-FL	Opti-Sciences (США) http://www.optisci.com/os5fl.htm
Флуорометр хлорофилла (Chlorophyll Fluorometer)	OS30	Opti-Sciences (США) http://www.optisci.com/os30.htm
Модулированный флуорометр (Modulated Fluorometer)	OS1FL	Opti-Sciences (США) http://www.optisci.com/os1fl.htm
Флуорометр для водорослей (Algae Fluorometer)	AFM	Opti-Sciences (США) http://www.optisci.com/afm.htm
Полевой флуорометр (Field Fluorometer)	GFL-1	Opti-Sciences (США) http://www.optisci.com/gfl1.htm
Волоконно-оптический флуорометр (Fiber-Optic Fluorometer)	GFP-Meter	Opti-Sciences (США) http://www.optisci.com/gpf.htm
Флуорометр хлорофилла (Chlorophyll Fluorometer)	UV-A-PAM	Gademann Instruments Gmb
Хронофлуорометр	"Флоратест-	Институт кибернетики им. В. М.

хлорофилла

2"

Глушкова НАН Украины

При желании вместе с хронофлуорометром OS5-FL можно приобрести также источник модулированного "измерительного" света с длиной волны 450 нм. Импульсы "насыщающего" света регулируемой интенсивности дает 35-ваттная галогенная лампа тоже с узкополосным светофильтром на 690 нм. Для более тщательных опытов имеется также источник далекого красного (far-red) света с фильтром на 735 нм. Такой свет в период темновой адаптации способствует эффективному окислению пула пластохинонов, что позволяет корректно определить минимальный сигнал флуоресценции F_0 . Перед *p-i-n* фотодиодом, который воспринимает флуоресценцию хлорофилла, установлен светофильтр, пропускающий лишь спектральную полосу от 700 до 750 нм. Частота модуляции может программно изменяться в ходе работы от 250 Гц до 40 кГц. Измерение интенсивности флуоресценции может осуществляться с интервалами времени от 0,2 мс до 2 с, которые тоже задаются программно. Продолжительность записи хронофлуорограмм – от 2 секунд до 45 мин. (по желанию – до 16 ч.). Объем памяти данных – 512 кбайт. Сенсор имеет ЖК дисплей 320x240 пикселей с подсветкой и 9 клавиш для взаимодействия с пользователем. В сенсор встроены источник автономного питания – аккумуляторная батарея на 12 В / 3,4 А-ч.



Рис. 21.8. Флуорометры для исследования ИФХ фирмы Opti-Sciences (США)

К сенсору OS5-FL можно приобрести такие аксессуары, как специальные кюветы для темновой адаптации, термостабилизации и для опытов с изменением температуры, кюветы для работы с водорослями и другие. В сенсор встроен привод 3,5-дюймовой дискеты, на которую можно переписывать полученные данные. Имеется внешний интерфейс RS-232. Размеры этого интеллектуального сенсора довольно значительны 280x180x130 мм, масса – 5 кг. Тем не менее, его относят к группе портативных.

Наименьшим, простейшим, наиболее дешевым и доступным является хронофлуорометр OS 30, во многом аналогичный описанному выше хронофлуорометру "Флоратест-1". Его размеры 190x100x50 мм, масса – 0,5 кг. В нем имеется лишь источник непрерывного света, который включается после периода темновой адаптации листка. ИФХ может регистрироваться с интервалами времени от 5 мкс до 0,1 с, которые задаются программно. Продолжительность отслеживания кривой ИФХ

– от 2 с до 240 с. Память данных на 128 кбайт позволяет сохранять результаты до 4096 отсчетов.

Промежуточные характеристики имеет хронофлуорометр хлорофилла OS1-FL. По размерам (190x110x70 мм), он не намного больше хронофлуорометра OS 30, но масса его значительно больше, – 2 кг. Источник света и фотоприемник со светофильтром такие же, как и в OS5-FL. Однако нет источника действующего света, который должен приобретаться отдельно. Отсчеты интенсивности флуоресценции могут осуществляться с интервалами от 0,1 мс до 0,1 с, продолжительность наблюдения ИФХ – от 2 с до 45 мин.

Хронофлуорометр для водорослей AFM позволяет исследовать даже ИФХ микроводорослей. Он рассчитан на работу в паре с хронофлуорометром OS5-FL, с которым соединяется кабелем. Кроме параметров ИФХ, он позволяет дополнительно измерять еще и концентрацию микроводорослей в воде. Выпускается в виде стандартной и т.н. "ксеноновой" моделей. Сам хронофлуорометр OS5-FL с кюветой для водорослей позволяет исследовать ИФХ водорослей в концентрациях от 100 мкг/л. Стандартная модель AFM позволяет работать с водорослями, начиная уже от концентрации 10 мкг/л, а в паре с "ксеноновой" моделью – даже начиная от концентрации 0,1 мкг/л. В "ксеноновой" модели источником действующего света служит ксеноновая лампа с максимумом излучения на длине волны 450 нм, свет которой концентрируется на площади 1 см² боковой поверхности стандартной стеклянной кюветы с внутренним объемом 3 мл.

Волоконно-оптический хронофлуорометр GFP-Meter имеет набор светофильтров, позволяющих измерять флуоресценцию не только хлорофилла, но и родамина, флуоресцеина, ряда протеинов. Аналогичные возможности имеет и флуорометр GFL-1, который пригоден для работы в самых жестких полевых условиях.

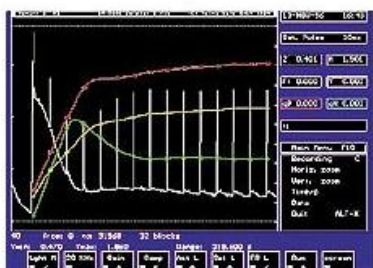
Наиболее популярный сейчас в Европе хронофлуорометр PAM-2100 фирмы Heinz Walz с основным блоком размерами 240x105x110 мм показан на рис. 21.9.



а



б



в



г

Рис. 21.9. Флуорометр РАМ-2100 немецкой фирмы Heinz Walz: а) основной блок, подставка, выносная головка, листок растения; б) флуорометр в действии; в) примеры хронофлуорограмм; г) увеличенное изображение подставки с галогенной лампой в действии

Источниками действующего (*AL*) и насыщающего (*SP*) света в нем служат матрицы светодиодов с длинами волн 655 нм и 735 нм (последние – для возбуждения фотосистем I) и миниатюрная галогенная лампа белого света. Эти источники света крепятся на специальной подставке. Измерительный модулированный свет излучается светодиодами на длине волны 655 нм в виде импульсов продолжительностью 3 мкс с частотой 600 Гц или 20 кГц. Амплитуда этих импульсов незначительна и практически не влияет на фотосинтетическую систему, но она достаточна для измерения индуцированных изменений интенсивности флуоресценции даже при прямом солнечном свете.

В памяти программ сенсора записаны программы стандартных экспериментов по индукции флуоресценции хлорофилла. Предусмотрена возможность для пользователей программировать свои

варианты экспериментов, которые автоматически будет выполнять микропроцессор после нажатия клавиши "Пуск".

Флуорометр UV-A-PAM (рис. 21.10) отличается тем, что имеет в своем составе дополнительный светодиод, излучающий ближний ультрафиолетовый свет (UV-A) с длиной волны 375 нм.



Рис. 21.10. Хронофлуорометр UV-A-PAM-2100 фирмы Gademann Instruments GmbH

Такой свет поглощается в основном защитными пигментами (флавоноидами и др.), которые концентрируются преимущественно в эпидермисе листьев и защищают их внутренние структуры от значительных радиационных повреждений ультрафиолетовым излучением. Измеряя отношение интенсивностей флуоресценции

хлорофилла при возбуждении ультрафиолетовым и при возбуждении сине-голубым светом, флуорометр рассчитывает концентрацию защитных пигментов, которая позволяет оценить стойкость растения против радиационных повреждений.

Краткие итоги

Большие возможности получения информации об окружающих объектах и процессах предоставляет явление люминесценции – вызванное каким-то возбуждающим фактором избыточное (по сравнению с тепловым) излучение тел, которое запаздывает относительно возбуждения на время, значительно больше периода световых колебаний. В зависимости от природы возбуждающего люминесценцию фактора различают биолюминесценцию, катодо-, рентгено-, фото-, хеми-, электролюминесценцию и т.д. И каждый из этих видов может быть использован для построения люминесцентных сенсоров. По времени задержки люминесценции относительно возбуждения различают такие ее виды, как флуоресценция (с малым временем задержки) и фосфоресценция (длительное послесвечение с временем задержки больше 1 с). Ценную информацию об объекте наблюдения могут дать изменения интенсивности люминесценции, её задержки относительно возбуждения, изменения её спектрального состава.

Одним из важных для практики примеров применения люминесценции в интеллектуальных сенсорах является метод индукции флуоресценции хлорофилла (ИФХ). В силу того, что биохимические реакции фотосинтеза и флуоресценция хлорофилла являются конкурирующими каналами утилизации собранной путем поглощения света и доставленной к реакционным центрам фотосинтеза энергии возбуждения, наблюдения за интенсивностью флуоресценции хлорофилла дают важную информацию о состоянии фотосинтетического аппарата растений и о протекающих в нем процессах. Если фотосинтез тормозится, угнетается какими-то факторами, тогда возрастает интенсивность флуоресценции хлорофилла. По расположению обнаруживаемых изменений на т.н. "кривой ИФХ" можно определить, каким именно звеном многостадийного процесса фотосинтеза обусловлены эти изменения. Особенно важно то, что изменения фотосинтеза с помощью метода ИФХ можно обнаружить задолго до того, как изменится внешний вид растения. Благодаря этому еще на ранней стадии можно выявить

заболевания растений, ухудшение состояния окружающей среды и своевременно помочь растениям, проведя соответствующие агротехнические мероприятия (увлажнение, подкормку, обработку против болезней и т.п.). Косвенно, обнаруживая изменения в фотосинтезе соответствующих растений, метод ИФХ позволяет контролировать состояние окружающей среды, выявлять экологическое неблагополучие.

Сенсоры, которые позволяют отслеживать зависимость интенсивности флуоресценции от времени, называют хронофлуорометрами. Первые портативные интеллектуальные хронофлуорометры для наблюдения кривых ИФХ были созданы еще в середине 90-х г.г. XX в. Сначала это были сравнительно простые сенсоры без модуляции света. Теперь уже созданы, промышленно выпускаются и достаточно широко применяются более сложные и эффективные хронофлуорометры, в которых используются и модуляция света, и облучение исследуемого листка растения импульсами "насыщающего" света, и изменения его температуры, влажности, освещение "далёким инфракрасным" или ультрафиолетовым светом и т.д. В научно-исследовательских учреждениях с помощью хронофлуорометров сейчас активно изучают закономерности и особенности процессов фотосинтеза в разных растениях. Селекционерам хронофлуорометры позволяют надежно проводить отбор нужных новых сортов растений. В растениеводстве следят за развитием растений и функционированием их фотосинтетического аппарата, делают прогнозы урожая. При выявлении отклонений можно своевременно провести необходимые агротехнические мероприятия. Перед обработками против вредителей и болезней растений, гербицидами, стимуляторами роста, перед подкормками можно определить реально необходимые и допустимые дозировки гербицидов, пестицидов, химреактивов, удобрений. При выращивании растений в теплицах, особенно в зимнее время, можно оптимизировать затраты на обогрев, освещение, увлажнение, уход за растениями и т.д. Подобрав виды растений, особо чувствительные к ухудшению тех или иных факторов окружающей среды, с помощью хронофлуорометров можно проводить эффективный экологический мониторинг проблемных регионов и водоёмов.

22. Сенсоры с люминесцентными маркерами.

22.1. Сенсор для определения квантового выхода фотосинтеза

Ряд важных характеристик фотосинтеза и, следовательно, общее состояние растения, можно определять, не проводя темновой адаптации листьев и не снимая кривую ИФХ. В частности, это касается определения *квантового выхода фотосинтеза* и квантового выхода флуоресценции хлорофилла при рабочем освещении.

Сначала напомним, что это такое. Пусть на зеленый лист растения падает квантовый световой поток Φ мкмоль/(м²с), из которого $\Phi_{\text{ФС}}$ мкмоль фотонов/(м²с) используются на стимулирование фотохимических реакций фотосинтеза, $\Phi_{\text{Фл}}$ – на флуоресценцию хлорофилла в красной области спектра и Φ_{T} – на тепловую диссипацию без излучения. Тогда величину

$$\varphi_{\text{ФС}} = \Phi_{\text{ФС}} / \Phi \quad (22.1)$$

называют *квантовым выходом фотосинтеза*, величину

$$\varphi_{\text{Фл}} = \Phi_{\text{Фл}} / \Phi \quad (22.2)$$

– *квантовым выходом флуоресценции* хлорофилла, а величину

$$\varphi_{\text{T}} = \Phi_{\text{T}} / \Phi \quad (22.3)$$

– *квантовым выходом тепловой диссипации*. Последний не зависит от интенсивности светового потока Φ , а определяется лишь температурой листьев и внутренней структурой центров фотосинтеза.

Первые 2 квантовых выхода меняются с изменением Φ . Квантовый выход фотосинтеза $\varphi_{\text{ФС}}$ уменьшается при увеличении светового потока Φ , так как с возрастанием светового потока все больше каналов запуска фотосинтеза оказываются занятыми. А когда поток Φ достигает уровня насыщения, то количество фотонов, используемых на стимулирование фотохимических реакций, вообще перестает возрастать. В этих условиях оно определяется лишь максимальной "пропускной способностью" всех фотосистем I и II. Поэтому

зависимость квантового выхода фотосинтеза от потока освещения Φ носит нелинейный характер.

Если при наличии насыщающего света увеличить его квантовую интенсивность на $\Delta\Phi$, то она распределится следующим образом. $(T\Delta\Phi)$ мкмоль фотонов/(m^2c) проходят сквозь листок растения, где T – коэффициент его пропускания, а $\Delta\Phi (1-T)$ поглощаются листком. Из них энергия $\Phi_T\Delta\Phi (1-T)$ мкмоль фотонов/(m^2c) превращается в тепло, а остальные фотоны переизлучаются в виде флуоресценции хлорофилла. Квантовый выход флуоресценции хлорофилла достигает в условиях действия насыщающего света своего максимального значения

$$\Phi_{\text{Фл,Н}} = 1 - T - \Phi_T \quad (22.4)$$

В обычных условиях функционирования растения

$$\Phi_{\text{ФС}} + \Phi_{\text{Фл}} + \Phi_T = 1 - T \quad (22.5)$$

Из формул (22.4) и (22.5) вытекает, что квантовый выход фотосинтеза можно вычислить по формуле

$$\Phi_{\text{ФС}} + \Phi_{\text{Фл,Н}} - \Phi_{\text{Фл}} \quad (22.6)$$

Для этого надо определить квантовый выход $\Phi_{\text{Фл}}$ флуоресценции хлорофилла в условиях обычного ("рабочего") освещения и квантовый выход флуоресценции $\Phi_{\text{Фл,Н}}$ в условиях действия "насыщающего" света.

По этому принципу и действует интеллектуальный сенсор EARS-PPM (Plants Photosynthesis Meter) нидерландской фирмы EARS (рис. 22.1), который измеряет не квантовый выход фотосинтеза по формуле (22.6), а пропорциональную ему величину

$$\Phi_{\text{P}} = 1 - \Phi_{\text{Фл}} / \Phi_{\text{Фл,Н}} = 1 - I_{\text{Фл}} / I_{\text{Фл,Н}} \quad (22.7)$$

где $I_{\text{Фл,Н}}$ и $I_{\text{Фл}}$ – интенсивности флуоресценции, которые измеряются с помощью модулированного измерительного света в условиях насыщающего и обычного рабочего освещения соответственно.



Рис. 22.1. Измеритель эффективности фотосинтеза EARS-PPM нидерландской фирмы EARS. Размеры – 250x53x80 мм, масса – 0,85 кг

Производитель называет ее "квантовой эффективностью фотосинтеза". Нужные измерения сенсор выполняет автоматически менее, чем за 1 мин. Кроме того он может измерять квантовую интенсивность PAR действующего на растение света (PAR – photosynthetic active radiation) в $\mu\text{моль}/(\text{м}^2\text{с})$, которая интересует исследователей, и вычислять величину $P = \varphi_p \times \text{PAR}$, которая характеризует производительность фотосинтеза.

Источником измерительного света в этом сенсоре служит GaAlAs светодиод с максимумом излучения на длине волны 637 нм. С красной стороны его излучение обрезается специальным светофильтром, начиная от 690 нм. Частота модуляции – 7200 или 8900 Гц. В качестве источника насыщающего света используется галогенная лампа на 5000 кандел со светофильтром, отсекающим БИК диапазон спектра излучения. В усилителе-селекторе сигналов применено синхронное детектирование, обеспечивающее высокую селективность на фоне сильного постоянно действующего света и несинхронных помех.

Имеется внешний интерфейс RS232 и внутренняя память на тысячи результатов измерений.

Сенсор выпускается в нескольких модификациях: PPM-MLHD, PPM-100 и PPM-200, отличающихся своими функциональными возможностями и ценой.

22.2. Сенсоры с люминесцентными "маркерами"

В последнем десятилетии XX в. начались интенсивные разработки новой группы люминесцентных сенсоров. Они используют т.н. "люминесцентные маркеры" – специально синтезированные макромолекулы, в состав которых входят два важных функциональных звена (рис. 22.2). Одно из них имеет выраженную люминесцентную активность, т.е. ярко светится под действием возбуждающего света (или иного возбуждающего фактора). Это звено называют *сигнализатор* (англ. *reporter*). Другое звено делают выборочно чувствительным к аналиту – к тому химическому или биохимическому веществу, наличие которого надо обнаружить и определить его концентрацию. Это звено называют *распознаватель* (англ. *recognition element*). Часто с этой целью используют молекулы естественных биохимических ферментов (энзимов). Но используют также и специально синтезированные молекулы-распознаватели.

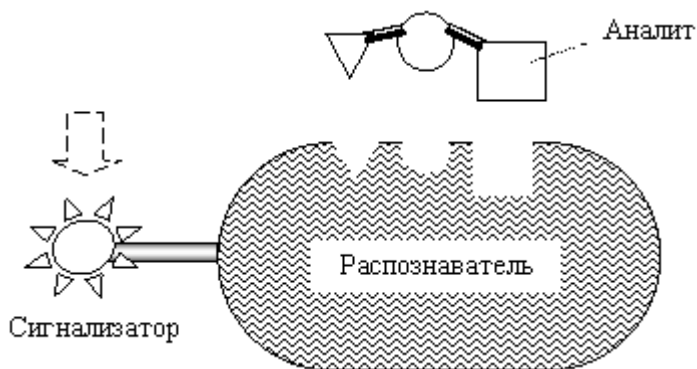


Рис. 22.2. Функциональная схема люминесцентного маркера

В составе макромолекулы эти два звена взаимодействуют так, что, когда к распознавателю присоединяется частица контролируемого

аналита, то это приводит к гашению или, наоборот, – к стимулированию люминесценции сигнализатора. И сенсор, измеряя интенсивность люминесценции, определяет по ее изменениям наличие и концентрацию ананта или характеристики специфического внешнего фактора.

При этом интеллектуальный сенсор, имеющий встроенный микрокомпьютер, обладает тем преимуществом, что легко может учесть нелинейность зависимости интенсивности люминесценции от концентрации ананта, а также влияние фактических изменений температуры, кислотности среды и других факторов, от которых (кроме концентрации ананта) тоже может зависеть интенсивность люминесценции. Наличие внутренней памяти позволяет такому сенсору отследить и сохранять в памяти динамику изменения интенсивности люминесценции, а следовательно, и концентрации ананта со временем. Микрокомпьютер может сделать из этого определенные диагностические выводы, рассчитать кинетические характеристики и сигнализировать о возникновении критических ситуаций.

Авторы работы синтезировали, например, макромолекулы, в которых специфически чувствительное к молекулам воды звено ($[\text{Ru}(\text{phen})_2(\text{dppz})]^{2+}$ –1,10 phenanthroline и dipyrrido [3,2- α :2',3'- c]phenazine) присоединено к сигнализатору – политетрафлуороэтилену. Благодаря такому объединению, интенсивность флуоресценции последнего стала зависимой от относительной влажности окружающего воздуха. Люминесцентный сенсор с использованием этого маркера позволил измерять относительную влажность воздуха в диапазоне от 4 до 100 % (при 20 deg C) с воспроизводимостью лучше $\pm 4\%$. Однако при быстром изменении влажности требуется определенное время для установления нового динамического равновесия. Требуемое время составляет около 1,5 мин. Если пленку с такими макромолекулами-маркерами нанести ("иммобилизовать") на поверхность оптического волокна, то можно получить люминесцентный сенсор для измерения влажности грунта, зерна, сахара и т.п. материалов на заданных глубинах. Для этого зону оптического волокна с нанесенным люминесцентным маркером располагают в заданной точке внутри контролируемой среды (в грунте, в емкости с зерном, сахаром и т.п.). Через один торец в оптическое волокно вводят возбуждающий свет, который, достигая чувствительной поверхности, возбуждает в ней флуоресценцию. А на

другом конце измеряют ее интенсивность. По результатам измерений микрокомпьютер вычисляет влажность контролируемой среды.

В одной из работ речь идет о синтезе макромолекулярного комплекса, выборочно чувствительного к атомам и ионам ртути.

Люминесцентным сигнализатором в нем служит порфирин.

Интенсивность его флуоресценции значительно возрастает после присоединения к комплексу атома ртути. Измерения проводят спустя 15 мин контакта с контролируемой средой. Люминесцентный сенсор с таким маркером имеет избирательную чувствительность к присутствию ртути порядка 25 мкг/л с воспроизводимостью 5-10%.

Еще один пример описан в одной из работ. Он касается быстрого обнаружения присутствия и измерения концентрации органофосфатов, которые входят в состав вредных для здоровья человека инсектицидов и ряда нейротоксинов. В биохимическом маркере для соответствующего люминесцентного сенсора звеном, селективно распознающим наличие органофосфатов, является фермент органофосфатгидролаза (organophosphate hydrolase – ОРН), а люминесцирующим сигнализатором – карбоксинафтофлуоресцеин (carboxynaphthofluorescein – CNF). Люминесцентный сенсор с таким маркером обнаруживает наличие органофосфатов уже при концентрациях до 0,05 мкмоль/л. Количественное измерение концентрации, например, пароксона возможно в диапазоне концентраций от 1 до 800 мкмоль/л.

Научные сотрудники Центра флуоресцентной спектроскопии при университете штата Мериленд (США) разработали пластиковый глюкосенсор, который надо носить как контактную линзу в глазу (см. Интернет-страницу <http://www.medline.ru/mednews/news.phtml?n=134>). На периферию этого пластикового глюкосensors нанесены специально синтезированные макромолекулы-маркеры, которые, взаимодействуя с молекулами глюкозы, становятся способны к флуоресценции. Если осветить этот сенсор синим или фиолетовым светом, то по интенсивности флуоресценции периферийной его части можно определить концентрацию глюкозы в глазной жидкости пациента. А это позволяет судить о средней за прошедшие сутки концентрации глюкозы в его крови.

Можно приводить еще много других примеров, совокупность которых свидетельствует о том, что сенсоры с " люминесцентными маркерами "

могут иметь очень широкий спектр применений и действовать не хуже, чем высокочувствительные и высокоизбирательные естественные сенсоры, которые за миллиарды лет эволюции создала живая природа.

Некоторые исследователи даже разрабатывают на этом принципе "оптический нос" – интеллектуальный сенсор, который будет обнаруживать присутствие в окружающей среде одновременно десятков разных химических веществ и будет различать тысячи запахов. Его основой будет набор (массив, "биочип" – рис. 22.3) из десятков или сотен чувствительных участков, на каждый из которых нанесены свои макромолекулы-маркеры какого-то конкретного химического вещества.

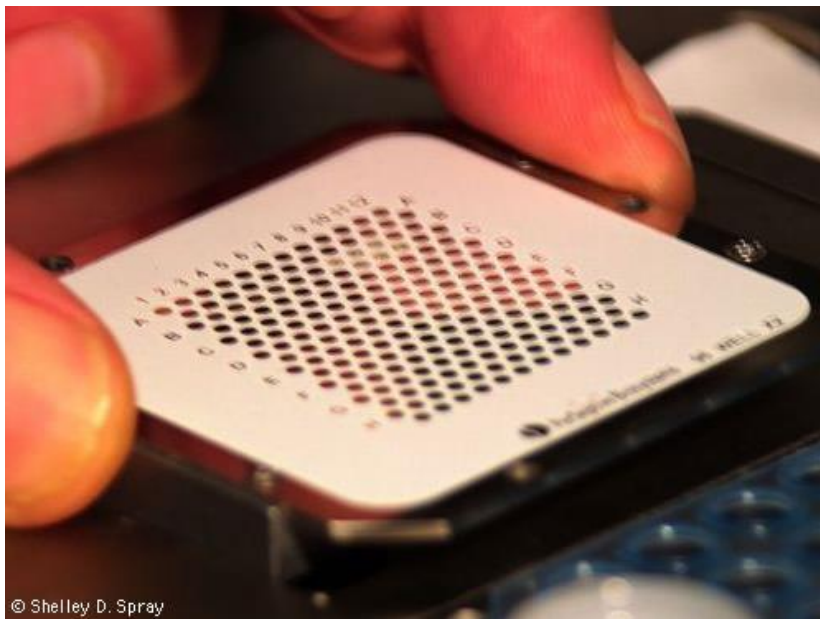


Рис. 22.3. Фотография "биочипа" с люминесцентными маркерами

Один чувствительный участок будет распознавать и позволит измерять, скажем, присутствие и концентрацию кислорода, другой – озона, третий – углекислоты, четвертый – аммиака, пятый – этилового спирта, шестой – метилового спирта и т.д. Распределение интенсивности флуоресценции по поверхности такого "биочипа" будет

отображать "запах" – химический состав окружающей среды. Адресно измеряя интенсивность люминесценции каждого из таких участков и обрабатывая эти данные, микрокомпьютер может выдать информацию о наличии и концентрации всех десятков-сотен контролируемых химических веществ, неусыпно следить за составом газовой среды, давать интерпретацию характерных комбинаций "запахов", предупреждать об опасных ситуациях.

22.3. Биолюминесцентные сенсоры

Иной подход при создании люминесцентных сенсоров состоит в использовании собственной биолюминесценции живых организмов [http://www.modares.ac.ir/sci/saman_h/Pages/Bioluminescence%20; <http://www.lifesci.ucsb.edu/~biolum/>]. В природе обнаружены уже порядка тысячи биолюминесцирующих организмов, большинство из которых обитает в морях. На больших глубинах, куда уже не проникает внешний дневной свет, биолюминесценция оказывается чуть ли не единственным источником света и одним из главных средств коммуникации. Наземных самосветящихся организмов (бактерий, насекомых, "светлячков") намного меньше. Установлено, что за биолюминесценцию ответствен, как правило, белок люцифераза. Для свечения он использует энергию, выделяемую при окислении небольшой органической молекулы – люциферина. Люцифераза служит специфическим катализатором реакции его окисления, и часть освобождающейся при этом энергии излучает в виде биолюминесценции.

В 90-х гг. XX в. ученые стали активно заниматься созданием генно-инженерных конструкций для биолюминесцентных сенсоров. В основу таких конструкций чаще всего положена схема самозащиты клеток, выработанная за миллионы лет эволюции живых организмов (рис. 22.4).

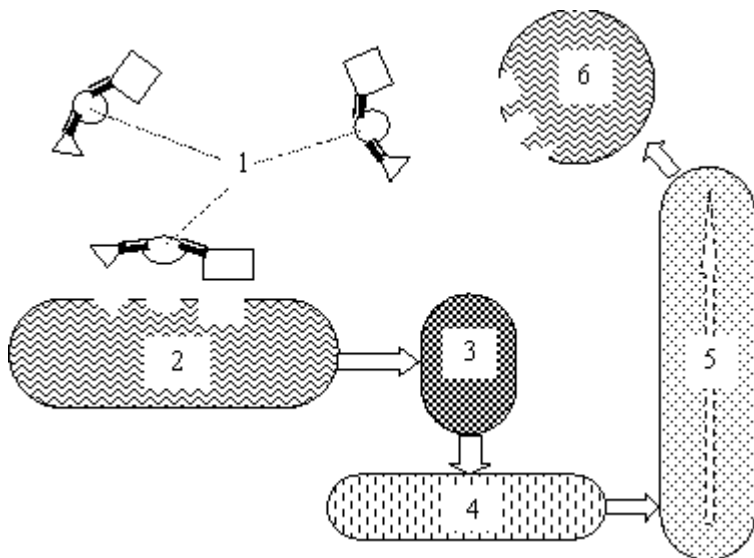


Рис. 22.4. Функциональная схема самозащиты живых клеток: 1 – токсины; 2 – распознаватель; 3 – репрессор; 4 – промотор; 5 – синтезатор; 6 – нейтрализатор

Если в живую клетку проникают "токсины" 1 – объекты, несущие угрозу нормальному функционированию клетки, – то там их ожидает белок-распознаватель 2, своего рода "сторож". Как только он "узнает" опасный токсин, то подает сигнал белку-репрессору 3, который до сих пор блокировал работу белка-промотора 4. Этот последний запускает в работу "синтезатор" – молекулу РНК, на которой синтезируются вещества 5, нейтрализующие токсины 1. Пока токсинов 1 нет, синтез этих веществ не нужен и потому блокируется, чтобы не расходовать понапрасну ресурсы клетки. Часто один и тот же белок одновременно является и распознавателем, и репрессором.

Для того, чтобы по такой схеме создать биолюминесцентный сенсор, в неё надо добавить биолюминесцирующий белок, например, люциферазу, а в качестве "синтезатора" использовать РНК, на которой синтезируются молекулы люциферина. Функциональная схема такого биолюминесцентного сенсора показана на рис. 22.5. Когда в окрестности распознавателя 2 появляются частицы анализата 1, на который "настроен" этот распознаватель, он связывается с такой частицей и сигнализирует об этом репрессору 3. Последний

"освобождает" промотор 4, который запускает в "синтезаторе" 5 синтез люциферина. Появившиеся молекулы люциферина 6 в присутствии люциферазы 7 окисляются, и в результате высвобождающейся энергии возникает биolumинесценция. При отсутствии анализита синтез люциферина блокирован, и клетка не светится. Возможен и противоположный вариант: пока частиц анализита 1 нет, промотор 4 свободен, синтез люциферина идёт, и люциферин постоянно светится. Но как только частицы анализита появляются, распознаватель сигнализирует об этом репрессору, который блокирует работу промотора, синтез люциферина прекращается, и биolumинесценция исчезает.

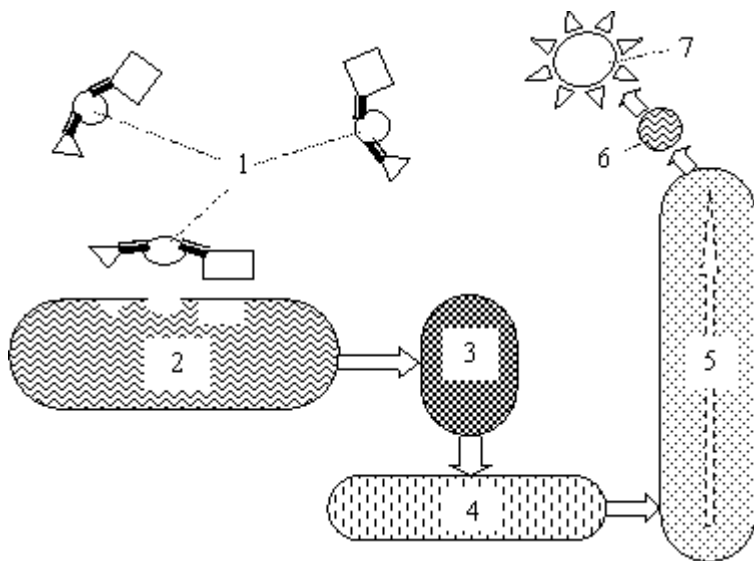


Рис. 22.5. Функциональная схема биolumинесцентного сенсора: 1 – анализит; 2 – распознаватель; 3 – репрессор; 4 – промотор; 5 – синтезатор; 6 – люциферин; 7 – люцифераза

Сейчас уже отработана стандартная процедура создания генно-инженерных конструкций, обеспечивающих воспроизводство подобных биolumинесцентных клеток-сенсоров. Основой для них обычно служит плазмида бактерии *Escherichia coli*. В неё встраивают нужные дополнительные гены, взятые из ДНК соответствующих организмов. Реконструированную ДНК методами генной инженерии "запускают в работу" по производству закодированной в ней клетки. В

результате появляется живая билюминесцентная клетка с требуемыми свойствами. Затем созданные "бактерии-сенсоры" культивируют: наращивают в требуемых количествах в специальных питательных средах.

Например, в ГосНИИ генетики и селекции промышленных микроорганизмов (Москва) создали подобного рода билюминесцентный сенсор, реагирующий на появление мышьяка. Ген для синтеза распознавателя мышьяка взяли у бактерии, у которой он имеется от природы. Люкс-ген взят от наземной светящейся бактерии — *Photobacterium luminescens*, в ДНК которой участки, кодирующие синтез люциферазы и люциферина, расположены рядом, так что их удобно "вырезать". В этом же НИИ таким же методом генной инженерии созданы также билюминесцентные сенсоры, распознающие присутствие солей тяжелых металлов, антибиотиков ампициллинового и тетрациклинового рядов, наличие гептила (ракетного топлива, которое вредно влияет на живые организмы) и т.д.

Интересной находкой стала реализация билюминесцентного сенсора, который обнаруживает появление в организме веществ, посредством которых "согласуют" свои действия болезнетворные бактерии. Появление такого вещества означает, что в организме накопилось достаточно много бактерий, чтобы начать коллективную атаку на организм хозяина. По появлению этого вещества можно зафиксировать начало, "старт" инфекционного заболевания.

По существу каждую из произведенных с помощью генной инженерии специальных бактерий можно считать законченным билюминесцентным сенсором. Ведь в ней есть (см. "От простых сенсоров - к интеллектуальным") и чувствительный элемент ("распознаватель"), и усилитель-селектор сигналов (репрессор, промотор и синтезатор), и сигнализатор (билюминесцирующий белок). Однако этот микроскопический сенсор-клетка мало приспособлен для восприятия его сигналов людьми и макроскопическими приборами. Билюминесценция отдельной белковой молекулы весьма слаба, и её очень трудно заметить на фоне других световых помех. Поэтому обычно используют большое количество (миллионы и миллиарды) таких бактерий. Но даже и их совместное свечение выделять из сторонних световых помех непросто, поскольку оно никак не модулировано. В этом отношении сенсоры с фотолуминесцентными маркерами имеют значительное

преимущество. Ведь возбуждающее облучение в них можно специально модулировать, и точно так же будет модулирован и свет их фотолюминесценции. Благодаря этому слабую фотолюминесценцию можно выделить на фоне даже значительных, но не модулированных или по-иному модулированных помех.

Биолюминесцентный сенсор – это живая клетка. Поэтому в биолюминесцентных сенсорах надо обеспечивать условия для поддержания жизнедеятельности клеток. Люминесцентный маркер – это макромолекула, которая не требует жестких условий жизнеобеспечения. В этом тоже состоит преимущество сенсоров с люминесцентными маркерами. Зато живые клетки биолюминесцентных сенсоров легко размножить в питательных средах. В то время, как макромолекулы люминесцентных маркеров надо синтезировать искусственно.

22.4. Сцинтилляционные сенсоры

Сцинтилляторы — это вещества, излучающие короткие вспышки люминесценции ("сцинтилляции") при пролёте сквозь них частиц ионизирующего излучения (альфа-частиц, гамма-квантов, мюонов, нейтронов, протонов, электронов и т. д.).

Раньше в качестве сцинтилляторов чаще всего использовались неорганические кристаллы. Для увеличения выхода света в такой кристалл вводят специальную примесь – так называемый активатор (или допант). Например, в широко применяемом сцинтилляторе NaI(Tl) в кристаллической решетке иодида натрия содержится активирующая примесь атомов таллия (в концентрации порядка сотых долей процента). Благодаря этому выход люминесценции повышается на порядок. Кроме иодида натрия, активированного таллием, широко используют также ZnS(Ag), CdS(Ag), LiI(Sn), LiI(Eu), CsI(Tl) и др. Имея высокую плотность, неорганические кристаллы хорошо поглощают гамма-излучение, эффективно тормозят быстрые электроны и мюоны, а также очень тяжелые быстрые частицы. И поэтому их применяют, в первую очередь, для детектирования такого ионизирующего излучения.

Во 2-й половине XX в. стали широко использовать также органические сцинтилляторы: антрацен, нафталин, р-терфенил, стильбен и др. Их преимуществом являются гораздо меньшие времена высвечивания –

порядка единиц - десятков наносекунд (у неорганических кристаллов – порядка 250-1000 нс). Зато они в несколько раз уступают активированным неорганическим кристаллам по интенсивности вспышек. Поскольку в состав органических сцинтилляторов входит много атомов водорода, то они эффективно тормозят нейтроны и протоны. Поэтому их применяют, в первую очередь, для детектирования нейтронных и протонных излучений.

Позже на основе органических материалов стали производить жидкие и твердые пластиковые сцинтилляторы. В них в оптимальных пропорциях смешивают несколько компонент с пластификатором – полимеризующимся материалом. По такой технологии можно формировать сцинтилляторы любой геометрической формы и больших размеров (см. рис. 22.6). Например, сцинтилляторы Vicron BC 400...416 американской компании VICRON производятся на основе поливинилтолуола и обладают достаточно хорошими характеристиками: время вспышки ~1 нс, интенсивность вспышек достигает 20-30% от наблюдаемых в NaI(Tl).

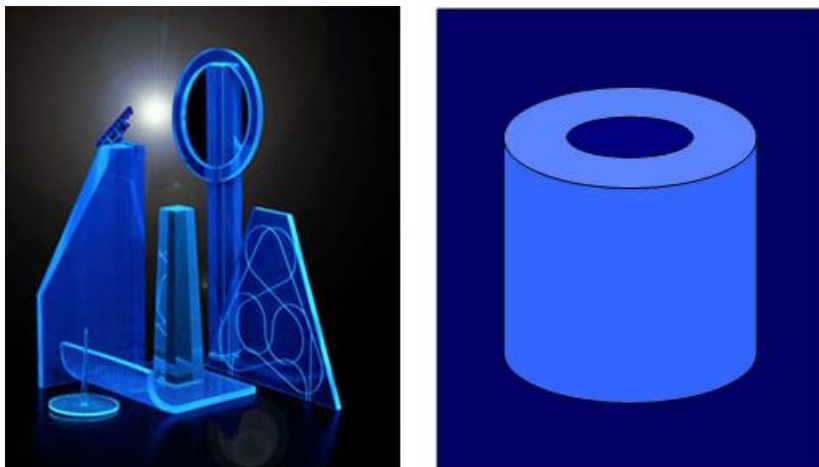


Рис. 22.6. Промышленные пластиковые сцинтилляторы разных форм и размеров

Сенсоры, в которых первичные информационные сигналы имеют вид сцинтилляций, называют сцинтилляционными сенсорами .

Еще из школьного курса физики Вы помните, наверное, опыты по рассеянию альфа-частиц тончайшей золотой фольгой, проведенные в лаборатории Резерфорда и позволившие установить структуру атома. Для подсчета числа частиц, рассеянных на тот или иной угол, там использовались сцинтилляторы из кристаллов сернистого цинка. Подсчет числа сцинтилляций сотрудники лаборатории производили "вручную", предварительно адаптируя свои глаза к темноте. С этого примитивного сцинтилляционного сенсора и начинались вся атомная и ядерная физика.

Сейчас такую работу автоматически, быстро и эффективно выполняют интеллектуальные сенсоры, называемые сцинтилляционными счетчиками или сцинтилляционными детекторами. Принцип работы сцинтилляционного счетчика/детектора раскрывает рис. 22.7.

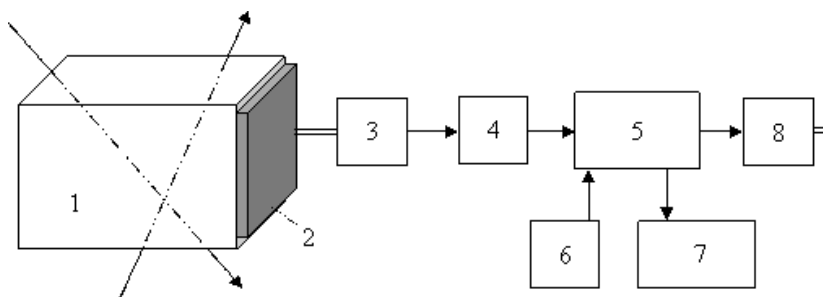


Рис. 22.7. Функциональная схема сцинтилляционного счетчика/детектора: 1 – сцинтиллятор; 2 – фотоприемник; 3 – усилитель; 4 – формирователь счетных импульсов и АЦП; 5 – счетчик или микрокомпьютер; 6 – кнопки (клавиатура) управления; 7 – дисплей; 8 – внешний интерфейс

Штрихпунктирными линиями на нём условно показаны треки пролетающих ионизирующих частиц. Ионизируя атомы сцинтиллятора 1 и возбуждая их электронные оболочки, пролетающие частицы вызывают сцинтилляции. Фотоприёмник 2 преобразует вспышки люминесценции в электрические импульсы, которые усиливаются в электронном усилителе 3. В простейших сцинтилляционных счетчиках электронный узел 4 при поступлении импульса от усилителя формирует счетный импульс. Такие импульсы подсчитываются счетчиком 5. Число импульсов за фиксированный период времени характеризует интенсивность ионизирующего излучения. Значение

интенсивности выводится на дисплей 7. Чем короче вспышка света и чем большее быстродействие имеют фотоприёмник и последующие электронные узлы, тем больше импульсов успевают подсчитать сцинтилляционный счетчик за единицу времени, и тем шире диапазон измеряемых интенсивностей ионизирующего излучения.

В интеллектуальных сцинтилляционных сенсорах, в составе которых имеется микрокомпьютер, появляются многие дополнительные возможности. В первую очередь, это возможность измерять энергетический спектр наблюдаемого ионизирующего излучения. Дело в том, что, чем больше энергия пролетающей сквозь сцинтиллятор частицы, тем больше ионизированных и возбужденных электронных оболочек атомов оставляет она на своем пути. И поэтому тем интенсивней вспышка люминесценции. Таким образом, измеряя интенсивность вспышки, можно (после соответствующей калибровки) приблизительно определить энергию пролетевшей частицы. Для этого в состав электронного узла 4 вводят аналого-цифровой преобразователь (АЦП), формирующий и передающий в микрокомпьютер 5 цифровой код, пропорциональный интенсивности наблюдаемой вспышки. В микрокомпьютере на основе этого цифрового кода каждой зарегистрированной частице ставится в соответствие её энергия. Накапливая в памяти статистику пролетающих частиц и их энергий, микрокомпьютер строит и выводит на дисплей 7 энергетический спектр наблюдаемого излучения, т.е. распределение пролетевших частиц по их энергиям (рис. 22.8).

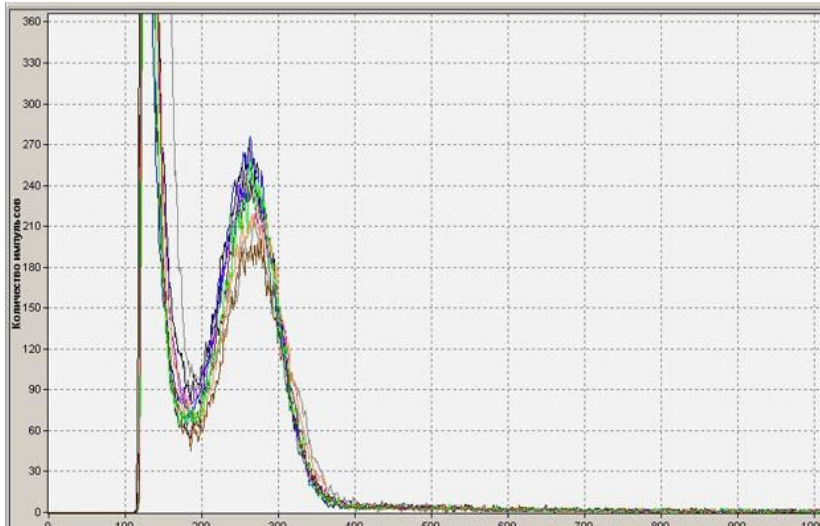


Рис. 22.8. Пример энергетического спектра ионизирующего излучения, наблюдаемого при распаде радиоактивного изотопа америция ^{241}Am

Если в микрокомпьютер заложить соответствующие программы и справочные данные, то во многих случаях по наблюдаемому энергетическому спектру он сможет автоматически идентифицировать природу наблюдаемого источника ионизирующего излучения. Ведь каждый радиоактивный изотоп имеет свой энергетический спектр ионизирующего излучения. Излучение из ускорителей заряженных частиц, из ядерных реакторов разных типов тоже имеет свои характерные энергетические спектры. Микрокомпьютер может автоматически рассортировать различные компоненты ионизирующего излучения по их энергиям или по источникам и выдать интенсивность каждого из них в отдельности.

Введенная в состав сцинтилляционного детектора излучений клавиатура 6 позволит пользователю управлять его работой, задавать масштаб энергетического спектра, диапазон отображаемых энергий, формат выдачи полученных данных. А внешний интерфейс 8 позволяет сцинтилляционному детектору обмениваться данными с внешним компьютером.

Длительное время в качестве фотоприемника в сцинтилляционных детекторах применялись электровакуумные ФЭУ (фотоэлектронные умножители). В последние десятилетия в связи с существенным улучшением характеристик полупроводниковых фотоприёмников они стали постепенно вытеснять ФЭУ. Благодаря этому были созданы гораздо более компактные и надёжные сцинтилляционные детекторы.

В настоящее время они широко применяются не только в физических исследованиях, но и для учета, контроля и охраны, для экологического надзора и противодействия незаконному обороту ядерных материалов и радиоактивных веществ. В качестве примера современных интеллектуальных сцинтилляционных сенсоров укажем на транспортный радиационный монитор КСАР1У.041 и радиационный монитор-идентификатор ИР-560 производства российского Научно-технического центра ЯФИ ("Ядерно-физические исследования") [<http://www.yafi.ru/mainindex?act=1>]. Эти сенсоры предназначены для обнаружения, локализации и идентификации делящихся и радиоактивных материалов при досмотре людей, багажа, грузов, а также автомобильного, железнодорожного и иных видов транспорта. Они устанавливаются на проездах, контрольно-пропускных пунктах (рис. 22.9) и автоматически выдают сигнал тревоги, когда интенсивность ионизирующих излучений превышает заданные пороговые значения.



Рис. 22.9. Пример мест установки радиационного монитора-идентификатора ИР-560

Габариты монитора ИР-560 составляют 330x200x170 мм, масса 2,5 кг. Он позволяет регистрировать альфа-, бета- и гамма-излучение в диапазоне энергий от 0,03 до 3 МэВ, нейтронное и протонное излучения. Монитор автоматически производит идентификацию неэкранированных ядерных материалов (^{235}U , ^{238}U с разной степенью обогащения, ^{237}Np , Pu), медицинских радиоизотопов (^{67}Ga , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{123}I , ^{201}Tl), промышленных изотопов (^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{192}Ir , ^{241}Am ,

^{152}Eu), природных радиоактивных материалов (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{90}Sr). Высокоактивные материалы могут быть обнаружены и идентифицированы, даже будучи экранированы свинцом или сталью.

В качестве другого примера назовем сцинтилляционный аэрогамма-спектрометр АГСК-99С, разработанный и выпускаемый в МИФИ. Он предназначен для использования на летательных аппаратах с целью обнаружения и картирования локальных источников ионизирующих излучений как в "старых" районах радиоактивных загрязнений, так и вновь возникающих в результате аварий, потерь при транспортировке, актов терроризма. В нем применены сцинтилляторы NaI(Tl) диаметром 200 и высотой 100 мм или 200x200x100 мм. Измерительный спектрометрический модуль содержит 4 таких сцинтиллятора и вместе с электронной аппаратурой имеет габариты 55x55x45 см [<http://www.radiation.ru/research/AGSC.htm#AGSC-99S#AGSC-99S>].

В результате реализации эффективных миниатюрных полупроводниковых фотоприёмников сцинтилляций появилась также возможность создания координатно- (или позиционно-) чувствительных сцинтилляционных детекторов.

В "Сенсоры на полевых транзисторах и на приборах с отрицательной ВАХ. Газоразрядные сенсоры" Вы уже ознакомились с устройством и функционированием кремниевых матричных фотоприемников. Координатно-чувствительные сцинтилляционные детекторы строятся из многих слоев. Каждый слой состоит из матрицы фотодетекторов и расположенной над ней пластины сцинтиллятора. Индивидуальные фотодетекторы воспринимают в основном лишь сцинтилляции, происходящие в прилегающем объеме сцинтиллятора, каждый – в своём. Снимаемая с матриц фотодетекторов последовательность сигналов содержит информацию о координатах, моментах времени и интенсивности наблюдаемых сцинтилляций. Время сцинтилляции фиксируется с точностью порядка 1 нс, а координаты – с точностью единиц-десятков микрометра. Накапливая в памяти большого объема такую информацию, компьютер, исходя из неё, может довольно точно реконструировать треки пролетающих частиц, их энергетические характеристики, точки распада, рассеяния или соударения частиц. Могут быть подсчитаны и показаны на дисплее также пространственное распределение пролетающих ионизирующих частиц, распределение их по направлениям и т.д.

С помощью современных интеллектуальных сцинтилляционных детекторов проводятся ныне новейшие эксперименты в области физики высоких энергий, ядерной физике и космологии. Остановимся вкратце лишь на одном примере. Примерно в 100 км от Рима глубоко в толще горы Гран-Сассо (Gran Sasso) расположена подземная лаборатория, принадлежащая итальянскому Национальному институту ядерной физики (INFN). Благодаря естественному экранированию (от поверхности ее отделяют полтора километра горных пород!), поток космических лучей в ней в миллион раз меньше, чем на поверхности Земли. Именно поэтому она идеально подходит для проведения сверхчистых экспериментов в физике элементарных частиц.

Астрофизические данные показывают, что свыше 90% материи Вселенной существует в виде т.н. "темной материи". Она практически никак не проявляет себя ни в оптическом, ультрафиолетовом, рентгеновском или инфракрасном диапазонах, ни в радиоволнах. О её наличии свидетельствует пока только гравитационное воздействие на видимую материю. Из чего состоит "темная материя", – пока не известно. Астрофизики склонны к мысли, что она состоит из неизвестных нам пока электрически не заряженных, массивных частиц, очень слабо взаимодействующих с веществом. Их назвали "вимп" (от англ. WIMP — *weakly interacting massive particles*). Они образуют огромное облако вокруг каждой галактики. Поскольку наша Солнечная система находится на периферии Млечного Пути, то вполне может соприкоснуться с облаком вимпов. Если это облако неоднородно по плотности, то мы, находясь на Земле, вращающейся вокруг Солнца, можем в разных точках орбиты чувствовать то более сильный, то более слабый поток вимпов, с периодом один год. Как и известные нейтрино, большинство вимпов свободно проходят Землю насквозь. Конечно же, даже многокилометровая толща горы для них не помеха. Однако изредка вимпы всё же сталкиваются с атомными ядрами и вызывают вспышки света. Частота вызываемых сцинтилляций должна изменяться с периодом в 1 год. И действительно, в 2000 г., после многих лет наблюдений физики из INFN опубликовали сообщение о том, что с помощью сцинтилляционных детекторов NaI(Tl) они обнаружили годовые колебания интенсивности сцинтилляций (рис. 22.10 слева).

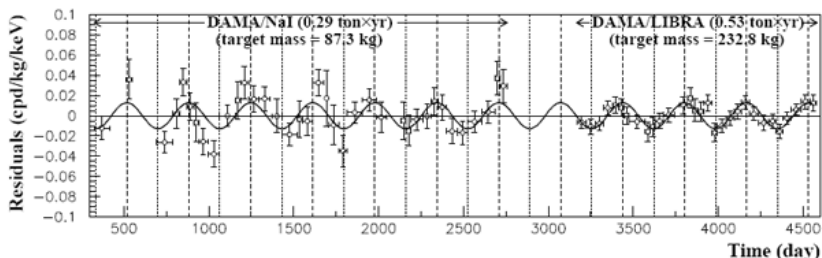


Рис. 22.10. Результаты многолетних измерений интенсивности сцинтилляций в подземной лаборатории INFN. Слева – результаты до 2000 г., справа – начиная с 2003 г

Из-за больших случайных погрешностей эти результаты многими скептиками были поставлены под сомнение. Усовершенствовав аппаратуру, устранив или резко уменьшив влияние источников случайных погрешностей, исследователи с 2003 г. повторили эксперимент. Результаты повторных экспериментов представлены на рис. 22.10 справа. Наблюдается еще более четкая синусоидальная зависимость с периодом ровно в 1 год, регулярно повторяются максимумы 2 июня и минимумы в начале декабря каждого года. Авторы настаивают на том, что полученная зависимость – это результат взаимодействия с вимпами. Никакие другие известные источники излучений земного или космического происхождения не могут объяснить совокупность 3-х факторов: (1) строго синусоидальная годовая периодичность с точной привязкой к дате, (2) наблюдение сигнала только при низких энергиях и (3) только в "однодетекторных" событиях. Например, потоки известных космических излучений вызывают сцинтилляции с разными энергиями и одновременно во многих детекторах, поскольку порождают т.н. "космические ливни".

Хотя в интерпретации полученных результатов и остаются еще кое-какие сомнения, не исключено, что интеллектуальный сцинтилляционный сенсор помог сделать важное открытие в физике элементарных частиц, астрофизике и в космологии.

Краткие итоги

Такие важные характеристики, как квантовые выходы фотосинтеза и флуоресценции хлорофилла, можно определять, не проводя темновую

адаптацию листьев растений и не снимая кривую ИФХ. В сенсорах для определения квантового выхода фотосинтеза с этой целью измеряют интенсивность переменной флуоресценции хлорофилла, вызываемой слабым "измерительным", модулированным пучком света при постоянном обычном (рабочем) и при "насыщающем" освещении листьев. Как правило, такие сенсоры измеряют также текущую квантовую интенсивность освещения растения и рассчитывают текущую продуктивность фотосинтеза.

В последнем десятилетии XX в. начались интенсивные разработки новых видов люминесцентных сенсоров. В одном из них используют т.н. "люминесцентные маркеры" – специально синтезированные макромолекулы, в состав которых входят два важных функциональных звена. Одно из них (т.н. "распознаватель") является выборочно чувствительным к аналиту, а другое (т.н. "сигнализатор") имеет выраженную люминесцентную активность, т.е. ярко светится под действием внешнего света или другого возбуждающего фактора. В качестве распознавателя часто используют молекулы естественных ферментов (энзимов). В составе макромолекулы эти два звена взаимодействуют так, что, когда к распознавателю присоединяется частица контролируемого аналита, то это приводит к гашению или, наоборот, – к стимулированию люминесценции сигнализатора. И сенсор, измеряя интенсивность люминесценции, определяет по ее изменениям наличие и концентрацию аналита.

В биолюминесцентных сенсорах используется собственное свечение некоторых живых клеток, вызываемое возбуждениями в результате происходящих внутри клетки биохимических реакций. Методами генной инженерии такие клетки модифицируют так, чтобы в них совместно функционировали белок-распознаватель, белок-репрессор, белок-промотор, биолюминесцирующий белок и РНК-синтезатор. "Распознаватель" должен быть настроен на интересующий пользователя аналит. "Репрессор", пока нет сигнала от распознавателя, блокирует работу промотора. В качестве биолюминесцирующего чаще всего используют природный белок люциферазу. Уже отработана стандартная процедура создания подобных генно-инженерных конструкций биолюминесцентных клеток-сенсоров. Основой для них обычно служит плаزمида бактерии *Escherichia coli*. Затем созданные "бактерии-сенсоры" культивируют: наращивают в требуемых количествах в специальных питательных средах. В отличие от сенсоров с люминесцентными маркерами излучение

биолюминесцентных сенсоров не модулировано, и поэтому его труднее выделять из посторонних световых помех.

Сенсоры, в которых первичные информационные сигналы появляются в виде сцинтилляций, называют "сцинтилляционными сенсорами". Еще на заре становления атомной и ядерной физики в опытах по рассеянию альфа-частиц на атомах использовались сцинтилляторы. В течение XX в. сцинтилляторы были существенно усовершенствованы. Наряду с неорганическими кристаллическими $\text{NaI}(\text{Tl})$, $\text{ZnS}(\text{Ag})$, $\text{LiI}(\text{Eu})$ и др., появились органические (антрацен, нафталин, р-терфенил, стильбен, ...) и синтезированные пластиковые сцинтилляторы. Последним можно придать практически любую геометрическую форму, они обеспечивают короткие времена вспышки (~ 1 нс) при яркости сцинтилляций, лишь немногим уступающей неорганическим сцинтилляторам. Простейшие сцинтилляционные счетчики, подсчитывая число импульсов за фиксированный период времени, определяют интенсивность наблюдаемого ионизирующего излучения. Интеллектуальные сцинтилляционные детекторы определяют и выводят на дисплей также энергетический спектр этого излучения, во многих случаях могут идентифицировать по этому спектру природу источника излучения. Их широко применяют не только в физических исследованиях, но и для учета, контроля и охраны, для экологического надзора и противодействия незаконному обороту ядерных материалов и радиоактивных веществ.

Сочетание эффективных сцинтилляторов и чувствительных миниатюрных полупроводниковых фотоприёмников сцинтилляций позволило создать координатно-чувствительные сцинтилляционные детекторы. Такие детекторы, кроме описанных выше возможностей, позволяют реконструировать также треки пролетающих ионизирующих частиц, подсчитывать их пространственное распределение, распределение по направлениям и т.д. С помощью современных интеллектуальных сцинтилляционных детекторов проводятся ныне новейшие эксперименты в области физики высоких энергий, ядерной физике и космологии.

23. Принципы работы ППР-сенсоров.

23.1. Поверхностный плазмонный резонанс и его применение для построения сенсоров

Сенсоры на основе поверхностного плазмонного резонанса (ППР) или сокращенно " ППР сенсоры " – это относительно новый класс сенсоров в отличие от рассмотренных в предыдущих лекциях спектрофотометрических и люминесцентных сенсоров.

Явление поверхностного плазмонного резонанса открыто в конце 60-х годов XX века.

23.1.1. Сущность явления ППР условия его наблюдения

Поверхностные плазмоны – это волны переменной плотности электрического заряда, которые могут возникать и распространяться в электронной плазме металла вдоль его поверхности или вдоль тонкой металлической пленки.

Оказалось, что при определенных условиях поверхностные плазмоны могут возбуждаться под воздействием поляризованного света. В 1968 г. это было продемонстрировано. Схема наблюдения ППР, которую стали называть по фамилии автора "геометрией Кречмана", показана на рис. 23.1.

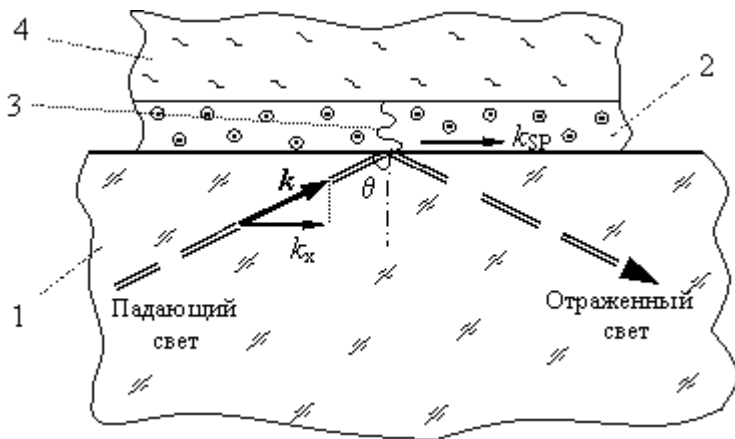


Рис. 23.1. Схема оптического наблюдения явления ППР: 1 – прозрачная среда с высоким показателем преломления; 2 – тонкая металлическая пленка; 3 – затухающая электромагнитная волна; 4 – исследуемая жидкость

Свет проходит сквозь оптически прозрачную среду 1 с относительно большим показателем преломления, например, сквозь призму из стекла и падает под определенным углом на тонкую металлическую пленку 2, нанесенную на поверхность стекла. Угол падения должен быть больше угла полного внутреннего отражения. Часть света проникает в металл и распространяется в нем в виде быстро затухающей электромагнитной волны 3. Последняя возбуждает колебания свободных электронов металла – т.н. "электронной плазмы". И в этой плазме могут возникать коллективные колебательные движения электронов, которые принято описывать как квазичастицы – т.н. "поверхностные плазмоны".

Возбуждение становится особенно эффективным при условиях, если:

1. свет поляризован;
2. поляризация его такова, что электрический вектор электромагнитной волны лежит в плоскости падения, а магнитный вектор параллелен поверхности металла;
3. проекция k_x волнового вектора \vec{k} фотонов света на плоскость пленки равна волновому вектору k_{sp} поверхностного плазмона.

Когда эти условия выполнены, то значительная часть энергии света превращается в энергию плазмонов, из-за чего интенсивность отраженного от поверхности металлической пленки света резко падает. Это явление и называют "поверхностным плазмонным резонансом".

Если металлическая пленка 2 достаточно тонка (< 200 нм), то значительная часть затухающей в металле электромагнитной волны достигает противоположной поверхности металла. И тогда ППР становится чувствительным к свойствам той среды 4, которая контактирует с металлом с другой стороны пленки. От электрической поляризации этой среды, в частности от её диэлектрической постоянной (которая у диэлектриков равна квадрату показателя преломления света), зависит положение минимума кривой ППР.

Условие равенства волновых векторов записывается в виде

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_c \sin \theta = k_{ППР} \sqrt{\frac{\epsilon_M n^2}{\epsilon_M + n^2}} \quad (23.1)$$

где λ – длина волны света; n_c – показатель преломления среды, на поверхности которой находится металлическая пленка (обычно стекла); θ – угол падения света на металлическую пленку; $k_{ППР}$ – волновой вектор поверхностного плазмона металлической пленки; ϵ_M – модуль комплексной диэлектрической проницаемости металла; n – показатель преломления среды, которая находится на противоположной стороне металлической пленки.

Как видно из этой формулы, изменения свойств металла или показателя преломления среды 4 изменяют правую сторону уравнения (23.1), вследствие чего положение резонанса изменяется.

23.1.2. Виды кривой ППР

Типичная *кривая ППР*, т.е. зависимость интенсивности отраженного металлической пленкой света от проекции волнового вектора k_x на плоскость пленки, показана на рис. 23.2. Здесь по вертикали отложена в относительных единицах интенсивность I отраженного света, а по горизонтали – проекция k_x или пропорциональная ей величина $((n_c \sin \theta / \lambda)$ – тоже в относительных единицах. Наблюдается четкий и довольно острый резонанс. При изменении свойств металлической

пленки (значений $k_{ПП}$ и ϵ_M) или показателя преломления n расположенной снаружи среды минимум резонансной кривой заметно смещается.

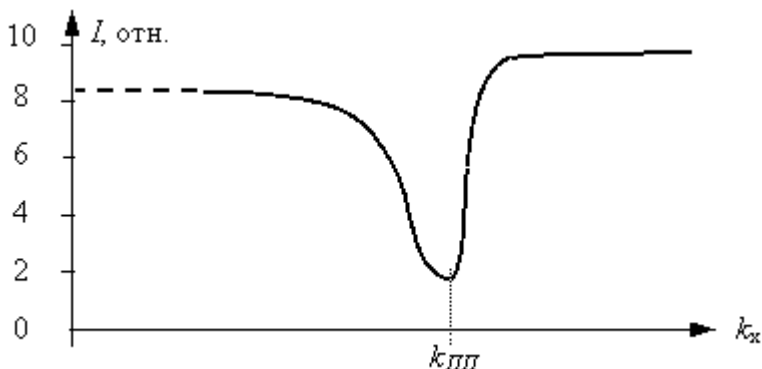


Рис. 23.2. Типичная кривая ППР – зависимость интенсивности отраженного света от проекции волнового вектора на плоскость пленки

Поэтому в самом начале измерение кривых ППР рассматривалось только как очень чувствительный метод изучения оптических свойств и состояния поверхности металлов, оптических свойств металлических пленок, а позже – как один из точнейших методов рефрактометрии, т.е. определения показателя преломления жидкостей и газов. Ведь этим методом удаётся измерять показатель преломления с точностью до 6-го знака после запятой. Благодаря последнему метод ППР начали использовать и для определения концентрации в жидкостях растворенных веществ, которые несколько изменяют их показатель преломления.

Кривую ППР можно наблюдать в одном из двух режимов.

Если зафиксировать угол падения θ и облучать металлическую пленку светом широкого спектра, то, разложив этот свет в спектр, мы будем наблюдать ППР, как резонансный минимум в распределении спектральной интенсивности отраженного света. Эти зависимости показаны на рис. 23.3 слева. По горизонтали отложены значения т.н. "волнового числа" $k=1/\lambda$ в см^{-1} , по вертикали – коэффициент отражения в %. Чувствительность обнаружения изменений в этом

случае определяется минимальным спектральным сдвигом минимума ППР, который можно зарегистрировать.

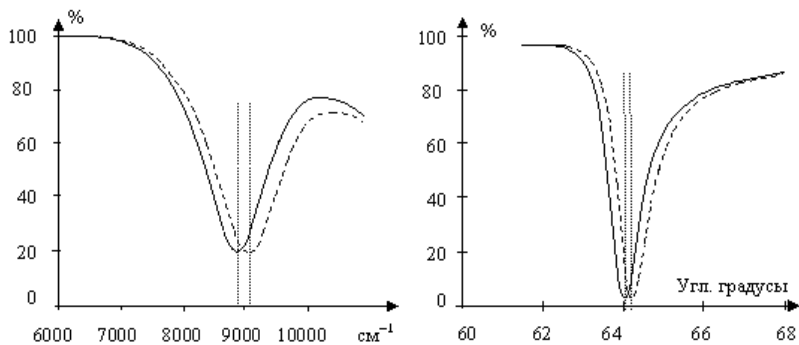


Рис. 23.3. Слева – спектральные и справа – угловые кривые ППР

Если применить монохроматический свет ($\lambda = \text{const}$), то наблюдается резонансный минимум в угловой зависимости интенсивности отражения (рис. 23.3, справа). Здесь по горизонтали отложены значения угла отражения в градусах. Чувствительность обнаружения изменений в этом случае определяется уже наименьшим угловым сдвигом минимума ППР, который можно зарегистрировать. В обоих случаях на рис. 23.3 сплошной линией показана кривая ППР при отсутствии, а штриховой – при наличии покрытия на золотой пленке. Минимумы отражения отмечены пунктирными линиями.

23.1.3. Возможность применения ППР для биохимических анализов

В 80-х годах XX в. выяснилось, что ППР может стать и чувствительным методом выявления присутствия даже незначительного количества разных биологических примесей. Для этого на внешней поверхности тонкой золотой пленки биохимическими методами высаживают ("иммобилизуют") мономолекулярный слой "лиганда" или "рецептора" (рис. 23.4). Это слой органических молекул, которые избирательно взаимодействуют с "аналитом" – теми молекулами (частицами), концентрацию которых в растворе мы хотим измерять.

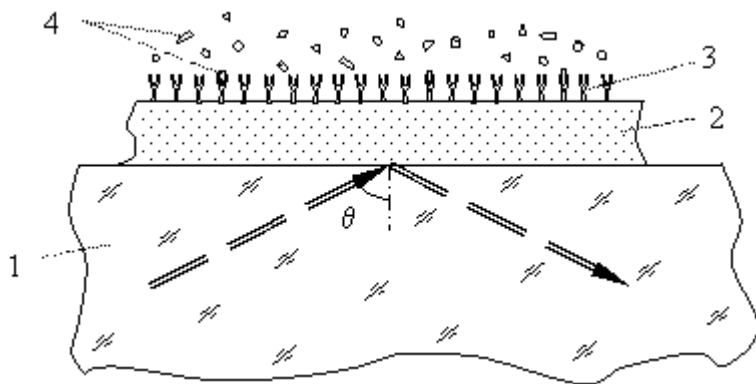


Рис. 23.4. Схема наблюдения сдвига кривой ППР при наличии аналита: 1 – прозрачная среда с высоким показателем преломления; 2 – тонкая металлическая пленка; 3 – чувствительный слой лиганда; 4 – молекулы (частицы) аналита

Если в качестве "рецептора" используются молекулы или частицы биологического происхождения, то ППР сенсоры часто называют "ППР биосенсорами", а чувствительный слой – "биорецепторным" слоем. Различают две большие группы биорецепторных слоев: на основе ферментов и на основе антител. В последнем случае ППР сенсоры называют также "ППР иммуносенсорами".

Когда молекулы (частицы) аналита присоединяются к молекулам лиганда (рецептора), создаваемое последними электрическое поле на поверхности металла несколько изменяется, вследствие чего резонансный минимум ППР смещается. Сдвиг этот тем больше, чем больше молекул (частиц) аналита присоединилось к биочувствительному слою лиганда. А это зависит от концентрации аналита в исследуемом растворе и от кинетики процессов биохимического взаимодействия аналита с лигандом.

Таким образом, **измеряя величину сдвига минимума кривой ППР, в принципе стало возможным обнаруживать присутствие и измерять концентрацию в растворах многих важных биохимических веществ и микрочастиц** (вирусов, бактерий, антител, ...). А снимая зависимость величины сдвига от времени, можно изучать кинетику их биохимических взаимодействий и ее зависимость от различных факторов. Собственно, сам *прецизионный биохимический*

анализ на молекулярном уровне выполняет в этом случае специфический чувствительный слой лиганда (биорецептора), нанесенного на поверхность металлической пленки, а метод ППР позволяет довольно точно "считывать" результаты этого анализа.

Перед такими чувствительными ППР биосенсорами открылась широкая область применений. Это – и научные исследования в области биохимии, и обнаружение опасных загрязнений, отравляющих и химически вредных примесей в питьевой воде, и контроль концентрации разных ингредиентов в молоке, пиве, вине, других напитках, в бензине и моторных маслах и т.п. Появилась возможность быстрого обнаружения вредных вирусов, бактерий, биохимических веществ в жидкостях, в том числе и в полевых условиях, а также возможность создания многих новых тонких методов научных исследований.

Чувствительностью ППР сенсора называют ту наименьшую концентрацию аналита, которую можно надежно зафиксировать с помощью этого сенсора. Чувствительность зависит от ряда факторов, в частности, от того, какая часть аналита уже связалась с рецепторным слоем. А это зависит от температуры и времени их взаимодействия. Но, пожалуй, определяющую роль играет тот минимальный угол сдвига кривой ППР, который можно надежно зафиксировать с помощью программно-технических средств сенсора.

23.2. Анализ оптоэлектронных каналов ППР сенсоров с параллельным и с расходящимся световым пучком

ППР сенсоры с монохроматическим источником света, отслеживающие угловую зависимость интенсивности его отражения, можно разделить на два вида – работающие с параллельным и работающие с расходящимся световым пучком.

23.2.1. ППР сенсор с параллельным световым пучком

Типичная оптическая схема наблюдения угловой зависимости интенсивности отражения света с использованием параллельного светового пучка показана на рис. 23.5.

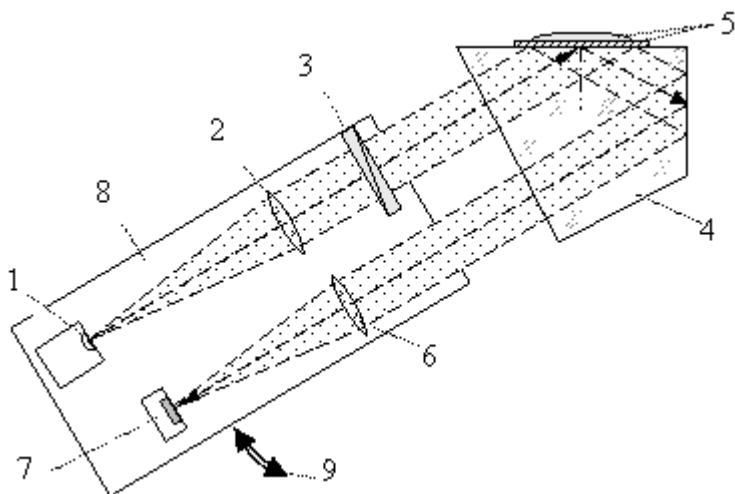


Рис. 23.5. Оптическая схема наблюдения ППР с использованием параллельного пучка света и поворотного механизма

Источник монохроматического света 1 (чаще всего – лазерный диод) размещается в фокусе линзы 2, формирующей параллельный пучок света. Такую линзу в оптике называют коллиматором. Далее свет проходит через поляризатор 3 и направляется к стеклянной оптической ретропризме 4, на верхней поверхности которой находятся тонкий металлический слой с лигандом и исследуемый раствор 5. Отраженный от этого объекта свет повторно отражается от соседней грани ретропризмы, расположенной под прямым углом к рабочей грани. Пользуясь законами отражения света, Вы можете убедиться в том, что этот повторно отраженный пучок света всегда направлен противоположно падающему пучку. Поэтому такие оптические призмы и называют "ретропризмами". С помощью линзы 6 отраженный обратно свет собирается на чувствительной поверхности фотоприемника 7, превращается в нем в электрический сигнал, усиливается и поступает на АЦП. Полученное значение интенсивности отраженного сигнала передаётся в микропроцессор (он и АЦП с усилителем на рис. 23.5 для простоты не показаны). Источник света 1, линзы 2 и 6, поляризатор 3 и фотоприемник 7 установлены на подвижном (относительно ретропризмы) узле 8, который с помощью точного механического привода 9 может перемещаться, вращаясь вокруг оси, проходящей через центр рабочего участка 5 ретропризмы.

Расстояние, на которое перемещается узел 8, достаточно для изменения углов падения и отражения света от рабочего участка ретропризмы 4 в пределах 5-10deg. Микропроцессор может точно учесть некоторую нелинейность в зависимости угла отражения от перемещения узла 8 и влияние температурных изменений на эту зависимость.

Но вот параллельность пучка света, сформированного даже наилучшей линзой, не является идеальной, так как источник света не является точечным. Угол α расхождения светового пучка в оптической схеме на рис. 23.5 определяется размером s излучающей области источника света и фокусным расстоянием f коллимационной линзы 2:

$$\alpha \approx 180^\circ s / (\pi f) \quad (23.2)$$

Угловое расхождение пучка света приводит к некоторому "размыванию" углового распределения интенсивности отраженного света. И резонансный минимум на кривой ППР становится менее острым и менее глубоким. Например, если источником света является светодиод с размером излучающей области $s = 0,2$ мм, то для фокусного расстояния $f = 40$ мм угол расхождения пучка составит приблизительно 0,3 deg. Приблизительно на столько же возрастает и угловая ширина полосы ППР. Если же использовать полупроводниковый лазер с размером зоны излучения 2 мкм, то для фокусного расстояния 40 мм угол расхождения параллельного пучка света составит лишь около 0,003 deg. Формула (23.2) определяет физическую угловую разрешающую способность схемы с параллельным световым пучком, связанную с размерами источника света.

Эту разрешающую способность можно назвать "физической", поскольку, используя специальную математическую обработку результатов многих отсчетов резонансной кривой ППР, величину углового сдвига, как оказалось, можно определить значительно точнее. Возможность уточнения основана на том, что резонансная область кривой ППР сдвигается как целое, практически не изменяя своей формы в области минимума. Имея измерения интенсивности в 50-100 ее точках, можно рассчитать ту величину сдвига кривой, при которой суммарное среднеквадратическое отклонение от стандартной формы будет наименьшим. Так рассчитанная величина сдвига отфильтровывает все шумовые помехи и оказывается соответственно в

50-100 раз точнее, чем прямое определение точки минимума. По существу здесь используется обобщение известного принципа нониуса.

Реальные источники света являются также не совсем монохроматическими. Их обычно характеризуют полушириной $\Delta\lambda$ спектральной области излучения. Это означает, что почти вся световая мощность сосредоточена в интервале длин волны от $(\lambda-\Delta\lambda)$ до $(\lambda+\Delta\lambda)$. Если при длине волны λ плазмонный резонанс имеет место при угле θ , то при длине волны $(\lambda+\Delta\lambda)$ – уже при несколько другом угле $(\theta+\Delta\theta)$. Т.е. спектральной ширине $\Delta\lambda$ полосы излучения соответствует определенное размывание углового распределения отраженного света. Определить связь между $\Delta\lambda$ и $\Delta\theta$ можно, исходя из того, что отношение $\sin\theta$ к λ должно быть постоянным, т.е.

$$\frac{\sin \theta}{\lambda} = const \quad (23.3)$$

Если логарифмировать это выражение и взять производную, то легко получить соотношение

$$\frac{\cos \theta}{\sin \theta} \Delta\theta = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (23.4)$$

Угловое размывание кривой ППР, связанное с немонохроматичностью света, можно тогда определить по формуле

$$\Delta\theta_{\lambda} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \operatorname{tg} \theta \text{ в радианах} \quad (23.5)$$

В сумме физическая угловая разрешающая способность в оптической схеме с параллельным пучком света составляет (в радианах):

$$\Delta\theta = \frac{s}{f} + \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \operatorname{tg} \theta \quad (23.6)$$

Здесь s – размер излучающей области источника света; f – фокусное расстояние коллимационной линзы; λ и $\Delta\lambda$ – длина волны и полуширина спектральной полосы излучения; θ – угол, под которым наблюдается ППР.

23.2.2. ППР сенсор с расходящимся световым пучком

Несколько идеализированная схема наблюдения ППР с расходящимся световым пучком показана на рис. 23.6. Расходящийся пучок света от точечного источника S входит в призму 1 и отражается от чувствительного участка ее поверхности 2, на который нанесена исследуемая жидкость 3. Отраженный свет выходит из призмы и падает на линейку фотодетекторов 4. При этом на каждый отдельный фотодетектор 5 попадает свет, отраженный под углами от θ до $(\theta + \Delta\theta_p)$.

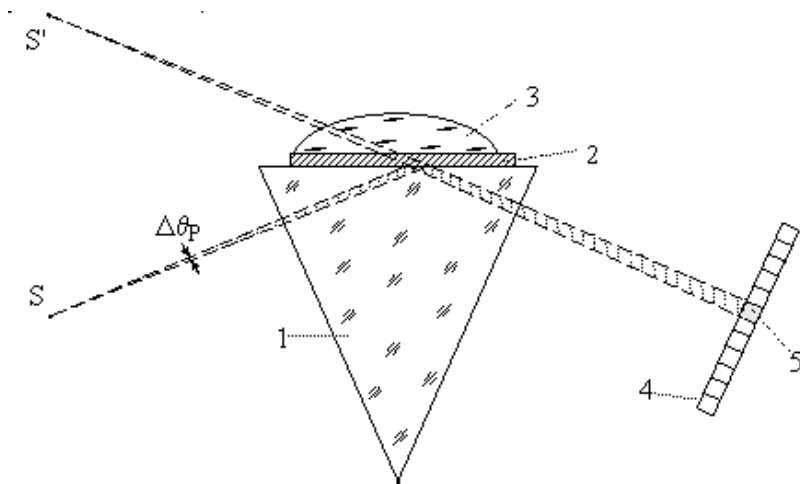


Рис. 23.6. Идеализированная схема наблюдения ППР с пучком света, расходящимся от точечного источника S

Если линейка фотодетекторов расположена ортогонально к направлению распространения отраженного света, то

$$\Delta\theta_p = s_\phi / L \text{ радиан} \quad (23.7)$$

где s_ϕ – размер отдельного фотодетектора в плоскости отражения; L – полный путь, который проходит свет от вершины расходящегося пучка света до линейки фотодетекторов.

Если учесть также некогерентность света, то суммарная физическая угловая разрешающая способность в оптической схеме с расходящимся пучком света составляет

$$\Delta\theta_p = \frac{s_\phi}{L} + \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \operatorname{tg}\theta \text{ радиан} \quad (23.8)$$

Использованные здесь обозначения расшифрованы выше.

В модулях *Spreeta*, например, размер одного элемента фотодетектора составляет $s_\phi = 20$ мкм, базовое расстояние $L = 500$ мм, AlGaAs-светодиод излучает свет с длиной волны $\lambda = 830$ нм, $\Delta\lambda = 15$ нм и $\theta = 64$ deg. Размывание кривой ППР составляет около 2 deg. Т.е. именно оно определяет в этих модулях почти всю ширину резонансной полосы.

23.3. Промышленные ППР сенсоры

В табл. 23.1 указаны названия многих интеллектуальных ППР сенсоров, которые промышленно выпускались в начале XXI в. Все они рассчитаны на реализацию нескольких методик анализа, нуждаются в небольших объемах пробы, большинство из них частично автоматизированы. Некоторые имеют несколько каналов для одновременного сопоставительного анализа нескольких проб.

Таблица 23.1. Перечень оптических ППР сенсоров, разработанных к началу XXI в

№ п/п	Фирма	Название ППР биосенсора	Источник информации
1	Biacore AB	BIACORE 1000, 2000, 3000	Biacore.com
2	Reichert	SR7000	http://www.reichertai.com

	Analytical Instruments, Inc.		
3	Affinity Sensors	Iasys, Iasys Plus, Iasys Auto+	Affinity-sensors.com
4	IBIS Technologies	IBIS I, IBIS II	Ibis-spr.nl
5	Nippon Laser Electronics	SPR670, SPR Cellia	Nle-lab.cojp/English/ZO-HOME.htm
6	Texas Instruments	Spreeta	ti.com/sc/docs/products/msp/control/spreeta
7	Analytical Systems	BIO-SUPLAR 2	Micro-systems.de
8	AVIV Instruments	PWR Model 400	Avivinst.com
9	Farfield Sensors Ltd	AnaLight Bio250	farfield-sensors.co.uk
10	Luna Innovations	Fiber optic prototype	lunainnovations.com
11	ThreeFold Sensors	Label-free prototype	ic.net/~tfs
12	Graffinity	Plasmon Imager	Graffinity.com
13	Leica	Prototype	Leica-ead.com
14	Prolinx	OCTAVE	Prolinxinc.com
15	HTS Biosystems	SPR array	Htsbiosystems.com
16	Quantech Ltd	FasTraQ SPR array	quantechltd.com
17	SRU biosystems	BIND	Srubiosystems.com

Одним из наиболее известных ныне в мире промышленных ППР сенсоров является "BIAcore 3000" шведской фирмы Biacore AB, показанный на рис. 23.7. Он состоит из мини-компьютера и сенсорного блока размерами 760x610x350 мм и массой до 50 кг. Рассчитанный на стационарное использование в лабораториях, он является наиболее высокопроизводительной и чувствительной исследовательской системой для изучения взаимодействия биохимических веществ. Чувствительность анализов достигает $1 \text{ пМ} = 10^{-12}$ моля. Допустимый диапазон изменения показателя преломления исследуемой жидкости – от 1,33 до 1,40.



Рис. 23.7. Интеллектуальный ППР сенсор "Biacore 3000": слева – сенсорный блок, справа – общий вид

В оптимальных условиях проведения экспериментов BIAcore 3000 позволяет зафиксировать сдвиг резонансного угла от 10 RU до 70000 RU. Специально введенная единица 1 RU (resonance unit – единица резонанса) эквивалентна сдвигу, вызываемому связыванием 1 пикограмма (10^{-15} кг) протеина на 1 мм^2 чувствительной поверхности. Способность регистрировать связывание биомолекул с такой высокой чувствительностью гарантирует надежность получаемых результатов и высокое качество их интерпретации. В системе параллельно работают и одновременно могут быть задействованы 4 проточных канала измерений. Результаты, полученные от канала сравнения, могут автоматически вычитаться из результатов, получаемых в других каналах, что позволяет повысить разрешающую способность и информативность каждого анализа.

Технические усовершенствования управляемой проточной системы обеспечили возможность автоматической загрузки исследуемых образцов, точную автоматическую инъекцию проб, регулирование скорости потока от 1 до 100 мкл/мин., минимальные затраты ценных реактивов. Для проведения эксперимента и регистрации сигналов связывания во всех 4 каналах хватает лишь 1 мкл раствора. Малый объем проточного канала 0,02 мкл свел потери к минимуму.

Специальное программное обеспечение позволяет автоматически проводить заданные процессы иммобилизации белков на поверхности металлической пленки, исследовать как отдельные образцы, так и осуществлять серии исследований с автоматической сменой растворов или/и образцов, выполнять детальную обработку результатов, вычислять все нужные пользователю показатели кинетики биохимических реакций. Имеется, например, и программа моделирования взаимодействий, которая позволяет еще до загрузки реальных образцов оптимизировать условия и последовательность проведения экспериментов с ними.

С помощью сенсора Biosoge 3000 можно изучать как малые молекулы, начиная от молекулярной массы 180 а.е.м., так и большие клетки, бактерии, антитела, и находить ответы на такие, например, вопросы, как:

- насколько специфическим является связь между молекулами (клетками) двух данных видов?
- с какой скоростью происходит их связывание?
- насколько сильной является их связь?
- при каких условиях можно её разорвать?
- как влияют температура, кислотность, концентрация, вид растворителя или третье вещество (фермент, катализатор, антитело) на ход реакций их связывания?

Поэтому эта система и подобные ей широко используются для исследований функций отдельных белков и других биохимических веществ, молекулярного распознавания, для исследований и анализов в областях иммунологии, онкологии, вирусологии, инфекционных заболеваний, биотехнологии и др. Многочисленные применения такого типа ППР сенсоров описаны в сотнях работ. Сошлемся лишь на одну из них, где показана эффективность метода ППР для регистрации и изучения ферментативных реакций при участии NADH и NADPH, которые сыграют важную роль в биохимии.

Типичной технологией применения является следующая (см., например. На чувствительную поверхность ППР сенсора устанавливают специальную проточную ячейку (flow cell), которая через патрубки присоединяется к системе регулирования потока исследуемой жидкости с использованием перистальтического насоса и инъекционного клапана. Поскольку проточная ячейка и патрубки очень тонкие (для экономии дорогостоящих препаратов), все жидкости должны быть профильтрованы сквозь 0,2 мкм фильтр и тщательно дегазированы. Вся проточная система должна регулярно промываться специальными растворами.

При биохимических исследованиях обычно проводят подготовительный цикл. В этом цикле через проточную ячейку прокачивается сначала раствор протеина, который оседает мономолекулярным слоем на поверхность золотой пленки. Потом прокачивают раствор тех биохимических молекул или антител, взаимодействие которых с молекулами или частицами аналита нужно изучить. Они присоединяются к протеину и образуют биорецепторный слой (лиганд). Эта процедура может длиться 1...2 ч. В цикле измерений проточная ячейка и чувствительная поверхность сначала промываются несколько минут буферным раствором (рис. 23.8, фаза I). Потом через ячейку прокачивается заданный объем жидкости с исследуемым аналитом, и начинается измерение (фаза II). Частицы аналита присоединяются к лиганду не сразу. Поэтому кривую ППР приходится измерять многократно, каждый раз рассчитывая по результатам измерений точное положение минимума ППР, и строить график его зависимости от времени. Этот график принято называть "сенсограммой". Всем этим автоматически руководит микропроцессор.

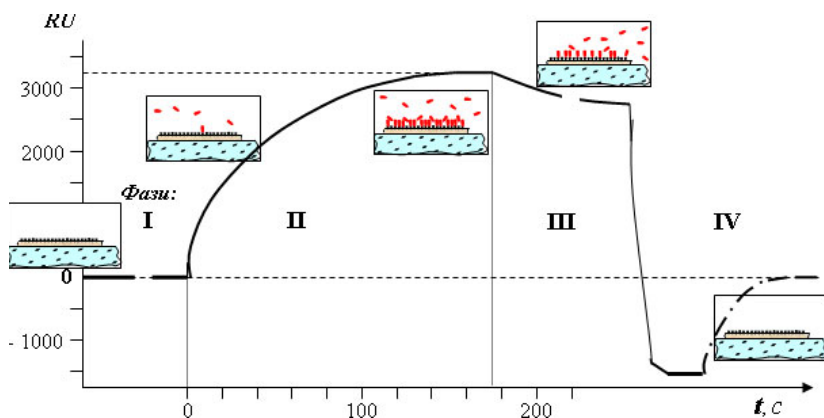


Рис. 23.8. Временная зависимость сдвига минимума ППР

Как видим из рис. 23.8, максимальная концентрация иммобилизованного (т.е. присоединенного к лиганду) анализата достигается лишь через несколько минут. Кинетика нарастания сдвига минимума ППР отображает кинетику химических реакций присоединения анализата к лиганду. Стационарное состояние, которое в конце концов устанавливается, является результатом динамического равновесия между химическими процессами присоединения и диссоциации (отсоединения) анализата и зависит как от констант соответствующих реакций, так и от концентрации анализата, температуры раствора, условий перемешивания и т.п. Это все можно исследовать.

В ходе следующей фазы (III) инъекция анализата прекращается, но продолжается прокачка чистой жидкости. Процессы присоединения практически прекращаются, идут лишь процессы диссоциации. Ход кривой на этой стадии позволяет вычислить константы этого процесса. А зная их, по результатам измерений в фазе II можно вычислить и константы реакции присоединения. В фазе IV через ячейку прокачивается раствор элюента, т.е. жидкости, которая, резко ослабляя химическую связь анализата с лигандом, постепенно "вымывает" анализат, практически не влияя на лиганд. И начинается регенерация биочувствительной поверхности, в ходе которой положение минимума ППР должно возвратиться к первоначальному. После этого можно начинать новый цикл измерений химического взаимодействия лиганда с другим или с тем же анализатом, но при других условиях. Практически

удается провести свыше 50 разных исследований с одним и тем же лигандом.

Фирма Biacore AB выпускает и узко специализированные ППР сенсоры, как, например, BIACORE Quant, предназначенный специально для определения содержания витаминов.

Значительно более компактный интеллектуальный ППР сенсор SR7000 выпускает фирма Reichert Analytical Instruments, Inc. (рис. 23.9) [<http://www.reichertai.com>]. В нем используется расходящийся световой пучок и линейка фотодетекторов, которые обеспечивают наблюдение ППР в пределах углов отражения от 58,5 до 85 deg.



Рис. 23.9. ППР сенсор SR7000 фирмы Reichert Analytical Instruments, Inc

Для обеспечения равномерного распределения интенсивности исходящего светового пучка по углам применена т.н. "интегрирующая сфера". Оптическая призма выполнена из сапфира с показателем

преломления 1,76. Чувствительный элемент на стеклянной подложке с показателем преломления 1,51 оптически соединен с призмой через тонкий слой иммерсионной жидкости.

Ученые и разработчики из лаборатории микроинструментов и систем университета в Майне (The University of Maine, см. Интернет-страницу [<http://www.umaine.edu/lasst/>]) показали, что размеры ППП сенсора совсем не обязательно должны быть большими, как в BIACORE 3000. На рис. 23.10 слева показана в поперечном разрезе структура интегрального оптоэлектронного модуля MISL, изготовленного с применением микросистемных технологий, о которых рассказывалось в "Виды механических сенсоров. Представление о микросистемных технологиях. Деформационные сенсоры".

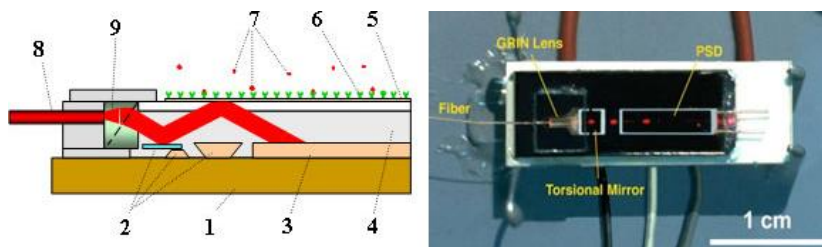


Рис. 23.10. Чувствительный блок ППП сенсора, изготовленного с применением микросистемных технологий: слева – структура интегрального оптоэлектронного модуля; справа – блок в собранном виде. 1 – основа из кремния; 2 – поворотное зеркальце с опорой, приводом и схемой управления; 3 – линейка фотодетекторов со схемой усиления; 4 – прозрачная жидкость и стекло над ней; 5 – пленка золота; 6 – лиганд; 7 – частицы анализта; 8 – оптическое волокно; 9 – микролинза с микропризмой

На основе 1 из кремния сформировано плоское миниатюрное зеркало 2, которое под действием электростатических сил может в пределах 10-20 deg вращаться вокруг оси, закрепленной на его приводе. В рабочем слое кремния сформированы также линейка фотодетекторов 3 с микросхемами усиления и селекции сигналов и микросхема управления приводом зеркала. Над кремнием сформирован слой стекла, в котором над зеркалом 2 и фотодетекторами вытравлена полость, заполненная прозрачной жидкостью 4. На поверхность стекла нанесена тонкая пленка из золота 5, необходимая для наблюдения ППП. Поверх пленки 5 формируется рецепторный слой 6,

чувствительный к частицам аналита 7. К интегральному оптоэлектронному модулю подведено оптическое волокно 8, возле торца которого установлены коллимационная микролинза и микропризма 9. Через оптическое волокно 8 на модуль поступает монохроматический поляризованный свет. Микролинза формирует из него параллельный световой пучок, который отклоняется микропризмой на нужный угол и падает на зеркало 2. От зеркала свет попадает на чувствительную поверхность сенсора, а после отражения от нее – на линейку фотодетекторов 3.

Справа на рис. 23.10 показан чувствительный блок ППР сенсора в собранном виде. Его размеры приблизительно 20x10x2 мм. Над чувствительной поверхностью интегрального модуля устанавливают проточную ячейку, через которую можно прокачивать растворы.

Для снятия кривой ППР микропроцессор включает источник поляризованного света. Свет по оптическому волокну 8 передается в интегральный модуль. С помощью микросхемы управления зеркалом 2 последнее устанавливается под заданным начальным углом. Микропроцессор считывает сигнал с фотодетектора, на который падает отраженный от чувствительной поверхности свет. Потом увеличивает на один шаг (например, на 0,05 deg) угол наклона микрозеркала 2 и считывает из следующего фотодетектора интенсивность отраженного сигнала. После того как шаг за шагом будет снята вся кривая ППР, микропроцессор выключает источник света и вычисляет точное положение минимума ППР в данный момент времени. Через заданные интервалы времени измерения повторяются. Таким способом микропроцессор строит и выводит на экран сенсограмму процессов присоединения и диссоциации аналита, может вычислять параметры химической кинетики и концентрацию аналита в исследуемом растворе.

Большинство промышленных ППР сенсоров работает с угловой зависимостью интенсивности отраженных сигналов. Вариант наблюдения спектральной зависимости интенсивности отраженных сигналов длительное время не использовался, поскольку спектральные узлы с оптическими призмами или дифракционными решетками имели довольно значительные габариты. Но после того, как появились довольно компактные спектральные узлы типа Фурье-спектрометров и др., о которых речь уже шла в лекции 18, ситуация изменилась. И, например, американская фирма GWC Technologies выпустила в

продажу ППР сенсор SPRImager II (рис. 23.11), в котором используется инфракрасный Фурье-спектрометр. Резонансные кривые ППР наблюдаются в виде зависимости интенсивности отраженного света от волнового числа $k=1/\lambda$ (см. рис. 23.3). Поскольку волновое число можно измерять с более высокой точностью, чем угол падения, то потенциально такой способ измерения является более чувствительным. Наилучшая разрешающая способность достигается в БИК свете с непрерывным спектром.

Сенсор спроектирован так, что в одной проточной ячейке может исследоваться одновременно целый массив разных проб. Образцы соответствующих "чипов" показаны на рис. 23.11 справа сверху. В них на стеклянной основе сформированы островки диаметром 0,75-1 мм из тонкой пленки золота, на которую осажден мономолекулярный слой протеина. С помощью микропипетки на каждый островок можно нанести микрокаплю (0,3-0,5 мкл) соответствующего раствора и иммобилизовать из него на слой протеина свой лиганд. Это позволяет исследовать взаимодействие одного и того же анализа с разными лигандами в идентичных условиях. Сенсор позволяет также в любой момент времени получить изображение одновременно всех исследуемых островков в отраженном под заданным углом поляризованном инфракрасном свете, т.е. в условиях наблюдения ППР (рис. 23.11 справа внизу).

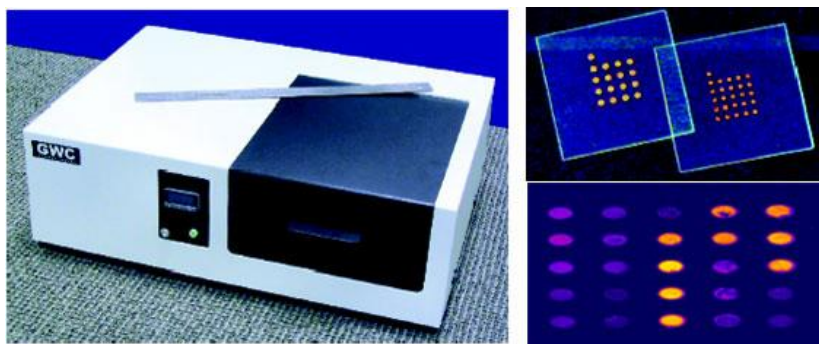


Рис. 23.11. Слева – измерительный блок ППР сенсора SPRImager II; справа сверху – стандартные основы групповых рецепторных "чипов"; справа внизу – пример ППР изображения группового чипа

На таком "ППР изображении" с одного взгляда видно, с какими лигандами связывается исследуемый аналит, а с какими не связывается совсем [<http://www.gwctechnologies.com>]. Можно исследовать также неравномерность связывания по поверхности сенсора и с течением времени. Полученные изображения могут сохраняться в компьютере для демонстраций и для дальнейшей обработки. Угол наблюдения можно изменять в пределах от 40 до 70 deg.

С помощью ППП сенсора SPRImager II появилась возможность, например, впервые наблюдать поверхностный плазмонный резонанс на тонких пленках оксидов металлов. Теоретически явление ППП можно наблюдать на поверхности любого проводника. Однако экспериментально его обнаруживали до сих пор на поверхности лишь благородных металлов. Использование в ППП исследованиях пленок оксидов металлов может значительно расширить область и возможности применения этого метода.

Широкое применение нашел ППП спектрометр, созданный в Институте физики полупроводников им. В.Е. Лашкарёва НАН Украины. На рис. 23.12 показана одна из последних моделей этого спектрометра "Плазмон - 5".

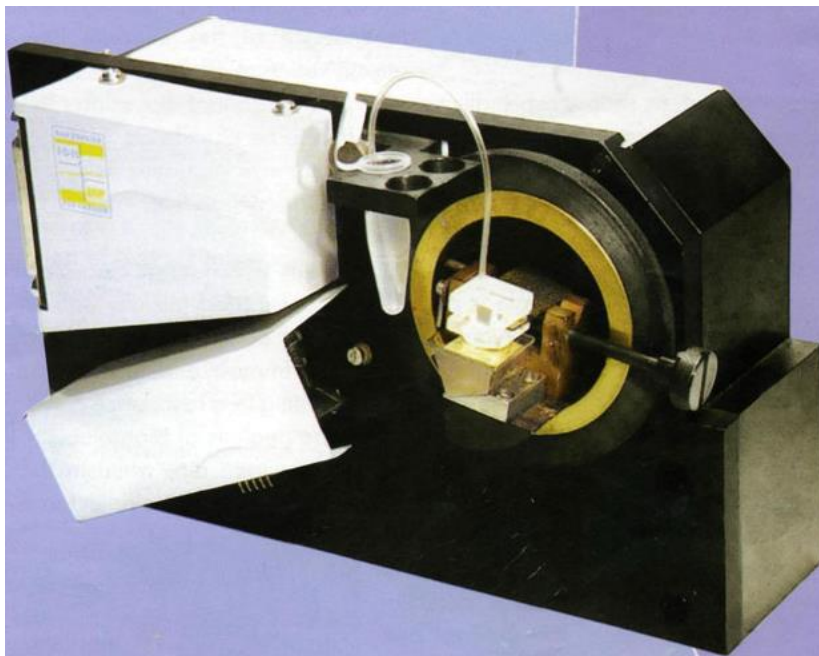


Рис. 23.12. ППР спектрометр "Плазмон-5"

Прибор работает со сменными биочипами, на которые нанесена золотая пленка толщиной 45 нм. Источником монохроматического света (670 нм) служит *GaAs* лазер. Положение резонанса определяется

путем точного механического поворота призмы в пределах 17°. .
Работой прибора управляет персональный компьютер, который также обрабатывает результаты измерений и выводит их на свой дисплей или на печать. Габариты прибора 220x125x95 мм, масса 2,8 кг.

Краткие итоги

Поверхностные плазмоны – это волны переменной плотности электрического заряда, которые могут возникать и распространяться в электронной плазме металла вдоль его поверхности или вдоль тонкой металлической пленки. Поверхностные плазмоны могут возбуждаться под воздействием поляризованного света, если проекция волнового вектора фотонов на плоскость металлической пленки равна волновому

вектору поверхностного плазмона. При этом значительная часть энергии света превращается в энергию плазмонов, из-за чего интенсивность отраженного света резко падает. Это явление называют "поверхностным плазмонным резонансом". Если металлическая пленка 2 достаточно тонка, то значительная часть затухающей в металле электромагнитной волны достигает противоположной поверхности металла. И тогда ППР становится чувствительным к свойствам той среды, которая контактирует с металлом с противоположной стороны пленки. От электрической поляризации этой среды, в частности от её диэлектрической постоянной зависит положение минимума кривой ППР. Измеряя положение или сдвиг минимума, можно с большой точностью определять изменения этой диэлектрической постоянной или показателя преломления среды.

Выяснилось также, что, если на обратную сторону металлической пленки осадить тонкий "рецепторный" слой органических молекул, избирательно взаимодействующих с "аналитом", то ППР сенсор становится очень чувствительным к этому аналиту. По сдвигу кривой ППР можно определить концентрацию аналита и изучать кинетику его взаимодействия. Если в качестве рецепторного слоя используются объекты биологического происхождения, то такие сенсоры называют ППР биосенсорами. Различают две группы биорецепторных слоев: на основе природных ферментов и на основе антител. В последнем случае ППР сенсоры называют "ППР иммуносенсорами".

Физическая разрешающая способность ППР сенсоров зависит от монохроматичности и размеров источника света, от параметров оптической схемы, от размеров отдельных фотодиодов в линейке фотоприемников. С помощью оптимальной математической обработки результатов многих измерений сдвиги кривой ППР можно определять с точностью на порядок больше физической разрешающей способности.

В настоящее время промышленностью выпускаются уже десятки марок интеллектуальных ППР сенсоров. Большинство из них рассчитаны на реализацию нескольких методик анализа, нуждаются в небольших объемах пробы. Некоторые имеют несколько каналов для одновременного сопоставительного анализа нескольких проб. У ряда сенсоров стандартные процедуры биохимических исследований в значительной мере автоматизированы. При использовании проточных ячеек эти процедуры включают такие этапы, как промывка буферным

раствором, прокачка через ячейку заданного объема исследуемого раствора, измерения и запись сенсограммы, прокачка чистого растворителя, отмывание элюентом. Такие циклы могут автоматически повторяться несколько раз. С применением микросистемных технологий созданы также миниатюрные ППР сенсоры. А с применением Фурье-спектроскопии разработан интеллектуальный сенсор, в котором кривые ППР наблюдаются в виде зависимости интенсивности отраженного света от волнового числа. Работы по совершенствованию ППР сенсоров продолжают.

24. ППР-сенсоры Spreeta.

24.1. Микроэлектронные ППР сенсоры семейства Spreeta

Описанный в "Принципы работы ППР-сенсоров. Промышленные ППР-сенсоры" интегральный оптоэлектронный модуль MISL, изготовленный с применением микросистемных технологий, дал старт работам по созданию портативных ППР сенсоров, рассчитанных на массовое применение. Заметной вехой на этом пути стало разработанное американской фирмой *Texas Instruments* семейство микроэлектронных ППР сенсоров Spreeta, с помощью которых можно строить разнообразные ППР сенсоры.

На рис. 24.1 показан общий вид и основные размеры (в дюймах) модуля Spreeta. Конструкция выводов соответствует стандартному корпусу DIP, число выводов – 16. Оптическая схема модуля изображена на рис. 24.2.

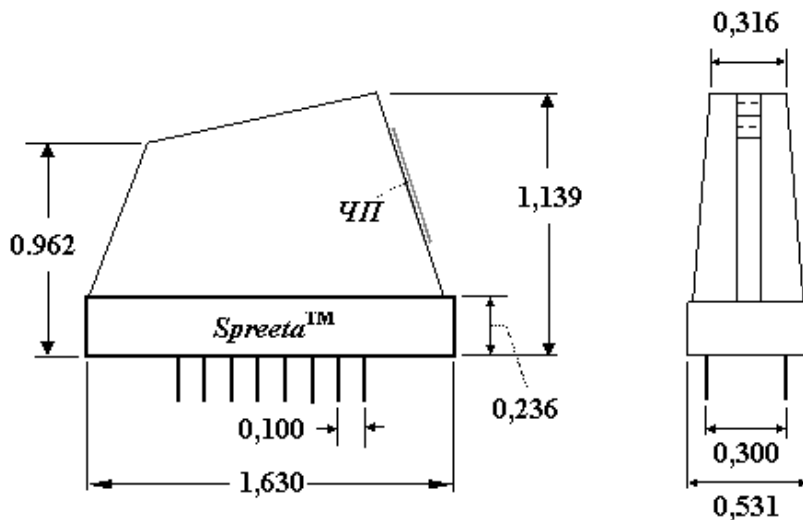


Рис. 24.1. Внешний вид и размеры модуля Spreeta; ЧП – чувствительная поверхность

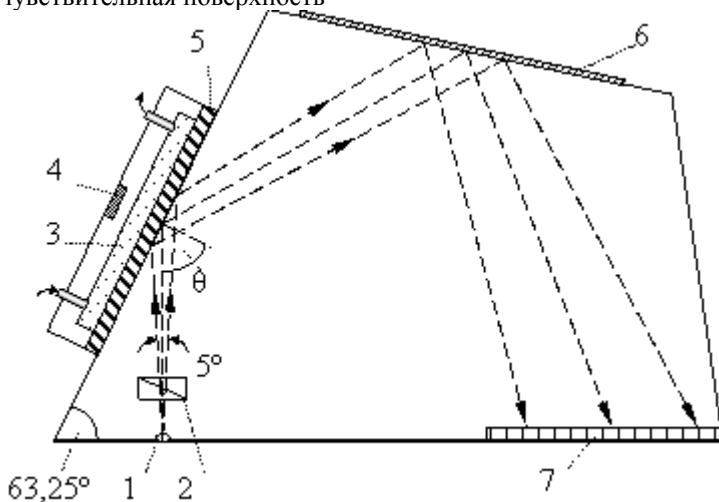


Рис. 24.2. Оптическая схема модуля Spreeta: 1 – светодиод; 2 – поляризатор; 3 – проточная ячейка; 4 – термистор; 5 – чувствительная поверхность; 6 – зеркально отражающий слой; 7 – линейка фотодетекторов

В монолитный модуль Spreeta интегрированы светодиод 1, поляризатор 2, чувствительная золотая пленка 5, зеркально отражающий слой 6, линейка 7, содержащая 128 фотодетекторов, и соединенный с нею 128-разрядный регистр сдвига. Модуль залит прозрачным компаундом с высоким показателем преломления, который заполимеризован и функционирует в качестве призмы. К чувствительной поверхности 5 модуля *Spreeta* извне герметически присоединяется проточная ячейка 3. Термистор 4 позволяет при необходимости поддерживать заданную температуру прокачиваемой жидкости. Светодиод 1 излучает пучок света с угловым расхождением около 5 deg. Поляризатор 2 выделяет из него составляющую, поляризованную в требуемой для наблюдения ППР плоскости. Взаимодействуя с чувствительной поверхностью 5, свет отражается от нее, потом – от зеркальной поверхности 6 и попадает на линейку фотодетекторов. На каждый элемент этой линейки падают лучи, отраженные от чувствительной поверхности 5 под своим углом. Поэтому на каждом элементе формируется электрический сигнал, пропорциональный интенсивности света, отраженного в соответствующем направлении. А совокупность этих электрических сигналов содержит информацию об угловом распределении интенсивности отраженного света, т.е. о кривой ППР.

Функциональная электрическая схема модуля Spreeta показана на рис. 24.3.

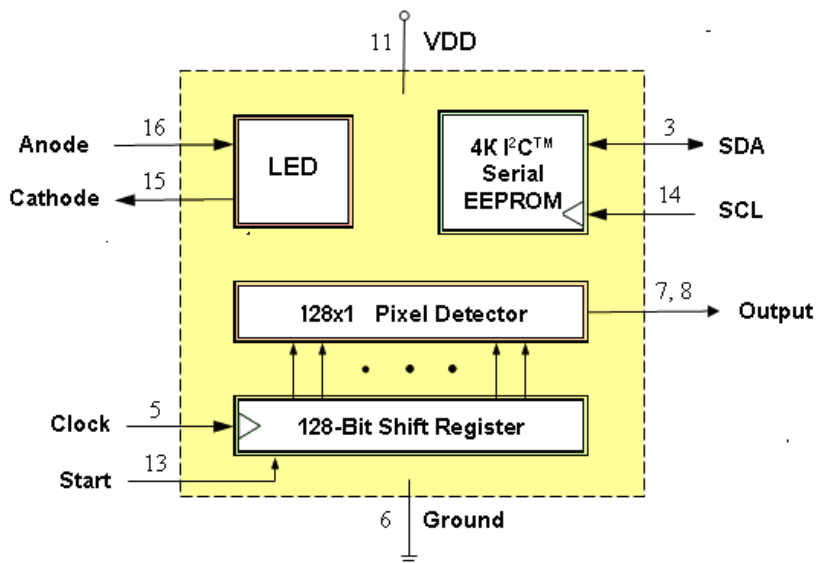


Рис. 24.3. Функциональная электрическая схема ППП сенсора Spreeta

Тактовые импульсы, которые подаются через вывод 5, синхронизируют всю работу сенсора. Стартовые импульсы через вывод 13 инициируют начальную установку, после чего начинается измерительный цикл. Светодиод излучает свет в течение всего измерительного цикла, а в другие интервалы времени отключается, ток через светодиод задается внешним резистором. С каждым тактовым импульсом на выходы 7-8 выдается аналоговый электрический сигнал от следующего фотодетектора. После 129-го тактового импульса цикл измерения заканчивается. Таким образом, исходные данные состоят из 128 аналоговых сигналов, которые снимаются фотодетекторами – линейкой приборов с зарядовой связью. Выходное напряжение каждого из фотодетекторов находится в диапазоне от 0,1 В до 3 В. Модули *Spreeta* калибруют на производстве. Данные калибровки хранятся во внутренней электрически программируемой (EEPROM) памяти объемом 4 К. Запись корректирующего кода осуществляется через последовательный интерфейс.

Модуль *Spreeta*, как видим, выдает "сырые", не обработанные данные о кривой ППП в аналоговой форме. Для обработки этих данных фирма *Texas Instruments* разработала и поставляет специальные стационарные

"модули расширения" на основе персональной ЭВМ, которые управляют работой модуля *Spreeta*, поддерживают интерфейс с ним и обрабатывают данные измерений по специально разработанным программам.

Проточная ячейка 3 через патрубки присоединяется к системе контроля потока исследуемой жидкости с использованием перистальтического насоса и инъекционного клапана. Для измерения показателя преломления исследуемую жидкость закачивают в проточную ячейку и проводят измерение.

Чувствительная поверхность сенсора в результате эксплуатации с течением времени деградирует. Да и тонкая золотая пленка, имея не очень высокие механические свойства, со временем заметно разрушается, вследствие чего чувствительность сенсора падает. В зависимости от состава растворов и технологии отмывания и регенерации, количество анализов, которые можно провести на одном модуле *Spreeta*, составляет от 10 до 50. А дальше весь модуль *Spreeta* приходится заменять вместе со всей его оптоэлектроникой, что существенно удорожает анализ.

Эксплуатационные параметры сенсоров на основе модулей *Spreeta* приведены в табл. 24.1.

Наименование параметров	Ед-ца измер.	Значение параметров		
		Миним.	Номинал	Максим.
Напряжение питания, V_{DD}	В	4,5	5.0	5.5
Ток светодиода	мА	20	-	270
Мощность светодиода	мВт	-	-	50
Тактовая частота	кГц	5	25	2000
Размер чувствительной поверхности	мм	-	14x1	-
Диапазон рабочих температур	С	0	20	70

Диапазон температур хранения		- 25	20	85
	С			
Диапазон измерения коэффициента преломления	RIU	1,320	-	1,368
Разрешающая способность (по показателю преломления)	RIU	-	5×10^{-6}	-

Предложенный фирмой *Texas Instruments* подход к построению ППР сенсоров позволяет быстро и просто применить модули *Spreeta* для решения многих научных и практических задач. Но имеются и недостатки. Во-первых, это довольно ограниченный диапазон углов наблюдения ППР (от 62 deg до 66 deg) и относительных показателей преломления (от 1,320 до 1,368). При фиксированной длине волны это суживает диапазон возможных применений этого модуля. Если резонансный угол выходит за указанные пределы, модуль применить уже нельзя. Во-вторых, информацию, полученную от модуля *Spreeta*, надо потом обрабатывать на персональном компьютере с использованием специальных, довольно дорогих (>4500 долл. США), "модулей расширения". Поэтому такой подход рассчитан на применение лишь в хорошо оснащенных лабораториях. И, наконец, предложенная технология требует довольно значительных затрат времени на измерение и предопределяет высокую стоимость исследований.

24.2. Технология работы со съёмными рецепторными чипами

Технология измерений, предусматривающая установку проточной ячейки на чувствительную поверхность оптической призмы, описанная в предыдущей лекции и удобная для научных исследований, не очень пригодна для массовых анализов. Для того, чтобы стала возможной более продуктивная технология, тонкую золотую пленку и чувствительный рецепторный слой наносят не непосредственно на поверхность призмы, а на отдельные прозрачные пластинки. Таковую пластинку называют "съёмным рецепторным чипом".

Схема простейшего плоскопараллельного съёмного рецепторного чипа показана на рис. 24.4. Основой его является стеклянная плоскопараллельная пластина 1 толщиной 0,5...1 мм из стекла с высоким показателем преломления.

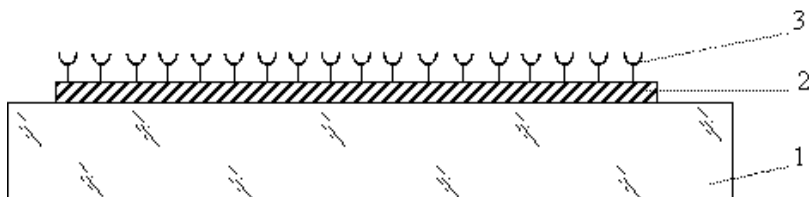


Рис. 24.4. Схема простейшего рецепторного чипа

На поверхность стеклянной пластины 1 нанесена тонкая металлическая пленка 2. На ней сформирован специфически чувствительный рецепторный слой 3, который называют "чувствительной" ("активной", "рабочей") поверхностью.

Отдельные рецепторные чипы, будучи съёмными, позволяют применить групповые процессы отмыwania и восстановления (регенерации) слоя лиганда. Ведь одновременно могут обрабатываться десятки, сотни таких чипов. Это значительно уменьшает затраты специальных реактивов, повышает производительность процесса регенерации и тем самым удешевляет эти процедуры. Промывание и восстановление чувствительной поверхности отделяются от процесса измерения.

Проведя измерение, рецепторный чип вынимают из прибора, а на его место устанавливают другой. При проведении массовых анализов, когда не требуется снимать сенсограмму, а надо лишь обнаружить наличие аналита или определить его концентрацию, из цикла измерения можно исключить не только отмывание, но также и время, требуемое для взаимодействия аналита с лигандом. Ведь исследуемая жидкость может быть нанесена на чувствительную поверхность рецепторного чипа заблаговременно и выдержана на ней вне прибора в течение нужного времени. И лишь "созревший" рецепторный чип с пробой устанавливают в прибор для измерения. Благодаря этому измерения выполняют одно за другим значительно производительнее.

Изготовление рецепторных чипов, их отмывание и регенерацию рецепторного слоя целесообразно выполнять в специальных биохимических лабораториях. Массовые пользователи этим сами не будут заниматься. Для анализов они получают в лаборатории нужное им количество готовых проверенных рецепторных чипов, и после

проведения анализов будут возвращать использованные рецепторные чипы снова в лабораторию. Это немного похоже на специально оснащенные фотолаборатории, куда пользователи сдают экспонированные фотопленки и спустя некоторое время получают профессионально обработанные негативы, слайды или фотографии.

Когда рецепторный чип отработает свое время, он утилизируется. А сам ППР сенсор, его оптоэлектроника продолжают работать с другими рецепторными чипами. Его стоимость переносится в таком случае на значительно большее количество анализов, что тоже заметно удешевляет их.

Чтобы обеспечить надежный оптический контакт между призмой и подложкой рецепторного чипа, между ними наносят соответствующую иммерсионную жидкость. Оптимальной ситуацией теоретически является такая, когда и основа рецепторного чипа, и стекло оптической призмы, и иммерсионная жидкость между ними имеют точно одинаковый показатель преломления. Однако такая ситуация не реалистична. Поэтому рассмотрим общий случай, когда все три указанных среды имеют несколько разные показатели преломления.

Схема прохождения лучей света через оптическую структуру "призма – иммерсионная жидкость – подложка рецепторного чипа" показана на рис. 24.5. Рассматривается оптимальный вариант, когда $n_1 < n_i < n_c$.

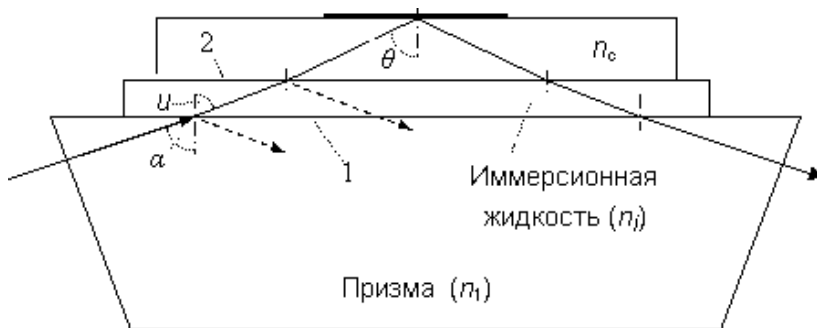


Рис. 24.5. Схема преломления и отражения света от границ раздела сред

В этой структуре имеются две границы раздела сред: 1 – между призмой и иммерсионной жидкостью, 2 – между иммерсионной жидкостью и стеклянной подложкой рецепторного чипа.

Закон преломления света записывается для данного случая так:

$$n_c \sin \theta = n_i \sin u = n_l \sin \alpha \quad (24.1)$$

Чтобы угол α не превышал 80 deg (когда $\alpha > 80^\circ$, работа сенсора может стать неустойчивой), должно выполняться условие

$$n_l / n_c \geq \sin \theta / \sin 80^\circ \quad (24.2)$$

При типичных значениях $n_c = 1,61$ и $\theta = 63,7^\circ$ это сводится к следующему условию для показателя преломления призмы $n_l \geq 1,47$. Его нетрудно выполнить.

На оптической схеме рис. 24.5 нетрудно видеть, что отраженный от границ раздела свет распространяется параллельно свету, отраженному от рабочей области рецепторного чипа, и поэтому тоже попадает на фотоприёмник. Этот отраженный свет создает вредный фоновый сигнал, который не зависит от коэффициента отражения от пленки металла и может существенно уменьшить глубину минимума ППР. Для оценки величины фонового отражения от границ раздела оптических сред сделаем расчеты с использованием известных формул Френеля. Для коэффициента отражения p -поляризованного света от границы раздела двух оптических сред имеем:

$$r_{ГР} = \text{tg}^2(\varphi - \chi) / \text{tg}^2(\varphi + \chi) \quad (24.3)$$

где φ – угол падения света на границу раздела сред; χ – угол преломления света.

Расчеты коэффициентов отражения дают для разных значений $n_l = 1,47; 1,49; 1,51; 1,53$ и $1,55$ результаты, приведенные в табл. 24.2.

Таблица 24.2. Результаты расчета коэффициенто в отражения								
		1,48	1,50	1,52	1,54	1,56	1,58	1,60
		77,2	74,2	71,7	69,6	67,7	66,0	64,4
		0,57 %	2,91 %	5,40 %	7,58 %	9,49 %	11,13 %	12,57 %
		8,73 %	4,21 %	2,03 %	0,95 %	0,38 %	0,11%	0,01%
		9,3%	7,1%	7,4%	8,5%	9,9%	11,2%	12,6%
		1,50	1,52	1,54	1,56	1,58	1,59	1,60
		74,2	71,7	70,0	67,7	66,0	65,2	64,4
		4,21 %	2,03 %	1,11 %	0,38 %	0,11 %	0,04%	0,01%
		0,18 %	1,13 %	2,05 %	3,47 %	4,36 %	5,06%	5,77%
		4,4%	3,2%	3,2%	3,9%	4,5%	5,1%	5,8%
		1,52	1,53	1,54	1,56	1,58	1,59	1,60
		71,7	70,6	70,0	67,7	66,0	65,2	64,4

		2,03 %	1,39 %	1,11 %	0,38 %	0,11 %	0,04%	0,01%
		0,09 %	0,29 %	0,45 %	1,23 %	1,92 %	2,27%	2,62%
		2,12 %	1,68 %	1,56 %	1,61 %	2,03 %	2,31%	2,63%
		1,54	1,55	1,56	1,57	1,58	1,59	1,60
		70,0	68,6	67,7	66,8	66,0	65,2	64,4
		0,02 %	0,16 %	0,32 %	0,52 %	0,72 %	0,94%	1,18%
		1,11 %	0,61 %	0,38 %	0,21 %	0,11 %	0,04%	0,01%
		1,13 %	0,77 %	0,70 %	0,73 %	0,83 %	0,98%	1,19%
		1,56	1,57	1,58	1,59	1,60	1,62	1,64
		67,7	66,8	66,0	65,2	64,4	63,0	61,7
		0,03 %	0,10 %	0,20 %	0,32 %	0,47 %	0,76%	1,05%
		0,38 %	0,21 %	0,11 %	0,04 %	0,01 %	0,01%	0,06%
		0,41 %	0,31 %	0,31 %	0,36 %	0,48 %	0,77%	1,11%

Здесь r_1 – коэффициент отражения от границы раздела 1, r_2 – от границы раздела 2, r – суммарный коэффициент отражения. Как видим, в случае большой разности между показателями преломления n_1 и n_2 от границ раздела сред может отражаться значительная часть светового потока, причем она существенно зависит от показателя преломления

иммерсионной жидкости. Начиная со значений $n_1=1,53\dots 1,55$, расчетный коэффициент отражения от границ раздела становится уже незначительным, а показатель преломления иммерсионной жидкости уже не является критичным.

Из проведенных расчетов вытекает такой вывод: оптимальной является ситуация, когда показатель преломления стеклянной основы рецепторного чипа большой ($n_c \geq 1,6$), показатель преломления оптической призмы, на которую устанавливается чип, чуть меньше

($n_c \geq n_1$), а показатель преломления иммерсионной жидкости имеет промежуточное значение ($n_c \geq n_i \geq n_1$).

Для ППР сенсоров, работающих с параллельным пучком света, хорошим способом борьбы с засветкой фотоприемника светом, отраженным от границ раздела оптических сред, может стать следующий приём. Если съёмные рецепторные чипы формировать не на плоскопараллельных пластинках стекла, а на пластинках с небольшой клиновидностью, то отраженный от границ раздела свет будет распространяться в направлении, не совпадающем с направлением распространения света, отраженного от рабочей области рецепторного чипа. Поэтому "паразитный" свет можно диафрагмировать так, чтобы он не попадал на фотоприемник и не мешал наблюдению ППР.

Экспериментально найдено, что нанесенная на рабочую поверхность призмы капля иммерсионной жидкости при установке съёмного рецепторного чипа растекается до толщины не больше 10 мкм. При такой толщине прослойки существенными становятся капиллярные силы сцепления. Они определяют величину усилий, необходимых при снятии рецепторного чипа с рабочей поверхности призмы. При снятии чипа путем сдвига для иммерсионных жидкостей с низкой вязкостью (например, ?-монобромнафталин) сила сдвига составляет несколько граммов. При снятии чипа путем отрыва требуемое усилие существенно больше и увеличивается с ростом вязкости жидкости, величины и продолжительности внешней нагрузки на пластину. Оно может составлять 0,1 - 0,5 кгс/см². Для иммерсионных жидкостей с низкой вязкостью такая зависимость оказывается значительно слабее. При отсутствии внешней нагрузки сила отрыва составляет 0,025 - 0,1 кгс/см².

Обратим внимание также на то, что в условиях обычных помещений и в полевых условиях съемные рецепторные чипы из-за наличия пыли не так просто каждый раз установить точно в одно и то же положение относительно падающего пучка света. На рис. 24.6 схематически показано расположение рецепторного чипа 2 на поверхности оптической призмы 1.

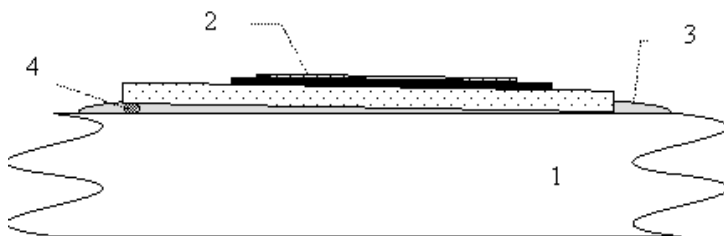


Рис. 24.6. Взаимное расположение поверхности призмы 1 и съемного рецепторного чипа 2; 3 – иммерсионная жидкость; 4 – посторонняя пылинка

Тонкий слой иммерсионной жидкости 3 обеспечивает требуемый оптический контакт между ними. Если в слой иммерсионной жидкости 3 случайно попадает посторонняя пылинка 4, то рецепторный чип 2 располагается уже не точно параллельно поверхности призмы, а разворачивается относительно нее на небольшой угол

$$A = d/l (\text{радиан}) = 180^\circ d / (\pi l) \quad (24.4)$$

где d – размер пылинки, l – длина рецепторного чипа. Например, при $d = 0,1$ мм и $l = 20$ мм этот случайный неконтролируемый угол наклона составляет приблизительно $\pm 0,3$ deg. Для ППР сенсоров это существенно, поскольку случайный угол отклонения в ориентации чипа ограничивает порог чувствительности. Поэтому, когда измерения должны проводиться не в стерильно чистых лабораторных, а в обычных и, тем более, в полевых условиях, когда наличие таких пылинок устранить практически невозможно, с этим фактором приходится считаться.

Один из возможных способов борьбы с влиянием пылинок показан на рис. 24.7.

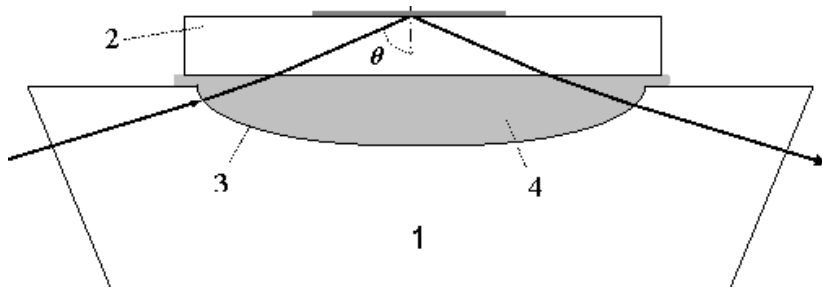


Рис. 24.7. Выемка 3 на поверхности призмы 1 как один из способов уменьшения влияния пылинок (2 - рецепторный чип; 4 – иммерсионная жидкость)

В той области поверхности призмы 1, где должен устанавливаться рецепторный чип 2, сделана хорошо отполированная выемка 3 глубиной 1-2 мм, которую во время работы заполняют иммерсионной жидкостью 4.

Площадь контакта рецепторного чипа непосредственно с поверхностью призмы уменьшается в десятки раз. И пропорционально уменьшается вероятность попадания между ними пылинки. Если же пылинка попадает не на контакт, а на поверхность выемки, то остается внутри иммерсионной жидкости и не может изменить положение рецепторного чипа.

Тем не менее, в более точных ППР сенсорах, когда при проведении анализов надо регистрировать очень малые сдвиги угла ППР от $0,01 \text{ deg}$ до $0,001 \text{ deg}$, таких предупредительных мер недостаточно.

Одна из оптоэлектронных схем, которая позволяет решить задачу точной автоматической ориентации рецепторного чипа, показана на рис. 24.8. Рецепторные чипы 1 изготавливают здесь в виде небольших планарных стеклянных призм с такими углами при основе, которые обеспечивают нужный угол падения θ_0 . Чувствительную поверхность 2 (золотая пленка + лиганд) формируют на верхней грани призмы. Перед выполнением анализа именно на нее надо наносить каплю исследуемой жидкости 3.

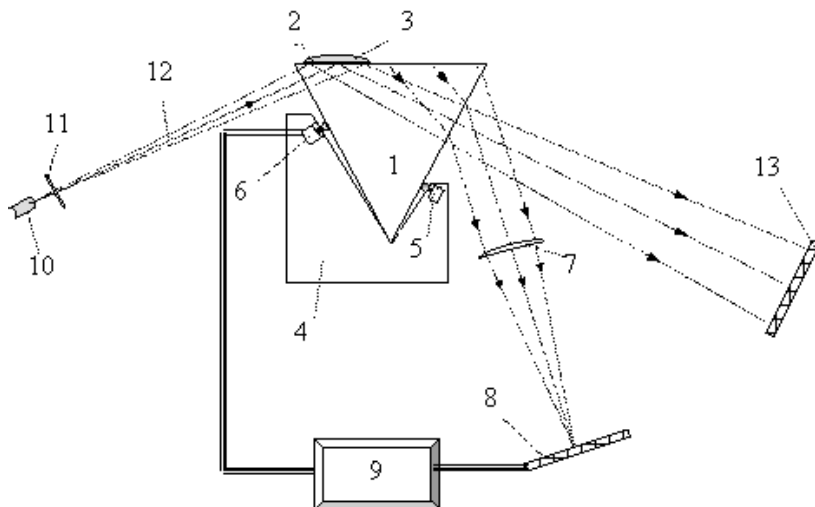


Рис. 24.8. Принципиальная схема ППР сенсора с автоматической ориентацией рецепторного чипа

Съемный рецепторный чип 1 устанавливают на опорную основу 4. Угол сделанной в ней выемки несколько больше угла при вершине призмы. В основу 4 вмонтированы пружина 5 и узел микроперемещения 6, которые фиксируют рецепторный чип 1 в определенном положении. Когда на верхнюю грань чипа 1 падает рассеянный внешний свет, то, входя в стекло, он преломляется и распространяется дальше под углами к нормали, которые не превышают предельный угол. Падая на правую боковую грань и преломляясь на ней, свет проходит сквозь линзу 7, которая собирает параллельные пучки света в своей фокальной плоскости. Тут размещена линейка фотодетекторов 8, на которой формируется изображение светлой полосы с резким переходом к темноте. Край светлой полосы соответствует свету, распространяющемуся в рецепторном чипе 1 под предельным углом. Если чип поворачивать, то край светлой полосы перемещается вдоль линейки фотодетекторов 8. Сигналы от нее поступают на регулятор 9, который управляет работой узла микроперемещения 6. Перемещение происходит до тех пор, пока граница между светом и темнотой на линейке фотодетекторов 8 не попадет в заведомо заданную точку. Это положение чипа фиксируется. Теперь чувствительная поверхность чипа точно сориентирована под нужным углом. Точность ориентации определяется размером

отдельного фотодетектора и фокусным расстоянием линзы и может быть вычислена по формуле (23.2). Например, при $s = 5$ мкм и $f = 40$ мм будем иметь точность ориентации приблизительно $0,007$ deg, что обеспечивает довольно высокую чувствительность сенсора.

Для проведения анализа корпус прибора закрывают непрозрачной крышкой и включают источник поляризованного света, который состоит из светодиода или полупроводникового лазера 10 и поляризатора 11. Расходящийся в пределах ~ 3 deg..5 deg пучок поляризованного света 12 проходит сквозь левую грань рецепторного чипа, падает под нужным углом на чувствительную поверхность 2 и, отразившись от нее, выходит через правую грань чипа и направляется к линейке фотодетекторов 13. С нее снимаются сигналы распределения интенсивности отраженного света по углам отражения (кривая ППР).

Автоматическая угловая ориентация рецепторного чипа в такой схеме (за несколько секунд) позволяет сократить время проведения анализов до минимума. Процесс измерений можно организовать следующим образом: оператор имеет с собой нужное количество готовых для анализа рецепторных чипов. На каждый из них он наносит исследуемые пробы жидкости (например, молока). Когда истекает интервал времени, требуемый для взаимодействия чувствительной поверхности с аналитом, оператор устанавливает соответствующий рецепторный чип в прибор. В нем автоматически выполняются точная угловая ориентация, измерение кривой ППР, обработка и выдача результатов на индикатор. После этого оператор вынимает рецепторный чип с исследованной пробой и вместо него устанавливает в прибор следующий рецепторный чип, уже "созревший" для анализа. Тогда производительность ППР сенсора может составить сотни анализов/час.

Еще одним важным вопросом является взаимозаменяемость съемных рецепторных чипов. Ведь резонансный угол ППР зависит не только от концентрации аналита, но и от свойств самого рецепторного чипа. В связи с этим исследовано влияние этих параметров и предложены такие технологические режимы изготовления рецепторных чипов, при которых последние становятся с достаточной точностью взаимозаменяемыми. К тому же возможность использования каждого рецепторного чипа должна проверяться в лабораториях после его регенерации перед выдачей на повторное использование.

24.3. Пример использования ППР иммуносенсора для выявления заболевания коров на лейкоз

В качестве наглядного примера эффективности применения ППР сенсоров для выявления возбудителей болезней рассмотрим ППР иммуносенсор для анализа заболевания коров на лейкоз. Известно, что ретровирусы являются возбудителями приобретенного иммунодефицита у людей (СПИДа). Один из их подвидов является также возбудителем вирусного лейкоза большого рогатого скота. Это заболевание может передаваться от коров человеку через употребление молока. Сейчас в мире идет поиск эффективных методов борьбы с ретровирусными инфекциями. Но, к сожалению, эффективного лечения пока не существует. Основной мерой борьбы с инфекционным лейкозом являются постоянная диагностика животных, своевременное выявление больных особей и их изоляция от стада коров. Для этого нужны эффективные средства диагностики. Общепринятым сейчас методом выявления этого заболевания является иммуноферментный анализ (метод "Elisa") проб крови, взятой из шейной вены животных. Метод требует для анализа до 6 ч., достаточно сложен, требует профессиональной подготовки исполнителей, нуждается в специоборудовании и спецреагентах. Стоимость одного анализа составляет свыше 5 долларов США. Все это не дает возможности вести постоянный мониторинг за состоянием животных, тогда как эффективное оздоровление стада коров в случае выявления в нем больных особей требует обследования каждой коровы по крайней мере через каждые 10 дней. Существующими методами это осуществить тяжело, как из-за высокой стоимости анализов, так и из-за проблемы частого взятия проб крови.

Возможность применения ППР сенсора для выявления наличия ретровирусов лейкоза в молоке коров была показана в Институте биохимии НАН Украины. Когда в молоке присутствовало заметное количество ретровирусов, резонансный минимум на кривой ППР смещался приблизительно на 1 deg.

Учитывая потребность массового использования иммуносенсоров лейкоза коров в тысячах разных мест (на молочных фермах, в пунктах приема молока и т.д.), надо было создать относительно дешевый портативный ППР сенсор, предназначенный специально для выявления этого заболевания. Такой сенсор должен обеспечивать:

- прямой анализ, без использования дополнительных реагентов;
- экспрессность;
- анализ без взятия крови, по капле молока;
- дешевый анализ, стоимостью меньше 1 доллара США;
- небольшие габариты и массу (до 1 кг и меньше);
- быть удобным для использования в полевых условиях и пригодным для обычного транспортирования;
- выполнять всю необходимую обработку данных измерений внутри прибора и выдавать результаты анализов на свой индикатор;
- не нуждаться в высококвалифицированном обслуживающем персонале;
- иметь довольно высокую производительность – порядка 50 анализов/час;
- иметь не очень высокую стоимость, доступную для фермеров и малых предприятий.

На первом этапе нужен был недорогой сенсор-индикатор, который лишь обнаруживает присутствие в молоке значительного количества ретровирусов лейкоза, возможно, определяя 1-3 степени зараженности. В нем угловая разрешающая способность может быть порядка 0,5 deg.

На рис. 24.9 показана конструкция оптоэлектронной части разработанного ППР иммуносенсора, ориентированного на выявление заболевания коров на лейкоз. Полупроводниковый лазер 1, две поляризационные стопы 2, установленные встречно, и диафрагма 3 вместе образуют узел формирования параллельного пучка света с требуемой поляризацией (осветительный узел). Оптический узел для анализа пробы состоит из оптической ретропризмы 4, съемного рецепторного чипа 5, зеркальной грани 6 и оправы 7. Фотоприемный узел состоит из фотоприемника 8 и собирающей линзы 9.

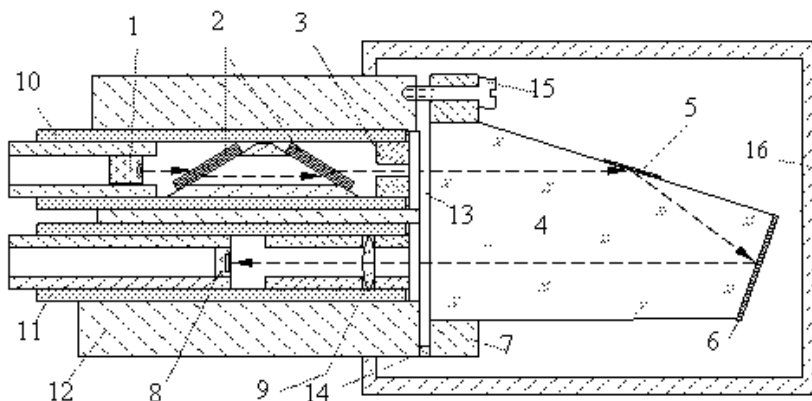


Рис. 24.9. Конструкция оптоэлектронной части ППР иммуносенсора для выявления заболевания коров на лейкоз

Осветительный и фотоприемный узлы смонтированы внутри подвижных поворотных цилиндров 10 и 11. Они размещены в параллельных цилиндрических каналах, образованных в металлическом корпусе 12, который объединяет их в отдельный конструктивный блок. Последний отделен от ретропризмы 4 с оправой 7 воздушным промежутком 13 шириной 2-3 мм. Упругая перемычка 14 и микрометрический винт 15 позволяют регулировать угол падения света на ретропризму в пределах приблизительно $\pm 2,50$ (при изготовлении). Для защиты от загрязнений, механических повреждений и влияния внешнего света при хранении, перевозке и во время измерений узел анализа пробы закрывают непрозрачной крышкой 16.

В этом ППР иммуносенсоре применен полупроводниковый лазер KLM-650/3 с углом расхождения светового пучка менее 0,04 deg, мощностью ~ 3 мВт, с длиной волны $\lambda = 650$ нм и монохроматичностью $\Delta\lambda = 0,5$ нм.

На рис. 24.10 показан внешний вид ППР иммуносенсора со стороны грани призмы, на которой установлен "рецепторный" чип 3 с пленкой золота.

При регулировании угла падения света на ретропризму световые пучки, которые входят и выходят из нее, остаются параллельными. Благодаря параллельности оптических осей фотоприемного и осветительного узлов они всегда попадают на фотоприемник.

В процессе работы грань ретропризмы, на которую устанавливают рецепторный чип, размещается горизонтально. Перед измерением на рецепторные чипы (вне ППР сенсора) наносят каплю контролируемого молока и выдерживают в течение заданного времени, требуемого для химического присоединения ретровирусов лейкоза к специфичным к ним антителам, нанесенным на рецепторный чип. Время выдерживания составляет от 2 до 20 мин. в зависимости от активности нанесенного на чип лиганда и от температуры. "Созревший" рецепторный чип ставят на рабочее место в ППР сенсоре, смоченное иммерсионной жидкостью, и проводят измерение. На это требуется 10-30 с. Потом в ППР иммуносенсор ставят следующий "созревший" рецепторный чип и проводят его измерение. Можно выполнить до 100 анализов за час.

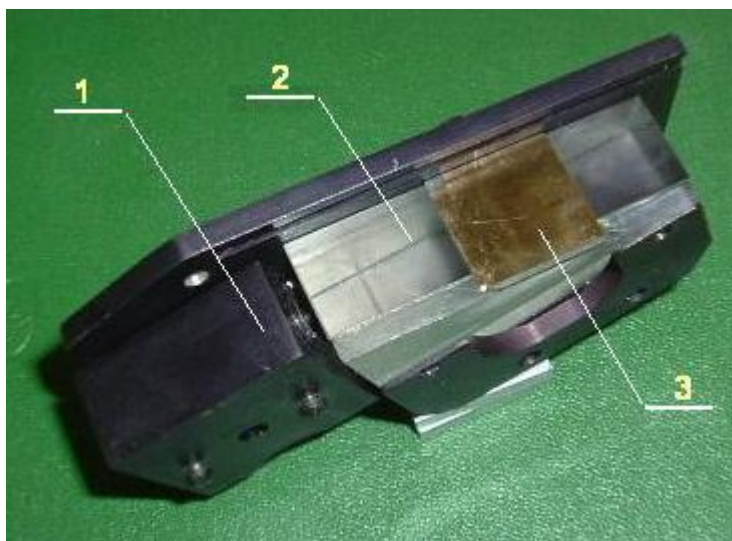


Рис. 24.10. Вид ППР иммуносенсора лейкоза коров сверху: 1 – поворотный блок с лазером и фотоприемником; 2 – призма; 3 – рецепторный чип с золотой пленкой

В данном иммуносенсоре полная кривая ППР не снимается. Проводится лишь 3-кратное измерение интенсивности отраженного света при фиксированном угле падения. Принцип измерения объясняется на рис. 24.11, где показаны две кривые ППР. Кривая 1 получается при нанесении на рецепторный чип "чистого" (т.е. без вирусов) молока. При угле падения θ_0 , с которым работает прибор, интенсивность отраженного света I_0 , приходящего на фотодетектор 3, является минимальной. Если же исследуемое молоко содержит определенное количество вирусов, то кривая ППР смещается, например, как показано штриховой линией (кривая 2). Минимум кривой теперь находится при угле θ_1 . Поэтому при неизменном угле падения θ_0 интенсивность отраженного света I_0 становится уже значительно большей. И чем больше ретровирусов находится в исследуемом молоке, тем больше будет сигнал от фотодетектора. Таким образом, измеряя этот сигнал, можно строить заключения относительно наличия и концентрации в молоке ретровирусов лейкоза.

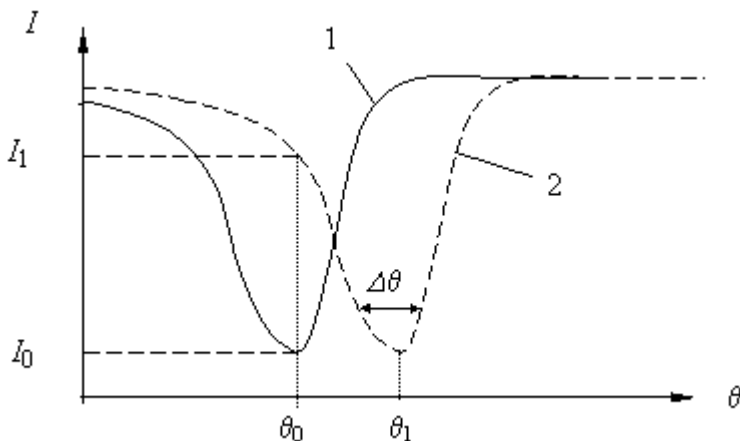


Рис. 24.11. Объяснение принципа действия сенсора: 1 - кривая ППР для "чистой" пробы; 2 - кривая ППР в случае наличия в молоке ретровирусов лейкоза

Сделав измерение "эталонных" растворов с известными концентрациями аналита, можно проградуировать прибор, т.е. найти зависимость между концентрацией вирусов лейкоза и величиной сигнала от фотодетектора. Эта зависимость запоминается в

микропроцессоре, и с его помощью выдаются на индикатор портативного прибора результаты анализа.

Выше отмечалось, что в полевых условиях из-за наличия пыли неопределенность положения рецепторного чипа относительно грани призмы составляет примерно $\pm 0,3 \text{ deg}$. Связанные с этим погрешности показаны на рис. 24.12.

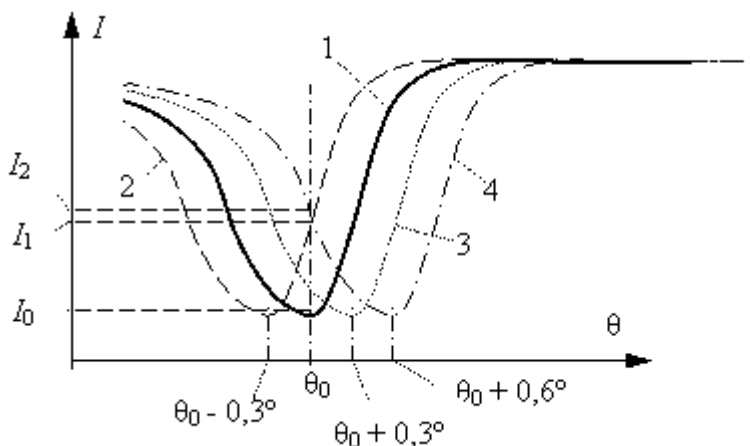


Рис. 24.12. Смещение кривой ППР в зависимости от ориентации рецепторного чипа: 1 – кривая ППР при точной ориентации чипа; 2 – при отклонении на $-0,3$; 3 – при отклонении на $+0,3$; 4 – при отклонении на $+0,6$

Кривая 1 наблюдается при точной ориентации. При отклонении ориентации рецепторного чипа от этой точной на $-0,3 \text{ deg}$ будет фактически регистрироваться кривая 2, при отклонении на угол $+0,3 \text{ deg}$ (в другую сторону) – кривая 3, при отклонении на угол $0,6 \text{ deg}$ – кривая 4. В случае точной ориентации рецепторного чипа измеряется интенсивность отраженного света I_0 . При неконтролируемом отклонении ориентации чипа на $-0,3 \text{ deg}$ измеряется интенсивность I_1 . Поэтому, в диапазоне интенсивностей от I_0 до I_1 мы не можем определить, с чем связано увеличение интенсивности: со сдвигом кривой ППР из-за наличия вирусов лейкоза или с отклонением в ориентации рецепторного чипа. Это означает, что те концентрации аналита, которые приводят к сдвигу кривой ППР на углы, меньше $0,3$

deg, лежат уже за пределом чувствительности ППР сенсора. Лишь когда измеренная интенсивность отраженного света будет больше чем I_1 , мы можем быть уверены, что в контролируемом молоке находятся вирусы лейкоза.

Таким образом, случайный угол отклонения в ориентации чипа ограничивает порог чувствительности ППР иммуносенсора.

Когда измеренная интенсивность отраженного света превышает значение I_2 , то мы можем быть уверены в том, что концентрация ретровирусов лейкоза превысила уже двойную пороговую концентрацию. Но чему именно равна концентрация, – сказать нельзя. Поэтому при наличии неконтролируемых отклонений в ориентации съёмных рецепторных чипов в пределах $\pm 0,3$ deg ППР иммуносенсор можно использовать только как сенсор-индикатор наличия лейкоза. Он способен определить наличие вирусов лейкоза с концентрацией, выше пороговой и с концентрацией, выше двойной пороговой.

Положительными чертами описанного ППР иммуносенсора являются его небольшие габариты и возможность его настройки на обнаружение в жидкости и других вирусов или на другие анализы, – путем использования других специфических рецепторных чипов с другими специфическими антителами и регулирования угла падения света на ретропризму.

24.4. Волоконно-оптические ППР сенсоры

Интересным видом ППР сенсоров являются волоконно-оптические ППР сенсоры. На рис. 24.13 показан один из вариантов такого сенсора. На оптическом волокне, которое состоит из сердцевинки ("кern") 1 с высоким показателем преломления и оболочки 2 с меньшим показателем преломления, в месте расположения чувствительного узла верхнюю часть оболочки волокна удаляют (механически – шлифованием и полировкой или химически – путем вытравливания). На это место специальным оптическим клеем приклеивают чувствительный ППР чип, который состоит из стеклянной основы 4, тонкой плёнки золота 5 и слоя лиганда 6 (рис. 24.13 а). Этот чип во время наблюдений приводится в контакт со средой, в которой могут находиться частички аналита 7.

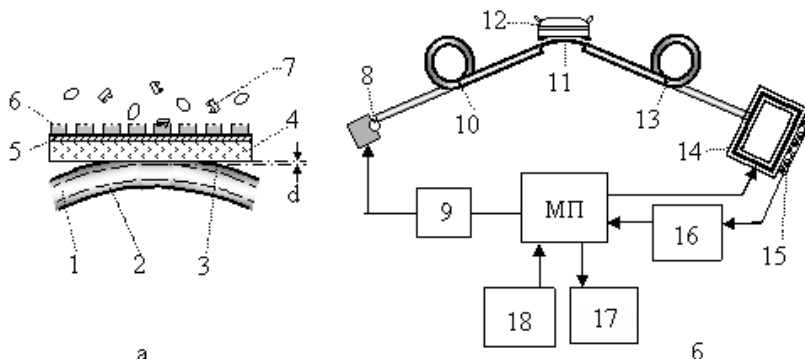


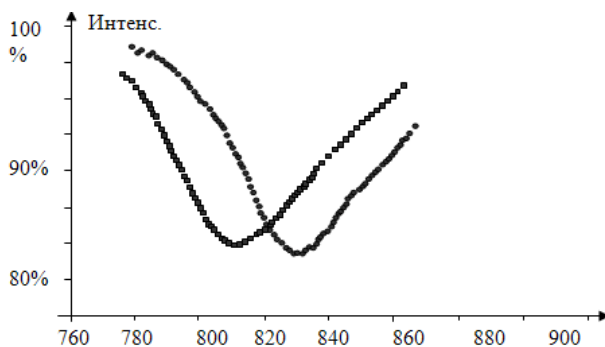
Рис. 24.13. Один из вариантов волоконно-оптического ППР сенсора

На рис. 24.13, б приведена функциональная схема интеллектуального волоконно-оптического ППР сенсора. Используется источник света 8 с относительно широкой спектральной полосой (≈ 200 нм), излучение которого модулируется модулятором 9 под управлением микропроцессора МП. Через входное оптическое волокно 10 свет направляется к точке контроля, в которой расположен чувствительный узел 11. Он или непосредственно находится в контролируемой среде, или на него устанавливают миниатюрную проточную ячейку 12, сквозь которую прокачивают контролируемую жидкость или газ. Отраженный от чувствительной поверхности свет через оптическое волокно 13 передается в спектральный узел 14. Под управлением микропроцессора он поочередно пропускает на фотоприемник 15 спектральные компоненты с разной длиной волны. Электрические сигналы от фотоприемника 15 усиливаются и демодулируются в приемном узле 16 и с помощью АЦП превращаются в цифровой код, который передается в микропроцессор и запоминается. Когда спектр сигнала, который прошел через оптическое волокно, полностью снят, микропроцессор обрабатывает его, определяет спектральное положение минимума ППР и запоминает вместе с моментом времени, когда снимался спектр. Через заданные пользователем интервалы времени измерения автоматически повторяются. И на дисплей 17 может быть выведена не только спектральная зависимость оптического сигнала в определенный момент времени, но и сенсограмма – зависимость положения минимума ППР от времени. На этой сенсограмме могут быть зарегистрированы изменение показателя преломления контролируемой среды, появление в ней частиц аналита, кинетика процессов

связывания этих частиц с лигандом. Может быть вычислена концентрация аналита и т.п. В сенсоре может быть не одно оптическое волокно, а несколько – с чувствительными узлами, настроенными на разные аналиты, которые могут быть расположены рядом или в разных точках контролируемого объекта. Микропроцессор может организовать наблюдение за каждой точкой и выполнять соответствующую комплексную диагностику.

На примере лиганда из антител к человеческому иммуноглобулину (Ig) была продемонстрирована чувствительность к появлению Ig в контролируемой жидкости на уровне 40 нг/мл и показано, что она может быть повышена до 1 нг/мл. Т.е. чувствительность оказалась не хуже, чем в обычных ППР сенсорах с призмами.

Показано, что при оптимально подобранных толщине пленки золота и расстоянии d между керном волокна и стеклянной основой рецепторного чипа наблюдается четкий минимум в спектре света, прошедшего через такое оптическое волокно (рис. 24.14). Положение минимума ППР существенно зависит от показателя преломления среды, с которой контактирует чувствительная поверхность. Чувствительность довольно хорошая – примерно 3100 нм на единицу показателя преломления. Разрешающая способность 5×10^{-7} от единицы показателя преломления.



Зависимость интенсивности света, прошедшего сквозь оптическое волокно, от длины волны при двух разных показателях преломления жидкости, в которую погружен чувствительный узел волоконно-оптического ППР сенсора:

■ – $n = 1,3291$; ● – $n = 1,3351$ (см. цветную вкладку).

Рис. 24.14.

Описан, волоконно-оптический ППР сенсор для определения концентрации в свежих фруктах или соках нарингина – вещества, придающего горький привкус цитрусовым. В качестве специфически чувствительного лиганда использован естественный фермент нарингиназа. Чувствительный узел с помощью полой иглы можно вводить вглубь фрукта, или опускать во фруктовый сок либо в измельченную массу. Оперативный текущий контроль концентрации нарингина позволил значительно повысить качество и улучшить вкус изделий из цитрусовых.

Сообщается об экспериментальном волоконно-оптическом ППР сенсоре, в котором плёнка золота настолько тонка, что имеет "островковый" характер и состоит из отдельных наночастиц. Оптическое волокно работает на отражение, т.е. чувствительный узел делают на очищенном от оболочки кончике волокна или после чувствительного узла торец волокна делают зеркальным, так что свет возвращается назад по тому же волокну, по которому он пришёл. ППР наблюдается в виде минимума на графике зависимости интенсивности отраженного света от длины волны. Положение минимума зависит от показателя преломления среды, находящейся в контакте с чувствительной поверхностью. Например, после осаждения на чувствительную поверхность соответствующих лигандов она становилась избирательно чувствительной к стафилококковому энтеротоксину В, к стрептавидину или к ионам Ni^{2+} .

Краткие итоги

Важной тенденцией развития ППР сенсоров стала разработка ППР сенсоров массового применения. Одной из вех на этом пути было создание микроэлектронных ППР сенсоров семейства Spreeta. В монолитный модуль размерами 41,4x29x13,5 мм интегрированы светодиод, поляризатор, зеркально отражающий слой, линейка из 128 фотодетекторов, 128-разрядный регистр сдвига и электрически программируемая память на 4 К. Модуль залит прозрачным компаундом с высоким показателем преломления, который заполимеризован и функционирует в качестве призмы. На одну из её граней нанесена золотая пленка. Модуль рассчитан на то, что к его чувствительной поверхности извне герметически присоединяется проточная ячейка. С помощью таких модулей можно строить разнообразные ППР сенсоры.

Однако технология измерений с применением проточной ячейки, удобная для научных исследований, оказалась не очень пригодной для массовых применений. Значительно более перспективной для этих целей является технология съемных рецепторных чипов, которые устанавливаются на рабочую поверхность ППР сенсора только на время измерения. Для обеспечения хорошего оптического контакта используют иммерсионную жидкость. Такая технология обеспечивает высокую производительность, быстроту и дешевизну анализов. Специфические процессы отмывания, регенерации и предварительного контроля рецепторных чипов могут проводиться в спецлабораториях с применением групповых технологических процессов. Разработаны также способы минимизации вредного влияния запыленности при эксплуатации ППР сенсоров в полевых условиях.

Одним из примеров портативного интеллектуального ППР сенсора для массовых анализов является ППР иммуносенсор для выявления заболевания коров на лейкоз. Для обнаружения в молоке коровы ретровирусов лейкоза применяются рецепторные чипы, на которые нанесены антитела, специфичные к этим вирусам, взятые из сыворотки больных коров. Сенсор рассчитан на применение на фермах и в домашних хозяйствах, в приемных пунктах молока, требует для анализа лишь каплю молока и обеспечивает производительность до 100 анализов/час. При использовании чипов с рецепторным слоем, специфичным, скажем, к туберкулезным палочкам или к вирусам человеческого гепатита, такой же сенсор можно использовать и для экспресс-контроля и на эти заболевания молока коров, питьевой воды, напитков.

Интересным видом ППР сенсоров стали также волоконно-оптические ППР сенсоры. Чувствительный элемент на основе ППР с помощью оптического волокна может быть "вынесен" в них на значительные расстояния. "Зондирующие" импульсы поляризованного света и отраженные от чувствительной поверхности сигналы ППР передаются в этих сенсорах по оптическому волокну. Они позволяют регистрировать изменения показателя преломления контролируемой среды, появление в ней частиц аналита, кинетику процессов связывания этих частиц с лигандом. Сенсор может использовать не одно оптическое волокно, а несколько – с чувствительными узлами, настроенными на разные аналиты. Эти узлы могут быть расположены рядом или в разных точках контролируемого объекта. Микрокомпьютер может организовать наблюдение за каждой точкой и

выполнять соответствующую комплексную диагностику, выдавать предупредительные сигналы.

25. Элементная база интеллектуальных сенсоров. Часть 1

25.1. Электронные усилители

В этой и в следующей лекции мы рассмотрим принципы построения некоторых основных узлов интеллектуальных сенсоров. Их принято называть "элементной базой". В объём этого понятия входят: чувствительные элементы, усилители, типовые схемы сравнения, АЦП, микрокомпьютеры, узлы взаимодействия с пользователем (клавиатура, дисплей), внутренняя память, внешний интерфейс и т.д., – из которых и строятся интеллектуальные сенсоры.

Сенсоры, в которых получаемые от чувствительных элементов (первичные) сигналы достаточно велики и не нуждаются в усилении, уже давно разработаны. Во вновь создаваемых сенсорах сигналы на выходах чувствительных элементов, как правило, очень слабы и не превышают нескольких милливольт или микровольт, нескольких наноампер или даже пикоампер. Поэтому обычно требуется усиление до 100000 раз по напряжению и даже в миллионы раз по электрическому току. Как правило, требуется не только усиление, но и согласование импедансов, улучшение соотношения сигнал/шум, иногда также электрическая изоляция ("развязка") чувствительных элементов и т.п.

Еще во времена, когда элементная база электроники состояла из отдельных транзисторов, резисторов, фотодиодов, конденсаторов, катушек индуктивности, был разработан ряд стандартных схем усиления для работы с типичными чувствительными элементами. Теперь все такие усилители выполняют в виде монолитных интегральных схем на одном кристалле или в виде гибридных интегральных схем на общей подложке в одном корпусе. В технической документации к ним и в справочниках, как правило, приводятся исчерпывающие технические характеристики усилителей и типовые схемы их подключения, принципы расчета параметров при решении разнообразных схемотехнических задач.

25.1.1. Операционные усилители

Одним из наиболее употребительных в сенсорике классов интегральных усилителей являются так называемые " операционные усилители " (ОУ). В электрических схемах их изображают в виде треугольника с двумя входами: "инвертирующим", который отмечают знаком "-", и "неинвертирующим", который отмечают знаком "+" (рис. 25.1, а).

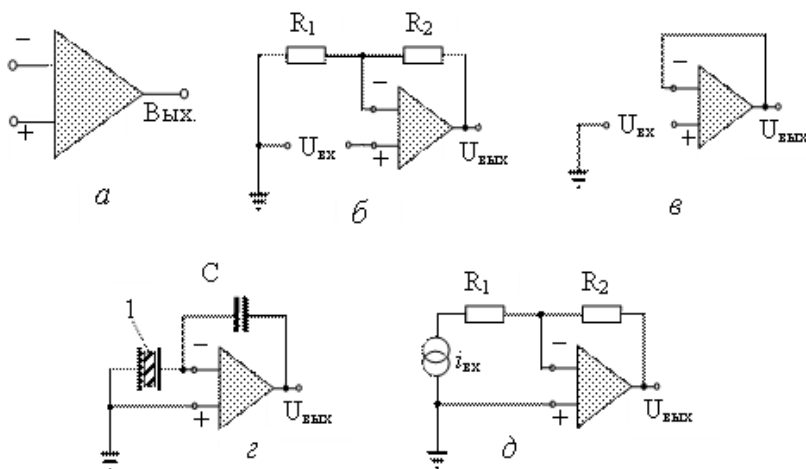


Рис. 25.1. Изображение операционного усилителя и основные режимы его использования

Операционный усилитель имеет высокий коэффициент усиления (105–106 и даже выше), низкий коэффициент собственного шума, широкий частотный диапазон, большое входное и малое выходное сопротивление, может надежно работать с электрическими емкостями. ОУ почти не чувствителен к синфазным помехам, которые действуют одновременно на оба его входа, малочувствителен к помехам по шине питания.

На рис. 25.1рис. 25.1 показаны типовые схемы использования ОУ. В неинвертирующих усилителях сигналов (рис. 25.1, б) с помощью резисторов R_1 и R_2 организуют цепь обратной связи. Этим обеспечивается точное значение коэффициента усиления

$$K=1+R_2/R_1 \quad (25.1)$$

который является постоянным в широком частотном диапазоне и при изменениях температуры, если резисторы R_1 и R_2 сделаны из одного материала. От глубины обратной связи зависят также линейность и выходной импеданс усилителя. В случае 100%-й обратной связи (рис. 25.1, в) ОУ работает как повторитель напряжения: коэффициент усиления напряжения практически равен 1, а коэффициент усиления тока может быть очень высоким (до 10^6 и выше). Такая схема является также преобразователем импеданса, так как имеет высокий входной и малый выходной импеданс.

На рис. 25.1, г показан "зарядовый" усилитель, предназначенный для восприятия очень слабых сигналов от емкостных элементов, когда электрический заряд изменяется на единицы пикокулона (10^{-12} Кл) или скорость изменения заряда составляет порядка единиц пикоампера (10^{-12} А). Это по сути преобразователь малых изменений электрического заряда в заметные изменения напряжения на выходе ОУ с чувствительностью до 1 В/пКл. Цепь обратной связи замыкается здесь через конденсатор C , который должен быть высококачественным и иметь очень большое сопротивление стеканию электрических зарядов.

Слабые сигналы от тех чувствительных элементов, которые действуют подобно к источнику тока, например, от фотодиодов, усиливают с помощью типовой схемы, показанной на рис. 25.1, д. Чувствительный элемент в такой схеме работает при почти нулевой и почти неизменной разности потенциалов, а напряжение на выходе

$$U_{вых} = -i_{вх} R_2 \quad (25.2)$$

Для надежной работы схемы номинал резистора R_2 должен быть намного больше, чем номинал резистора R_1 .

Операционные усилители реализуют как на биполярных, так и на комплементарных полевых транзисторах со структурой "метал - диэлектрик - полупроводник" (КМДП). Имеются и смешанные "биполярно-полевые" варианты ОУ, где полевые транзисторы используют лишь на входе для обеспечения высокого входного сопротивления и малого входного тока.

Идеальный ОУ имел бы бесконечный коэффициент усиления по напряжению, бесконечно большое входное и нулевое выходное сопротивление, неограниченный диапазон частот усиливаемых сигналов, независимость от температуры и других внешних воздействий. В реальных ОУ не удается одновременно приблизиться ко всем идеальным параметрам. Поэтому наряду с ОУ широкого потребления, которые выпускаются многомиллионными тиражами, и в которых в равной мере оптимизированы одновременно все параметры, ныне разработаны и выпускаются также ОУ специальных типов с оптимизацией одного-двух важнейших параметров:

- *прецизионные (или высокоточные) ОУ*, в которых минимизируются напряжение смещения $U_{см}$ (разность потенциалов на входах в мкВ, при которой выходное напряжение точно равно нулю) и его долговременный и температурный дрейф (в мкВ/месяц и мкВ/ deg C); стараются сделать максимальными коэффициент усиления напряжения (1 В/мкВ и выше), коэффициенты подавления синфазных помех (КПСИ) и помех по шинам питания;
- *быстродействующие ОУ*, в которых стремятся сделать наибольшими предельную частоту усиления $f_{гр}$ (на которой коэффициент усиления уменьшается на 3 дБ по сравнению с максимальным значением на средних частотах), скорость роста выходного напряжения (В/мкс) и минимизировать время установления (время, на протяжении которого после изменения входного напряжения устанавливается новое стационарное значение выходного напряжения с точностью до 0,1%);
- *ОУ с минимальным потреблением мощности*, в которых при сохранении функциональных параметров максимально уменьшают ток потребления от источника питания и рассеиваемую мощность;
- *ОУ с минимальным собственным шумом*, в которых стремятся по возможности уменьшить приведенные ко входу среднеквадратичные напряжение и ток шума (в нВ/Гц^{1/2} и пА/Гц^{1/2});
- *мощные ОУ*, в которых для непосредственного управления каким-либо сигнализатором или актуатором обеспечивают большой выходной ток, малое выходное сопротивление, большую суммарную выходную мощность, устойчивость против короткого замыкания выхода.

Основные параметры некоторых типов ОУ приведены в табл. 25.1.

Таблица 25.1. Основные параметры некоторых типов операционных усилителей					
Основные параметры	Примеры ОУ широкого применения				
	140УД6	140УД7	140УД8	LF441	
Напряжение питания, В	5 –	5 –	5 –	5 –	
	18	18	18	18	
Коэффициент усиления, В/мВ	50	50	50	50	
КПСП, дБ	70	70	80	70	
, мВ	6	4	20	5	
Входной ток, нА	50	200	0,2	0,1	
Входное сопротивление, МОм	3	0,4	1000	-	
	1	0,8	1	4	
, МГц					
Скорость роста, В/мкс	2,5	0,7	5	15	
Ток питания, мА	4	3	5	0,25	
Максимальный выходной ток, мА	5	5	5	4	
Выходное сопротивление	150	150	200	-	
	, Ом				
Основные параметры	Примеры прецизионных ОУ				
	140УД21	MAX400	ICL7652	OPA177	LMC6001
Напряжение питания, В	12 –	3 –	2,5	15	5 –

	20	18	– 8		15	
Коэффициент усиления, В/мВ	1000	1000	6000	3000	5000	
КПСП, дБ	120	120	120	-	75	
, мВ	0,05	0,01	0,005	0,01	0,35	
Входной ток, нА	1	1	0,03	1,5	25 фА	
Входное сопротивление, МОм	-	60	-	-	>1 ТОм	
, МГц	3	0,6	0,45	0,4	1,3	
Скорость роста, В/мкс	2,5	0,3	0,6	0,1	1,5	
Ток питания, мА	5	-	2	-	0,75	
Максимальный выходной ток, мА	-	5	-	12	20	
Выходное сопротивление, Ом	-	60	-	-	-	
Основные параметры	Примеры быстродействующих ОУ					
	574УД3	154УД4	SL2541 В	MAX43 7	ОРА641	AD805 5
Напряжение питания, В	5 – 16,5	5 – 17	7 – 15	4,5 – 18	5 – 15	5
Коэффициент усиления, В/мВ	50	8	10	7000	1	3
КПСП, дБ	80	70	47	112	-	82
, мВ	2	6	10	0,015	2	5

Входной ток, нА	0,3	1200	10000	35	-	1000
Входное сопротивление, МОм	1000	1	-	-	-	10
, МГц	15	30	800	60	800	300
Скорость роста, В/мкс	50	400	900	15	650	400
Ток питания, мА	3,5	7	25	4	-	5
Максимальный выходной ток, мА	5	5	10	15	55	60
Выходное сопротивление, Ом	-	-	-	70	-	-

Основные параметры	Примеры ОУ с минимальным потреблением				
	MAX438	MAX480	MAX406	AD8541	140УД12
Напряжение питания, В	3 – 5	0,8 – 18	2,5-10	2,7-5,5	1,5 – 18
Коэффициент усиления, В/мВ	6	1000	1000	300	50
КПСП, дБ	90	190	80	80	70
, мВ	0,5	0,075	0,5	5	5
Входной ток, нА	2	3	0,0001	0,004	50
Входное сопротивление, МОм	90	30	-	-	50

, МГц	6	0,02	0,02	0,7	1
Скорость роста, В/мкс	10	0,01	0,02	0,7	0,8
Ток питания, мА	0,075	0,015	0,0012	0,04	0,03
Максимальный выходной ток, мА	3	1	-	25	2
Выходное сопротивление , Ом	-	-	-	-	1000

Просим принять во внимание, что ОУ, как и другие элементы микроэлектроники, все время совершенствуются, и приведенные данные относительно быстро могут устареть.

25.1.2. Дифференциальные усилители

Иначе устроены так называемые "дифференциальные" или "измерительные" усилители, которые промышленность тоже выпускает ныне в виде миниатюрных интегральных схем. Основная их функция – это формирование выходного сигнала, пропорционального разности напряжений на двух его входах

$$U_{\text{вых}} = K(U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}) = K \Delta U \quad (25.3)$$

Коэффициент усиления К у них обычно порядка 100–1000, чувствительность – несколько микровольт. Синфазные помехи, которые одновременно поступают на входы, ослабляются на 100–120 дБ.

Фирма Analog Device, например, выпускает отличные дифференциальные усилители AD8129, AD8350-20, AD8351 и AD8390 в корпусах типа SO-8, MSOP-10, LFCSP-16, QSOP-eпад-16 с шириной частотной полосы соответственно 200; 700; 3000 и 60 МГц (на уровне – 3 дБ), с плотностью собственного шума соответственно 4,5; 1,7; 2,7 и 8 нВ/Гц^{1/2}, которые могут питаться от напряжения 5-10 В и 10-24 В (AD8390).

25.1.3. Мостовые схемы

Дифференциальные усилители часто используют при работе с так называемыми "мостовыми схемами", которые называют еще "мостами Уинстона". Их применяют тогда, когда под действием изменений в контролируемом объекте или процессе чувствительный элемент изменяет свою электропроводность, емкость или индуктивность или в общем случае – свой электрический импеданс. Принципиальная электрическая схема моста Уинстона показана на рис. 25.2. Здесь $U_{оп}$ стабилизированный источник опорного (эталонного) напряжения. Импедансы Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 могут быть активными, реактивными или комплексными. Расчет показывает, что дифференциальное напряжение на выходе моста

$$U_{диф} = U_{оп} \left[\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right] \quad (25.4)$$

Оно равняется нулю, если мост "сбалансирован", т.е. когда выполняется соотношение

$$Z_1 / Z_2 = Z_3 / Z_4 \quad (25.5)$$

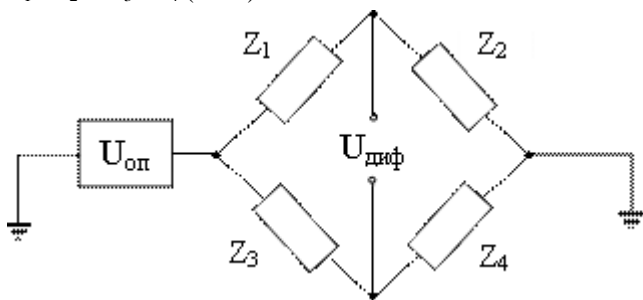


Рис. 25.2. Принципиальная электрическая схема моста Уинстона

При изменении импеданса любого из плеч моста его баланс нарушается, и на выходе появляется разность напряжений. На практике чаще всего изменяется лишь один импеданс – импеданс чувствительного элемента.

Для компенсации влияния таких внешних факторов, как температура, давление, сторонние электрические или магнитные поля часто

используют 2 одинаковых чувствительных элемента, которые симметрично включают в разные плечи моста (например, Z_1 и Z_3). Один из них "следит" за контролируемым объектом или процессом, а другой изолирован от него. Тогда все сторонние внешние факторы одинаково влияют на оба чувствительных элемента и не приводят к разбалансировке моста. Одинаково реагировать на изменения внешних факторов должны также импедансы Z_2 и Z_4 . С этой целью их обычно делают идентичными. Разбалансировка моста и выходное напряжение $U_{диф}$ определяются в таком случае лишь изменениями в контролируемом объекте или процессе.

Чтобы повысить линейность и точность сенсора, нередко используют автоматическую нуль-балансировку моста (рис. 25.3).

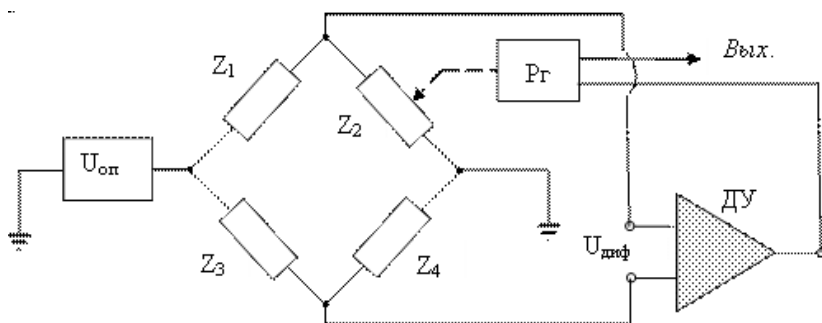


Рис. 25.3. Принцип автоматической нуль-балансировки моста: ДУ – дифференциальный усилитель; Рг – регулятор

Напряжение с выхода дифференциального усилителя ДУ подается на регулятор Рг, который в зависимости от знака этого напряжения может изменять величину импеданса Z_2 в ту или другую сторону. Лишь когда мост полностью сбалансирован, напряжение на выходе усилителя равно нулю, и импеданс Z_2 перестает изменяться. Регулятор Рг выдает на свой выход величину изменения импеданса Z_2 , которая пропорциональна изменению импеданса чувствительного элемента Z_1 .

Благодаря автоматической нуль-балансировке чувствительный элемент все время работает при неизменном напряжении, и никаких нелинейностей, связанных с изменением напряжения на нем, не возникает. В состав регулируемого импеданса Z_2 может входить, например, полевой транзистор, сопротивление которого изменяется

при изменении потенциала на "затворе". Регулятор может быть также оптоэлектронным (тогда в его состав входит светодиод, а в состав импеданса Z_2 – фоторезистор) или, скажем, магнитным (тогда в состав регулятора входит катушка подмагничивания, а в состав импеданса Z_2 – катушка индуктивности, намотанная на тот же магнитопровод).

В радиосенсорах широко используют ныне промышленные интегральные *усилители высокой, промежуточной и низкой частоты*. Они бывают узкополосными ("резонансные", настроенные на какую-то одну частоту) и широкополосными. В широкополосных усилителях коэффициент усиления остается приблизительно постоянным в довольно широком диапазоне частот. Выпускаются также микросхемы, в которых сформирован даже целый радиотракт (УВЧ, преобразователь частоты, УПЧ, демодулятор и УНЧ).

25.2. Шумы и борьба с ними

В тех случаях, когда сигналы от чувствительных элементов очень слабы или когда требуются максимальные чувствительность и разрешающая способность сенсора, тогда при выборе усилителей следует обратить особое внимание *на все возможные* источника шума. Под "*шумами*" понимают любые причины отклонения показаний сенсора от истинного значения, которые имеют стохастический (случайный, не предвиденный) характер. Шумы обычно делят на *собственные*, возникающие внутри самого сенсора, и *привнесенные*, поступающие извне.

Одной из причин возникновения собственных шумов является статистическая природа электрического заряда и тока. Электрический заряд – это всегда совокупность некоторого (обычно очень большого) количества элементарных электрических зарядов, которая не является постоянной. Ведь всегда возможны процессы случайной ионизации атомов и обратные процессы – рекомбинации электронов и ионов. Электрический ток – это суммарный результат как организованного, так и хаотического теплового движения многих свободных электрических зарядов в электрическом и магнитном поле. Даже обычный резистор является источником теплового шума и представляет собой генератор слабых случайных электрических сигналов.

Частотный спектр теплового шума очень широк. Обычно его считают "белым" шумом, т.е. равномерно распределенным по всем частотам. Среднеквадратичное значение напряжения теплового шума на резисторе номиналом R определяется по известной формуле

$$U^2_{ТШ} = 4kTR\Delta f \text{ (В}^2\text{)} \quad (25.6)$$

где $k=1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, Δf – частотный диапазон работы электронной схемы (в Гц). Например, при температуре 27 degC ($T = 300$ К) на входном сопротивлении $R= 10$ МОм при частотном диапазоне $\Delta f = 1$ кГц = 1000 Гц среднеквадратичное значение напряжения теплового шума составляет приблизительно 6,4 мкВ. Как видим, следует оптимально выбирать электрическое сопротивление чувствительного элемента, входное электрическое сопротивление усилителя и его частотный диапазон.

В p - n -переходах полупроводников, где имеется обедненная носителями заряда область, имеют место значительные тепловые флуктуации концентрации этих носителей, из-за чего возникают и флуктуации силы тока. В конденсаторах имеют место флуктуации величины электрического заряда. Такой шум называют "дробовым". Среднеквадратичное значение дробовых флуктуаций тока оценивается по формуле

$$i^2_{дш} = 3,25 \times 10^{-7} I \Delta f \text{ (пА}^2\text{)} \quad (25.7)$$

где I – ток через p - n -переход в пикоамперах, Δf – частотный диапазон электронной схемы в Гц. Например, при токе $I= 1$ мА = 10^9 пА и $\Delta f = 104$ Гц среднеквадратичный дробовый ток $i_{дш} \approx 5,7$ нА.

Значительный вклад в собственные шумы могут давать ненадежные электрические контакты и паразитные токи через загрязненную поверхность печатных плат и корпусов электронных элементов. Поэтому обеспечение высокой надежности соединений и сведение к минимуму всех паразитных связей являются обязательными требованиями к технологии интеллектуальных сенсоров.

Источниками *привнесенных* шумов могут быть:

- помехи по сети питания;

- внешние электростатические, магнитные и электромагнитные поля;
- проникающие ионизирующие излучения;
- вибрации, механические ускорения и перемещения;
- изменения температуры, влажности, давления, и т.п.

Привнесенные шумы могут иметь характер периодических, повторяющихся нерегулярно или импульсных помех и могут быть также случайными. Для уменьшения влияния внешних помех и привнесенных шумов применяют экранирование, развязки электрических схем, фильтрацию, источники питания с малым шумом, оптимальное расположение проводников, защиту от механических вибраций и резонансных явлений. Применению этих средств должно предшествовать внимательное изучение реального влияния каждого из возможных видов привнесенных шумов и экспериментальная проверка действительности каждого из предлагаемых средств.

Избегайте ошибочного заземления экранов в нескольких точках. На рис. 25.4 объясняется, почему этого нельзя делать. Здесь изображены центральная жила экранированного кабеля, его экран, чувствительный элемент (ЧЭ) и входное сопротивление схемы, подключенной к выходу кабеля. Экран "для надежности" заземлили в двух точках *A* (рядом с чувствительным элементом ЧЭ) и *B* (возле входа усилителя).

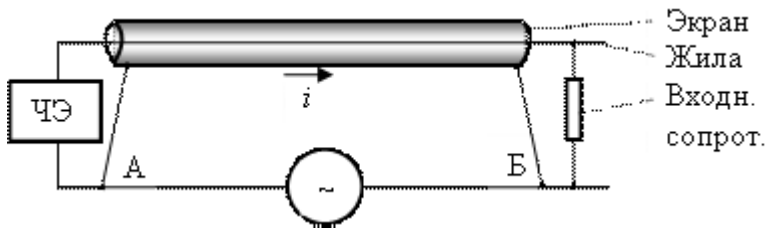


Рис. 25.4. Ошибочное заземление экрана

Но между ними в результате внешних воздействий может возникать небольшая переменная разность потенциалов. В силу этого вдоль экранной оболочки кабеля течет переменный ток i , который посредством электромагнитной индукции будет наводить переменный ток также и в центральной жиле (или жилах) кабеля. А он вызовет привнесенное шумовое напряжение на входном сопротивлении

электронной схемы, подключенной к выходу кабеля. Поэтому экраны должны быть заземлены лишь в одной точке, желательно со стороны источника сигналов.

Эффективным методом борьбы с помехами и привнесенными шумами является также использование дифференциальных пар: вместо одного используют 2 рядом расположенных идентичных чувствительных элемента. Один из них находится в контакте с контролируемым объектом или процессом, а другой изолирован от его влияния. Этот другой чувствительный элемент называют "опорным" или "референтным". Внешние помехи и привнесенные шумы действуют на оба канала (опорный и измерительный) одинаково. На выходах каналов (до или после предварительного усиления) сигналы вычитаются, благодаря чему привнесенные шумы взаимно компенсируются.

25.3. Аналого-цифровые преобразователи

В интеллектуальных сенсорах значительная часть обработки информации происходит в цифровой форме. Поэтому почти всегда их составными элементами являются аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Их задача – превратить усиленные аналоговые сигналы от чувствительных элементов в цифровые данные для микрокомпьютера. Важнейшими характеристиками АЦП являются их точность, быстродействие и стоимость.

Точность связана с разрядностью АЦП. Дело в том, что аналоговый сигнал на входе АЦП превращается в двоичный цифровой код на выходе, т.е. АЦП является измерителем величины аналогового сигнала с точностью до половины самого младшего разряда. Поэтому, скажем, 8-разрядный АЦП обеспечивает точность преобразования не выше, чем $2^{-9} \approx 0,002 = 0,2\%$ от максимально возможного значения. 10-разрядный АЦП обеспечивает точность преобразования не выше, чем $2^{-11} \approx 0,0005 = 0,05\%$, 14-разрядный – точность не выше $2^{-15} = 1/32768 \approx 0,003\%$, а 16-разрядный – не выше $2^{-17} \approx 0,0008\%$ от максимально возможного значения.

Быстродействие АЦП характеризуют промежутком времени, требуемым для выполнения одного преобразования, или количеством возможных преобразований за единицу времени (частотой преобразований).

Обычно чем выше точность (разрядность) АЦП, тем ниже его быстродействие, и чем выше точность и быстродействие, тем выше и стоимость АЦП. Поэтому, проектируя интеллектуальный сенсор, надо правильно подбирать его параметры.

АЦП ныне строят по разным схемным принципам и выпускают в виде как отдельных интегральных микросхем, так и в виде узлов более сложных схем (например, микроконтроллеров).

Только фирма Texas Instruments, например, выпускает десятки разных типов АЦП с разрядностью от 8 до 24 двоичных разрядов (по "дельта-сигма"-схеме), с быстродействием от 15 до 190 000 000 преобразований в секунду, с последовательным или параллельным выходом, на разные напряжения питания в разных корпусах, от 1 до 8 каналов в одном корпусе, – выбор вариантов АЦП очень широк.

25.4. Микрокомпьютеры

"Мозгом" интеллектуального сенсора является микрокомпьютер (микропроцессор, микроконтроллер, микроконвертор). Каждый из них – это настоящее чудо современной электронной техники, универсальный преобразователь информации. Именно он и позволяет сделать сенсор "умным", интеллектуальным.

Термин " микрокомпьютер " ныне не является однозначно определенным. Микрокомпьютерами называют сейчас и маленькие карманные персональные компьютеры, микрокалькуляторы и любые другие информационные устройства малых размеров, выполненные на базе микропроцессоров. В данной работе термином " микрокомпьютер " мы обозначаем универсальный преобразователь информации, выполненный на одном кристалле или в виде одной микросхемы, который является "алгоритмически полным", т.е. теоретически по соответствующей программе может выполнять любые преобразования информации.

" Микропроцессор " – это сформированное на одном кристалле или в виде одной микросхемы устройство для обработки информации, не обязательно универсальное. Он может быть специализирован на эффективное быстрое выполнение лишь какого-то одного класса функций, например, лишь на распознавание слов-паролей или правильности формата сообщения, на перекодировку сигналов, на их

специализированное форматирование. Микропроцессор не обязательно должен иметь внутреннюю память программ или узлы приема и выдачи данных, – он должен лишь обрабатывать, преобразовывать данные, выполнять над ними определенные операции.

" Микроконтроллер " – это выполненное на одном кристалле или в виде одной микросхемы устройство для переработки информации и автоматического управления на основе этой информации разными устройствами. В его состав обязательно входят память программ и данных, узлы приема и выдачи данных, таймеры, часто АЦП, ЦАП и т.п.

" Микроконвертор " – это выполненная в виде микросхемы комплектная система сбора и обработки данных, состоящая из аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, эталонных источников напряжения, датчика температуры, таймеров, монитора источника питания, встроенного микроконтроллера и имеющая значительный объем памяти данных, памяти программ и т.п.

25.4.1. 4-разрядные микроконтроллеры

Электронная промышленность выпускает ныне сотни разных типов микрокомпьютеров, микропроцессоров, микроконтроллеров, микроконверторов. В интеллектуальных сенсорах чаще всего используют микроконтроллеры и микроконверторы. Для простейших применений популярными являются малопотребляющие 4-разрядные микроконтроллеры семейства MARC4 фирмы Atmel. В них на одном кристалле вместе с микропроцессором сформированы память программ на 8К, 256 бит статической памяти данных, энергонезависимая память данных EEPROM, параллельные порты приема/выдачи данных, 8-разрядные таймеры/счетчики, тактовый генератор, супервизор напряжения, синхронный последовательный интерфейс. Встроенный контроллер прерываний имеет несколько уровней приоритета и позволяет быстро обслуживать до 14 запросов на прерывание. Микроконтроллеры этого семейства выпускаются в двух версиях. Микросхемы T48Cх9х (МТP/Flash версия) используют в экспериментальных и исследовательских образцах сенсоров, поскольку эти микроконтроллеры позволяют относительно легко изменять программу своей работы без снятия с платы сенсора. А для серийного выпуска используют аналогичные микросхемы M44Cх9х –

Н/М44Сх9х-V (ROM версия), заметно более дешевые, в которые программа работы записывается при изготовлении раз навсегда.

25.4.2. 8-разрядные микроконтроллеры

Но наиболее широкое применение находят 8-разрядные микроконтроллеры архитектуры C51, разработанной в свое время фирмой Intel. Основными производителями таких микроконтроллеров на мировом рынке являются фирмы Philips, Atmel, Siemens, Intel, Winbond, Dallas, OKI, Cygnal и прочие.

Например, микроконтроллер MSP430F449 фирмы Texas Instruments очень хорошо приспособлен для использования в портативных приборах. Он имеет малые габариты. Напряжение питания может колебаться в широких пределах – от 1,8 до 3,6 В, а ток питания составляет 0,25 мА в активном режиме (в "экономном" режиме лишь 1 мкА). Микроконтроллер MSP430F449 имеет в своем составе 12-разрядный АЦП и может выполнять до 4 млн. операций за секунду, что обеспечивает высокие точность и темп измерений. Имеется и внутренняя энергонезависимая память объемом 60 килобайт, которой достаточно для сохранности результатов тысяч измерений.

Из большой номенклатуры 8-разрядных микроконтроллеров можно выбрать оптимальный для каждого применения вариант с требуемой тактовой частотой (от единиц до сотен МГц), с нужными объемом и типом памяти программ и данных (оперативная, постоянная, электрически программируемая, флэш, энергонезависимая, и т.п.), количеством внешних выводов, с нужным количеством встроенных АЦП, таймеров/счетчиков, узлов внешнего интерфейса и т.п. Можно выбрать и любое конструктивное исполнение – бескорпусное, в мини-корпусе, в пластмассовом или металлическом корпусах разного типа. Ряд микроконтроллеров можно программировать и перепрограммировать через разные коммуникационные каналы непосредственно на рабочей плате, в том числе и в ходе эксплуатации. Некоторые типы микроконтроллеров этого семейства поддерживают даже и функцию "самоперепрограммирования", т.е. способны без внешнего программатора сами изменять алгоритм своего функционирования, реагируя на какие-то заведомо обусловленные события. Для этого микроконтроллер записывает новые коды в свою флэш-память программ. Эти новые коды (другие версии программы)

должны быть заведомо записаны в доступной микроконтроллеру памяти.

Среди микроконверторов одними из наилучших считают ныне микроконверторы фирмы Analog Devices. Их параметры приведены в табл. 25.2. Они допускают частоту тактовых импульсов до 25 МГц при напряжении питания 5 В и до 16 МГц – при напряжении питания 3 В. В зависимости от потребности частота тактовых импульсов регулируется автоматически, что позволяет минимизировать потребляемую мощность. В микроконверторах реализованы три типа интерфейсов: UART, SPI и I2C. Это позволяет осуществить соединение с ПЭВМ, сетями связи и работать непосредственно на матричный индикатор.

Значительным преимуществом в применении микроконверторов ADuC является наличие удобных отладочных плат, что позволяет сократить срок разработки исследовательских образцов портативных сенсоров и осуществлять отладку и рабочее программирование их в производстве. Отладочная плата Quick Start (EVAL – ADuC 812 QS) содержит интерфейс RS-232, внешнюю память 32 К SRAM, аналоговые входы/выходы, блок питания. Плата сопровождается полным программным обеспечением: ассемблером, Си-компилятором, симулятором, загрузчиком и дебаггером под Windows. Наладочный набор QuickStart-Plus обеспечивает все необходимые процедуры по программированию, тестированию и созданию базовых приложений на СИ или ассемблере. Набор содержит Си-компилятор, макроассемблер, симулятор и эмулятор, а также специальную оценочную плату и интерфейс RS-232 для соединения с ПК.

Таблица 25.2. Параметры микроконверторов фирмы Analog Devices

Тип	Параметры		Память		Производ- сть MIPS	Тип корпуса
	АЦП	ЦАП	программ Flash/ЕЕ Кбайт	данных: Flash/RAM байт		
ADuC 812	12 бит/200 кГц, 8 кан.	2x12 бит	8	640/256	1,3	28- TSSOP
ADuC 814	12 бит/247 кГц, 6	2x12 бит	8	640/256	1,3	28- TSSOP

ADuC 816	кан. 4 x 16 бит, 105 Гц	12 бит	8	640/256	1	52-PQFP, 56-CSP
ADuC 824	4 x 24+16 бит/105 Гц	12 бит	8	640/256	1	52-PQFP, 56-CSP
ADuC 831	12 бит/247 кГц, 8 кан.	2x12 бит, 2 ШИМ	62	4К; 2К+256	1,3	52-PQFP, 56-CSP
ADuC 832						
ADuC 834	2 x 24+16 бит/105 Гц	12 бит, 2 ШИМ.	62	4К; 2К+256	1	52-PQFP, 56-CSP
ADuC 836	2 x 16 бит, 105 Гц	12 бит, 2 ШИМ	62	4К; 2К+256	1	52-PQFP, 56-CSP
ADuC 841	12 бит/400 кГц, 8 кан.	2x12 бит, 2 ШИМ.	62; 32; 8	4К; 2К; 640; 256; 2К+256,	25; 16 (ФАПЧ)	52-PQFP, 56-CSP
ADuC 842						
ADuC 843	12 бит, 400 кГц, 8 кан.	2 ШИМ-выхода	32; 8	2К; 640; 2К+256, 256	16 (ФАПЧ)	56-CSP
ADuC 844	2 x 24+16 бит/105 Гц	12 бит, 2 ШИМ	62; 32; 8	4К; 2К; 640; 256; 2К+256	12	52-PQFP, 56-CSP
ADuC 846	2 x 16 бит, 105 Гц	12 бит, 2 ШИМ	62; 32; 8	4К; 2К; 640; 256; 2К+256	12	52-PQFP, 56-CSP

В качестве примера рассмотрим немного детальнее микроконвертор ADuC 812. Его основные параметры приведены в табл. 25.3.

Производительность его процессора указана в единицах "MIPS" (Mega Instructions Per Second – миллион операций в секунду).

Микроконвертор состоит из 8-разрядного вычислительного ядра, памяти программ и данных, трех 16-разрядных таймеров/счетчиков, "дежурного" таймера, монитора источника питания и периферийных микроконтроллеров, которые реализуют три типа внешних интерфейсов: UART, SPI, I2C. В контроллере есть 32 программируемых входа/выхода. Они скомпонованы в четыре 8-разрядных порта, из которых порт 3 (P3) имеет повышенную нагрузочную способность.

Вмонтированный блок прерываний обрабатывает с двумя уровнями приоритета прерывания от девяти источников: от монитора источника питания, АЦП (сигнал окончания преобразований), от трех таймеров, двух внешних источников (INT0, INT1), от UART – порта и от интерфейса SPI/I²C.

Память контроллера состоит из вмонтированной флэш-памяти (8 Кбайт – память программ, 640 байт – память данных) и RAM-памяти (256 байт – память данных) и из внешней памяти (16 Мбайт данных и 64 Кбайт программ). Микроконтроллер оснащен внутренним температурным датчиком, который контролирует окружающую температуру.

Таблица 25.3. Основные параметры микроконвертора ADuC 812

Наименование параметра	Значение
Микросхема в целом	
Ток потребления в режимах:	
– рабочем (при UПИТ. = 5/3 В, = 16 МГц)	32/16 мА
(при UПИТ. = 5/3 В, = 1 МГц)	8/3 мА
- сниженного энергопотребления (= 5/3 В, = 16 МГц)	18/16 мА
– "ожидания" (при . = 5/3 В)	5/5 мкА
Корпус	52 LQF

Микроконтроллер	
Максимальная производительность	1,33 MIPS
Флэш-память программ	8 кбайт
Флэш-память данных	640 байт
Оперативная память данных (RAM)	256 байт
Объем внешней памяти данных	16 Мбайт
Объем внешней памяти программ	64 Кбайт
АЦП	
Количество входных каналов	8
Напряжение входного сигнала, В	от 0 до 2,5 В
Опорное напряжение	
Количество разрядов	12
Время преобразования	5 мкс
Интегральная нелинейность, ЕМР (единиц мл. разряда)	0.5
Дифференциальная нелинейность, ЕМР	1
Погрешность в крайней точке шкалы, ЕМР	2
Погрешность напряжения смещения нуля, ЕМР	2
Ток утечки на входе	10 мкА
Отношение сигнал/шум	70 дБ
Уровень нелинейных искажений	– 78 дБ
Цифро-аналоговые преобразователи	
Разрядность	12
Точность, ЕМР (единицы младшего разряда)	2

Выходное напряжение, В	0... /0...
Сопrotивление нагрузки	10 кОм
Время установления выходного напряжения	4 мкс
Дифференциальная нелинейность, ЕМР	1

Каждый из таймеров состоит из двух 8-разрядных регистров и может быть использован как таймер и как счетчик. Таймеры 0 и 1 при переполнении генерируют сигнал прерывания. Предусмотрены три входа (T0, T1, T2) для внешних тактовых импульсов. "Дежурный" таймер предназначен для формирования внутреннего сигнала сброса в случае, если "зависает" программа или возникает программная или аппаратная ошибка. Тактовая частота "дежурного" таймера составляет 64 кГц. Продолжительность контролируемого интервала – от 16 до 204 мс.

Обмен данными с внешними устройствами осуществляется через четыре 8-разрядных порта общего назначения. Порты 0, 2 и 3 – двунаправленные. Все порты содержат исходный регистр-"защёлку" и входной буфер. Порт 1 – входной. UART-порт обеспечивает полнодуплексный асинхронный прием и передачу данных. Обмен данными внутри микроконвертора осуществляется через двухпроводный интерфейс I²C.

Монитор источника питания осуществляет контроль за напряжением питания аналоговых и цифровых схем в диапазоне от 2,6 до 4,6 В, критическое значение задает пользователь.

25.4.3. 16-разрядные микроконтроллеры

Среди 16-разрядных микроконтроллеров следует обратить внимание разработчиков портативных интеллектуальных сенсоров на семейство MSP430 компании Texas Instruments с рекордно малым энергопотреблением, RISC (Reduced Instruction Set Computer) архитектуры, что способствует повышению быстродействия процессора, и с довольно развитой периферией на том же кристалле.

При работе на полную мощность микроконтроллер потребляет ток 250-400 мкА. Когда внешняя периферия (АЦП, таймеры, жидкокристаллический индикатор, порты входа/выхода) работают автономно, процессор можно временно выключать командой "CPU off", – ток питания уменьшается при этом до 30 мкА. Тактовую частоту можно программно изменять от 32 кГц до 1 МГц, исходя из реальных потребностей текущего режима работы, экономя ресурс батареи питания. В режимах, когда нет необходимости в тактовой частоте (напр., при ожидании какого-то внешнего сигнала), генератор этой частоты тоже можно программно выключить, тогда ток питания падает до 0,8 мкА. Возвращение в нормальный режим происходит довольно быстро с помощью прерывания (за 6 мкс).

Разные микросхемы семейства микроконтроллеров MSP430 (от MSP430F1101A до MSP430FW427) имеют внутреннюю оперативную память от 128 до 2048 байт, флэш-память от 1 до 60 кб, от 14 до 48 внешних выводов, 10- или 12-разрядный ЦАП и т.п.

Краткие итоги

Во вновь создаваемых сенсорах сигналы на выходах чувствительных элементов часто очень слабы и не превышают нескольких микровольт или пикоампер. Поэтому обычно требуется усиление до 10000 раз по напряжению и даже в миллионы раз по электрическому току. Как правило, требуется не только усиление, но и согласование импедансов, улучшение соотношения сигнал/шум, иногда также электрическая изоляция ("развязка") чувствительного элемента и т.п. В настоящее время все усилители выполняют в виде монолитных интегральных схем на одном кристалле или в виде гибридных интегральных схем на общей подложке в одном корпусе. В технической документации к ним и в справочниках, как правило, приводятся исчерпывающие характеристики усилителей и типовые схемы их подключения, принципы расчета параметров при решении разнообразных схемотехнических задач. Одним из часто применяемых в сенсорах классов интегральных усилителей являются так называемые "операционные усилители" (ОУ). Они имеют высокий коэффициент усиления, широкий частотный диапазон, низкий коэффициент собственного шума, большое входное и малое выходное сопротивление, почти не чувствительны к помехам, действующим одновременно на оба входа, малочувствительны к помехам по шине

питания. Широко применяют также т.н. " дифференциальные усилители ".

Когда сигналы от чувствительных элементов очень слабы или требуются максимальные чувствительность и разрешающая способность сенсора, тогда при выборе усилителей следует обратить особое внимание на все возможные источники шума. Шумы обычно делят на собственные, возникающие в самом сенсоре, и привнесенные, поступающие извне. Причиной возникновения собственных шумов является статистическая природа электрического заряда и тока. Значительный вклад в собственные шумы могут давать ненадежные электрические контакты и паразитные токи через загрязненную поверхность печатных плат и корпусов электронных элементов. Поэтому обеспечение высокой надежности соединений и сведение к минимуму всех паразитных связей являются обязательными требованиями к интеллектуальным сенсорам. Для уменьшения влияния внешних помех и привнесенных шумов применяют экранирование, развязки электрических схем, фильтрацию, источники питания с малым шумом, оптимальное расположение проводников, защиту от механических вибраций и резонансных явлений. Эффективным методом борьбы с помехами и привнесенными шумами является также использование дифференциальных пар и " мостовых схем ". Эти схемы позволяют в значительной мере компенсировать влияние многих внешних факторов, таких как изменения температуры, давления, сторонних электрических или магнитных полей.

В интеллектуальных сенсорах значительная часть обработки информации происходит в цифровой форме. Поэтому почти всегда их составными элементами являются и аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Их задача – превратить усиленные аналоговые сигналы от чувствительных элементов в цифровые данные для микрокомпьютера. Важнейшими характеристиками АЦП являются их точность, быстродействие и стоимость. Точность связана с разрядностью АЦП. Обычно чем выше точность (разрядность) АЦП, тем ниже его быстродействие; чем выше точность и быстродействие, тем выше и стоимость АЦП. Поэтому, проектируя интеллектуальный сенсор, параметры АЦП надо подбирать оптимально.

"Мозгом" интеллектуального сенсора является микрокомпьютер (микропроцессор, микроконтроллер, микроконвертор). Именно он и позволяет сделать сенсор "умным", интеллектуальным. Электронная

промышленность выпускает ныне сотни разных типов микрокомпьютеров, микропроцессоров, микроконтроллеров, микроконверторов. Для простейших применений популярными являются малопотребляющие 4-разрядные микроконтроллеры. Но наиболее широкое применение находят 8-разрядные микроконтроллеры и микроконверторы архитектуры C51. Из большой их номенклатуры можно выбрать оптимальный для каждого применения вариант: с требуемой тактовой частотой, с нужными объемом и типом памяти программ и данных, с желательным количеством внешних выводов, с нужным количеством встроенных АЦП, таймеров/счетчиков, узлов внешнего интерфейса и т.п. Можно выбрать и любое конструктивное исполнение – в пластмассовом или металлическом корпусах разного типа, в мини-корпусе, бескорпусное. Ряд микроконтроллеров можно программировать и перепрограммировать непосредственно на рабочей плате, в том числе и в ходе эксплуатации. Некоторые типы микроконтроллеров этого семейства поддерживают даже и функцию "самоперепрограммирования".

26. Элементная база интеллектуальных сенсоров. Часть 2

26.1. Жидкокристаллические индикаторы

Интеллектуальные сенсоры должны выдавать пользователю информацию в наиболее удобной для него форме, предоставлять ему возможности изменять режимы работы сенсора, влиять на функционирование, привлекать внимание пользователя в критических и других предусмотренных ситуациях. С этой целью в состав сенсоров вводят узлы *отображения* (визуализации) информации, клавиатуру управления и звуковые сигнализаторы.

Устройства отображения информации представлены ныне многими типами дисплеев: светодиодными, электролюминесцентными и катодолуминесцентными, плазменными и т.д. Но в портативных интеллектуальных сенсорах чаще всего используют **индикаторы на жидких кристаллах (ЖКИ, англ. LCD – Liquid Crystal Displays)**. Они потребляют мало энергии, имеют высокое отношение полезной площади к объему, надежны в работе и относительно недороги. Их работа основана на способности молекул жидких кристаллов

переориентироваться в достаточно сильном электрическом поле и в их способности поворачивать плоскость поляризации проходящего поляризованного света.

Конструкцию и принцип действия ЖКИ поясняет рис. 26.1.

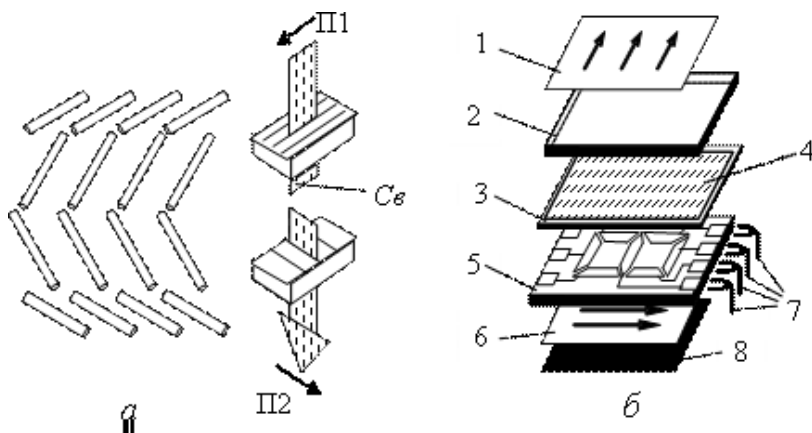


Рис. 26.1. а) Ориентация молекул ЖК вещества в соседних молекулярных слоях при отсутствии электрического поля. Они образуют закрученную подобно спирали структуру, которая при прохождении света S_v поворачивает плоскость его поляризации Π_1 в направлении Π_2 ; б) конструкция ЖКИ

В ЖКИ между двумя прозрачными стеклянными пластинами размещается жидкокристаллический (ЖК) материал. На поверхности пластины создан микрорельеф, благодаря которому все вытянутые молекулы ЖК материала ориентируются возле поверхности в одном направлении. Ориентация молекул возле поверхности второй стеклянной пластины – перпендикулярная. Из-за этого ориентация молекул в промежуточных молекулярных слоях плавно изменяется (рис. 26.1, а).

При прохождении поляризованного света сквозь упорядоченный таким образом ЖК материал плоскость поляризации света поворачивается на 90 deg . Если на ЖК материал наложить достаточно сильное внешнее электрическое поле, то все молекулы переориентируются в направлении этого поля, поворот плоскости поляризации света

исчезает. На этом и основан метод формирования изображений в ЖК индикаторах.

Типичная структура ЖКИ показана на рис. 26.1, б. Он состоит из поляризатора света 1, стеклянной пластины 2, на нижнюю поверхность которой нанесен прозрачный электрод (SnO_2 или In_2O_3), из стеклянной пластины 5, на верхней поверхности которой сформированы сегментные электроды и контактные площадки по краям, вне поля зрения. Между стеклянными пластинами 2 и 5 размещена изолирующая рамка 3, которая задает толщину залитого между ней и стеклянными пластинами ЖК материала 4 (порядка 10 мкм). Ниже стеклянной пластины 5 размещаются анализатор 6 (такой же пленочный поляризатор, как и 1, но в нем плоскость поляризации развернута на 90 deg) и отражатель света 8.

Когда между электродами на пластинах 2 и 5 электрическое напряжение отсутствует, описанная структура функционирует так. Внешний свет проходит сквозь поляризатор 1 и пластину 5. В ЖК материале 4 плоскость поляризации света поворачивается на 90 deg, совпадает с ориентацией анализатора 6, и потому свет легко проходит сквозь него, отражается от зеркального слоя 8, на обратном пути снова проходит сквозь анализатор 6 и ЖК материал 4. Здесь плоскость его поляризации еще раз поворачивается на 90 deg и поэтому на выходе совпадает с ориентацией поляризатора 1. В результате отраженный внешний свет создает сплошной светлый фон.

Если на какой-либо сегментный электрод подать напряжение, то все молекулы над ним переориентируются электрическим полем. Поворот плоскости поляризации света не происходит, после прохождения ЖК материала 4 она остается перпендикулярной к ориентации анализатора 6. Поэтому свет поглощается в нем, участок поля дисплея над таким электродом становится темным. Такое изображение называют " *позитивным* ". Если ориентации поляризатора 1 и анализатора 6 сделать одинаковыми, то формируется " *негативное* " изображение: всё поле дисплея остается темным, а над электродами, на которые подано напряжение, образуются светлые участки.

Иногда вместо отражателя 8 в ЖКИ устанавливают плоский источник света (электролюминесцентный, светодиодный и т.п.). Такие ЖКИ работают "на просвет" и могут эксплуатироваться при отсутствии внешнего освещения. Но из-за того, что на подсветку тратится

значительная энергия, в портативных сенсорах они применяются редко.

ЖКИ с 7-сегментной структурой нижнего электрода являются простейшими и поэтому имеют наиболее низкую цену. Однако набор символов, которые на них могут быть высвечены, ограничен практически только цифрами и некоторыми знаками (рис. 26.2, *а*). Выпускают также 16-сегментные ЖКИ (рис. 26.2, *б*), на которых можно формировать, кроме цифр, также все буквы латиницы и почти все буквы кириллицы.

Еще большие возможности обеспечивают матричные ЖКИ (рис. 26.2, *в*), на которых знаки формируются из набора отдельных элементов ("пикселей"). Прозрачные электроды на стеклянных пластинах 2 и 5 выполняют в виде ортогональных систем шин шириной от 0,1 до 1 мм. Пиксели изображения образуются в зонах пересечения шин. Промышленно выпускают многопозиционные сегментные (рис. 26.2, *г*) и матричные индикаторы (рис. 26.2, *д*), многострочные и комбинированные (сегментно-матричные – рис. 26.2, *е*).

Ряд предприятий принимает и выполняет индивидуальные заказы на ЖКИ нужной потребителю структуры. Многие электронные фирмы выпускают также ЖКИ с интегрированной (методами гибридной технологии) в одном корпусе с индикатором электроникой управления. Это уже полностью законченные устройства отображения информации, рассчитанные на непосредственное соединение с микропроцессором.

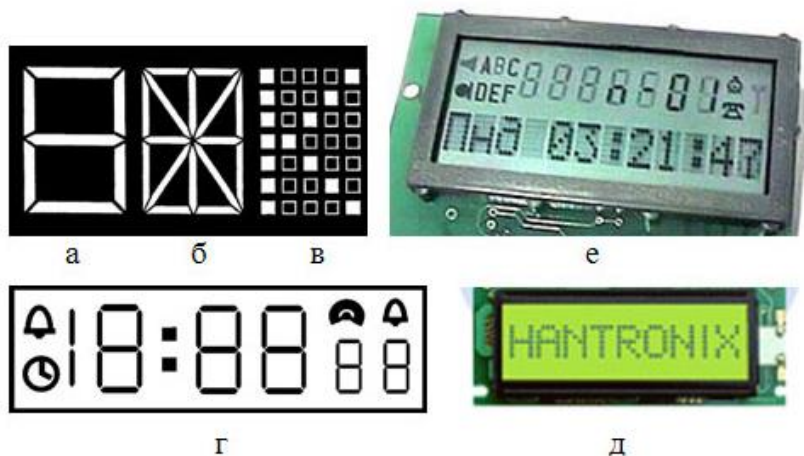


Рис. 26.2. а) 7-сегментный цифровой индикатор; б) 16-сегментный алфавитно-цифровой индикатор; в) матричный знаковый индикатор; г) многосимвольный сегментный ЖКИ; д) многосимвольный матричный ЖКИ; е) 2-строчный комбинированный ЖКИ

Для применений, в которых нужно отображать на экране не только символьную информацию, но и графики, диаграммы, полноценные изображения, промышленность выпускает монохромные и цветные графические ЖКИ разных форматов и размеров (рис. 26.3).

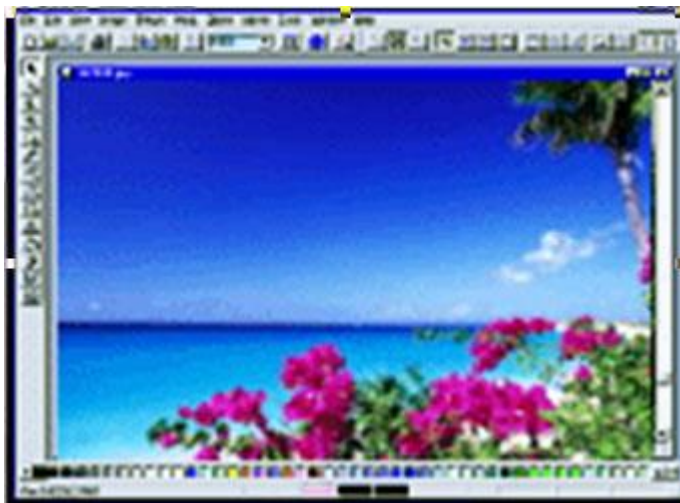


Рис. 26.3. Один из примеров графического дисплея

Как правило, они выпускаются вместе с электроникой, обеспечивающей формирование изображений и их запоминание. Важные для разработчиков интеллектуальных сенсоров данные о формате, в котором должны быть представлены выводимые на такой дисплей данные, описываются в сопроводительной технической документации. Стоимость графических ЖКИ, особенно цветных, значительно выше, чем стоимость символьных ЖКИ.

26.2. Клавиатура

Для "общения" пользователя с сенсором применяют разнообразные *клавиатуры*. Это могут быть отдельные кнопки или клавиши, пленочные (мембранные) или силиконовые клавиатуры. На рис. 26.4 в верхнем ряду показаны некоторые типы пленочных клавиатур. Они состоят из основы с электропроводящим покрытием, упругой мембраны с отдельными плёночными электродами и внешней пленочной "панели" с предусмотренным конструкторами дизайном.



Рис. 26.4. Образцы пленочных (верхний ряд) и силиконовых (нижний ряд) клавиатур. Их форма, размеры, дизайн могут быть заданы заказчиком

Преимуществами пленочных клавиатур по сравнению с обычными кнопочными являются большой рабочий ресурс (свыше 20 млн. переключений), простота монтажа, небольшая цена, возможность спроектировать и воплотить уникальный собственный дизайн. Как правило, пленочные клавиатуры делают из полиэфира, который является очень стойким. Места нажатия контактов могут быть плоскими или иметь пластиковый "купол". Время возникновения контакта при нажатии не превышает 5 мс. Электрическое сопротивление при этом уменьшается от 100 МОм до 10 Ом, а после отпускания снова возрастает до исходного значения. Через нажатый контакт можно пропускать ток до 100 мА.

На рис. 26.4 в нижнем ряду показаны некоторые силиконовые клавиатуры. Они могут имитировать любую форму выступающих или "утопленных" кнопок или клавиш и любые размеры, сохраняя все преимущества пленочных клавиатур. Тактильный эффект можно подобрать по желанию заказчика и реализовать оптимальное в каждом случае ощущение нажима и ход клавиши от 0 до 5 мм. Внешним оформлением можно имитировать пластиковые и металлические кнопки.

26.3. Сенсорные экраны

При проектировании портативных интеллектуальных сенсоров нередко возникает проблема дефицита площади для размещения дисплея и всей нужной клавиатуры. Выходом в таких случаях может стать применение сенсорных экранов (*англ.* – Touch Screen). В них клавиатура и экран, на который выводится информация, объединены в одно целое. Вместе с необходимым изображением на свободных местах экрана формируются изображения виртуальных кнопок управления, которые могут потребоваться в данном режиме работы. Для управления сенсором пользователь дотрагивается до экрана в соответствующих точках. Сообщение о прикосновении передается в микроконтроллер, который организует нужную реакцию на указание пользователя. Для подтверждения приёма команды виртуальная кнопка на экране может каким-то образом измениться: уменьшить или увеличить яркость, мелькать с другой частотой, изменить свой цвет, стать заштрихованной, и т.п. Это будет означать, что указание принято к выполнению. При изменении режима работы виртуальные кнопки управления, которые стали уже не нужны, исчезают с экрана, а в других местах могут появиться другие кнопки управления в зависимости от потребности. Диалог интеллектуального сенсора с пользователем становится от этого более естественным, надежным, более понятным, дружественным. Исчезает необходимость в отдельной жестко фиксированной клавиатуре, она становится программируемой, гибкой, в каждой ситуации функционально оптимальной.

Для достижения этого, перед экраном устанавливают прозрачную сенсорную панель, задача которой – определять координаты точки прикосновения к экрану и передавать их в микроконтроллер, который на этой основе определяет, к какой именно из виртуальных кнопок на экране в данный момент дотрагивается пользователь. Сенсорная панель уменьшает яркость изображения всего на 10-25 % и не мешает его восприятию.

Сейчас между собой конкурируют несколько вариантов реализации сенсорной панели. На рис. 26.5 показана конструкция резистивной сенсорной панели. Она состоит из стеклянной основы 1, упругой майларовой мембраны 2 и изолирующих распорок 3. На нижнюю сторону мембраны 2 и на верхнюю сторону стеклянной основы 1 нанесены прозрачные пленочные электропроводящие покрытия 4 и 5. На краях пленки 5 сформированы металлические электроды внешних

выводов 6 и 7. Электропроводящее покрытие 5 на стекле делают максимально однородным.

Электрическая схема на рис. 26.5, в объясняет принцип действия сенсорной панели. Когда между электродами 6 и 7 подается небольшое эталонное напряжение, то на прозрачной электропроводящей пленке возникает градиент потенциала. При нажатии майларовой мембраны в точке нажима образуется электрический контакт между покрытиями 4 и 5. И через пленку 4 потенциал покрытия 5 в этой точке, пропорциональный координате X, передается на выход. Далее он усиливается и поступает на АЦП, двоичный код с которого передается в микроконтроллер. Для определения координаты Y точки нажатия опорное напряжение во втором такте опроса подается между электродами 8 и 9. Создается уже вертикальный градиент потенциала, благодаря чему потенциал на пленочном покрытии 4 становится пропорциональным координате Y. "Считывание" координат X и Y происходит быстро с интервалом времени менее 1 мс.

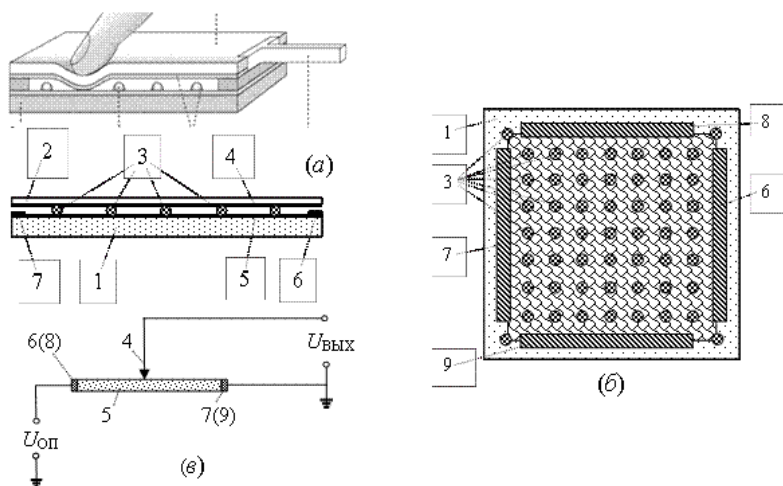


Рис. 26.5. Конструкция резистивной сенсорной панели: а) вид в разрезе; б) вид в плане; в) принципиальная электрическая схема считывания сигнала, пропорционального координате точки контакта при нажатии

В цифровых (или матричных) сенсорных панелях прозрачные электропроводящие пленочные покрытия 4 и 5 (рис. 26.5) разделены на системы изолированных параллельных шин, которые образуют координатную сетку. В точке касания соответствующие горизонтальная и вертикальная шины электрически контактируют. Микроконтроллер организует периодическое быстрое сканирование горизонтальных и вертикальных шин. Номера шин, находящихся в контакте, и являются координатами точки касания.

В сенсорных панелях на основе технологии DST (Dispersive Signal Technology) во всех углах мембраны 2 находятся пьезоэлектрические чувствительные элементы. Когда палец или другой предмет ("стилус") дотрагивается до мембраны, то от точки соприкосновения по мембране распространяются упругие волны. Пьезоэлектрические элементы фиксируют их появление, формируя соответствующие электрические сигналы. По разности времен поступления этих сигналов от каждого из 4 угловых пьезоэлектрических элементов микроконтроллер вычисляет координаты точки прикосновения.

Укажем, что сенсорные панели, тонкопленочные и силиконовые клавиатуры, сами по себе тоже являются сенсорами. Первичные сигналы возникают в них в результате прикосновения или нажатия, т.е. являются механическими. И по нашей классификации эти сенсоры надо отнести к классу механических сенсоров.

26.4. Внутренняя память интеллектуальных сенсоров

В состав микрокомпьютера (микропроцессора, микроконтроллера или микроконвертора), как правило, входят необходимые узлы памяти. Во многих случаях этого бывает достаточно. Однако имеется немало случаев, когда имеющейся там памяти недостаточно, и оказывается нужна дополнительная память. С разными целями в интеллектуальных сенсорах используют следующие виды дополнительной памяти.

26.4.1. Оперативная память

Оперативная память с произвольным адресным доступом. Она нужна для занесения и хранения текущих данных: текущей информации, данных измерения, промежуточных результатов вычислений и т.п. Иногда ее называют еще "памятью данных" или RAM (Random Access Memory). При выключении питания вся записанная в такой памяти

информация пропадает. Сразу после включения питания состояние ячеек этой памяти является неопределенным. Поэтому перед дальнейшим использованием в неё надо программно заносить нужную начальную информацию ("инициировать"). Если требуется сохранять имеющуюся информацию и тогда, когда сенсор не работает, то при отключении общего питания оперативную память переключают на питание от независимого источника (батарейки). Микросхемы оперативной памяти, имеющие встроенный источник питания и электронику автоматического переключения питания, иногда называют "энергонезависимой памятью".

Вариантами оперативной памяти являются *статическая* (Static RAM – SRAM) и *динамическая* оперативная память (Dynamic RAM – DRAM). Микросхемы динамической памяти имеют обычно более высокую плотность ячеек. Поэтому удельная стоимость единицы информации в них меньше, чем у статической оперативной памяти. Но динамическая память нуждается в частой периодической регенерации. По этой причине в интеллектуальных сенсорах чаще используют статическую память.

В портативных интеллектуальных сенсорах рекомендуется использовать микросхемы КМДН памяти с малой потребляемой мощностью. Они выпускаются объемом от 2 Кбит до 32 Мбит на одном кристалле с разной организацией (1-, 8- и 16-разрядной) в корпусах разного типа или даже бескорпусные (рис. 26.6). В качестве примера можно назвать микросхемы НМ-6516 статической оперативной КМДН памяти фирмы Intersil объемом 16 Кбит, имеющие организацию 2048 слов по 8 разрядов (2 Кбайт). Они обеспечивают время доступа от 120 до 200 нс, потребляя мощность 275 мкВт при пассивном хранении данных и 55 мВт/МГц в режимах записи и считывания.

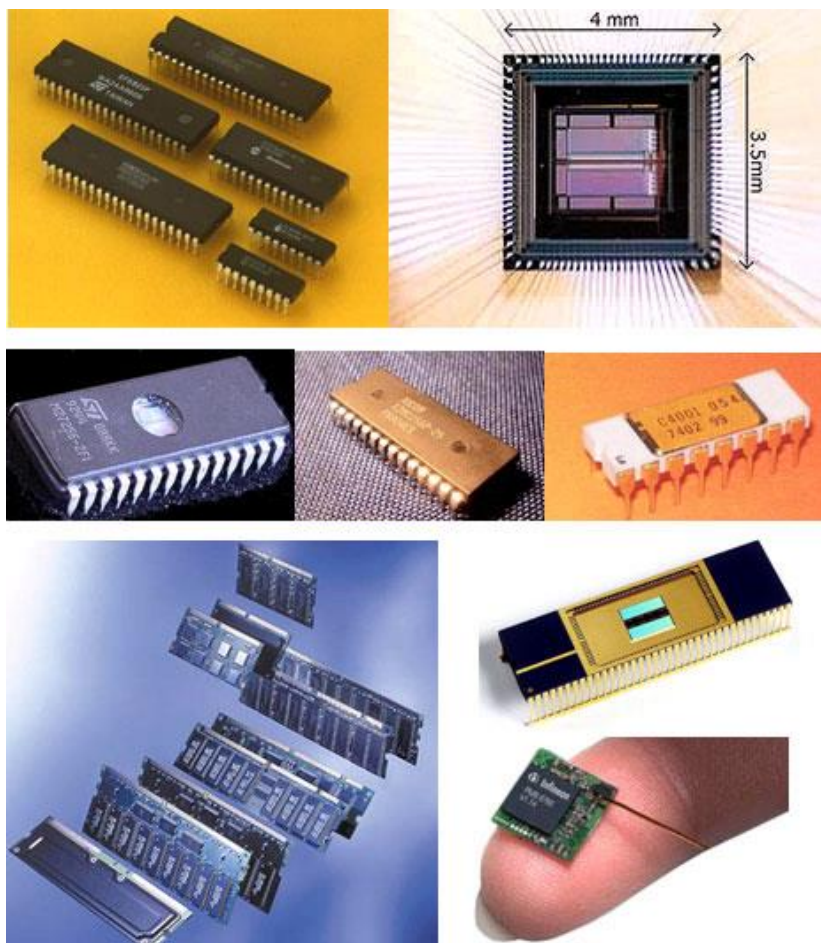


Рис. 26.6. Разные варианты выполнения микросхем памяти

Микросхемы μ PD441000L-X статической оперативной КМДН памяти фирмы НЕК объемом 1 Мбит имеют организацию 131072 слов по 8 разрядов (128 Кбайт), обеспечивают время доступа от 70 до 150 нс. Сверхбыстродействующие микросхемы этой же фирмы μ PD4416001 и μ PD4416016 объемом 16 Мбит, имея соответственно 1- и 16-разрядную организацию, обеспечивают время доступа от 15 до 17 нс.

26.4.2. Постоянная память

Постоянная память – это память с произвольным адресным доступом, в которой записанная информация не изменяется, надежно сохраняется и при отсутствии питания. Она нужна для хранения программ работы микроконтроллера, констант, таблиц и других данных, которые не меняются при функционировании сенсора. Ее называют еще "памятью программ" или ROM (англ. "read only memory"). Имеются микросхемы постоянной памяти, в которые информацию заносят раз навсегда уже при изготовлении микросхем. Но в сенсорах чаще применяют электрически программируемую постоянную память, которую называют еще EPROM. Информацию в нее (это, как правило, программы работы микроконтроллера, режимные параметры, служебные данные) заносят с помощью специальных "программаторов" при инсталляции и налаживании работы сенсора. В экспериментальных и исследовательских образцах сенсоров лучше использовать другой вариант – репрограммируемую постоянную память. Записанную в нее информацию при необходимости можно изменить (до 1000–10000 раз). Основные варианты репрограммируемой постоянной памяти – это электрически репрограммируемая постоянная память (EEPROM) и программируемая постоянная память с ультрафиолетовым стиранием. Некоторые микросхемы EEPROM можно применять при испытаниях исследовательских образцов сенсоров с целью быстрого перехода на другие исследовательские варианты функционирования сенсора.

Палитра программируемых при изготовлении, однократно электрически программируемых микросхем постоянной памяти и допускающих многократное репрограммирование, перекрывает диапазон объемов от 2 Кбит до 16 Мбит с 8-разрядной или 16-разрядной организацией. Диапазон номиналов напряжения питания – от 2,7 В до 15 В $\pm 10\%$. Среди них есть немало таких, которые программируются от того же напряжения, которым питаются. Продолжительность цикла считывания – 40–200 нс.

26.4.3. Память с последовательным доступом

Память с последовательным доступом или флэш-память не позволяет записывать или считывать информацию адресно, из произвольной ячейки. Записывать или считывать данные можно лишь последовательно – ячейка за ячейкой. Но записывать, накапливать в

таких микросхемах можно большие объемы данных, которые надежно хранятся и при отсутствии питания.

В последнее десятилетие произошел большой скачок в разработке, производстве и применении флэш-памяти. Сейчас она широко применяется в таких интеллектуальных сенсорах, как цифровые фотоаппараты и видеокамеры, диктофоны, плееры, мобильные телефоны и смартфоны и т.п. Флэш-память ныне можно приобрести от многих производителей как в виде отдельных микросхем, в том числе бескорпусных, так и в виде "карт памяти" или в виде флэш-накопителей (рис. 26.7).

Объем памяти на одном кристалле достигает уже 64-256 Мбит, а объем памяти переносных флэш-накопителей и флэш-карт – 16-32 Гбайт, о чем раньше можно было только мечтать.

26.5. Внешний интерфейс

Интеллектуальные сенсоры, как правило, рассчитаны и предоставляют пользователям возможность непосредственного соединения их с персональным или профессиональным компьютером или с сетью связи. Это позволяет легко переносить накопленные данные измерений, наблюдений, обследований в компьютер или даже в отдаленный компьютер с целью дальнейшей их обработки, документирования, длительного хранения, систематизации, сопоставления с другими данными. Сенсоры, обладающие такой способностью, легко вписываются в современные автоматизированные системы производства, контроля, исследований, в информационные сети и т.п.

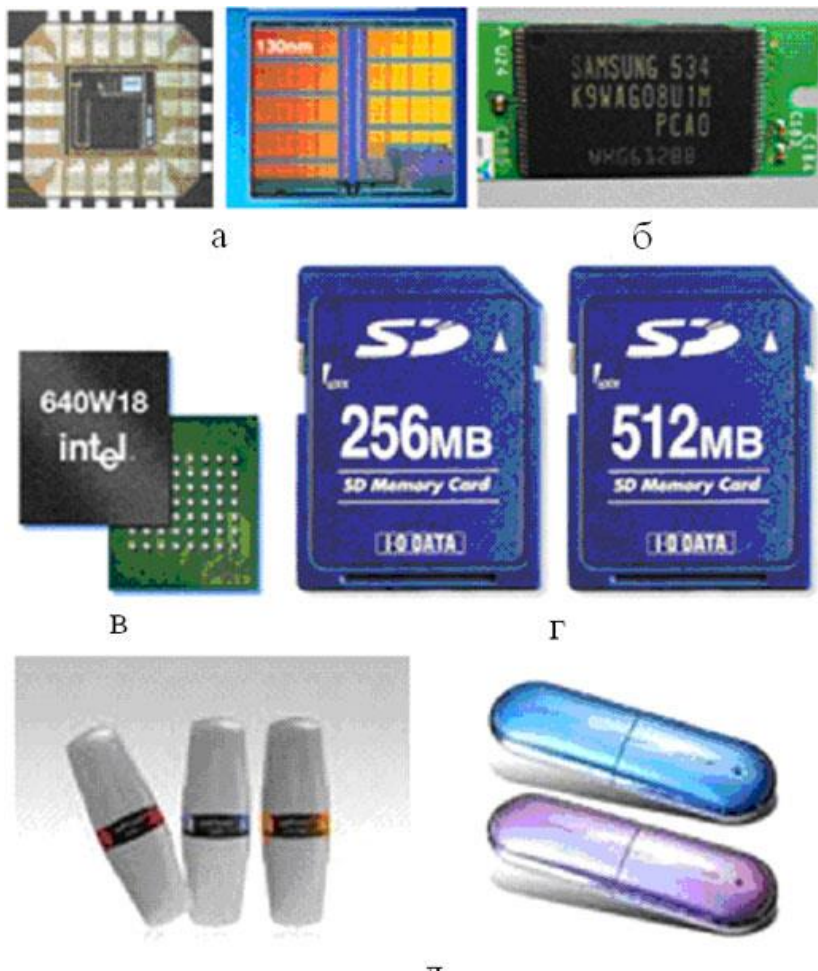


Рис. 26.7. Некоторые образцы флэш-памяти в виде: а) отдельных кристаллов (чипов); б) отдельного корпуса; в) в миникорпусах; г) флэш-карт памяти; д) переносных флэш-накопителей

Существуют, как известно, много разных стандартов *внешнего интерфейса*, ориентированных на разные потребности обмена данными. И для интеллектуальных сенсоров стандарт (или стандарты) внешнего общения следует выбирать, исходя из действительных нужд.

Наиболее распространенным ныне является последовательный интерфейс синхронной и асинхронной передачи данных согласно стандарту EIA RS-232-C и рекомендациям V.24 ССИТТ. Сокращенно его называют RS-232. Он предназначен для непосредственного соединения кабелем двух произвольных устройств, одним из которых в нашем случае является интеллектуальный сенсор. Передающий выход одного устройства соединяется с приемным входом другого и наоборот (рис. 26.8). Для организации обмена данными используют специальные символы. Слева изображена схема соответствующей 4-жильной линии связи, которая применяется чаще всего, а справа – схема стандартного 9-контактного разъема. Назначение линий таково:

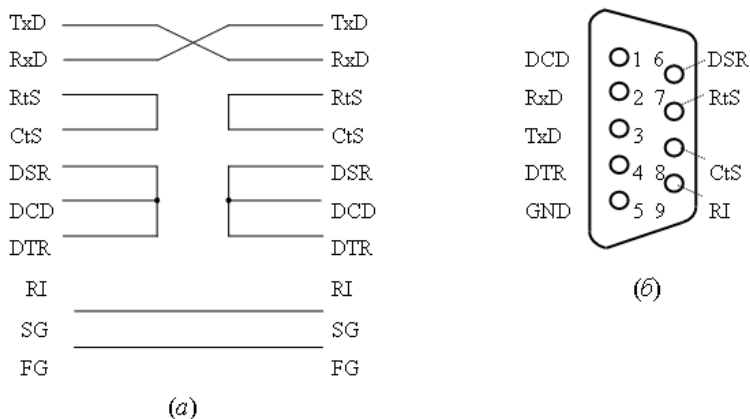


Рис. 26.8. Внешний интерфейс RS-232

TxD (Transmit Data) – данные, которые передаются от сенсора в компьютер или от компьютера в сенсор последовательным двоичным кодом;

RxD (Receive Data) – данные, которые принимаются компьютером от сенсора или же сенсором от компьютера;

RtS (Request to Send) – сигнал запроса на передачу, который активируется во время передачи;

CtS (Clear to Send) – сигнал готовности приемника к передаче, – активен во время приема данных;

DSR (Data Set Ready) – сигнал готовности данных, который используется при работе с модемом;

SG – "нулевой" ("общий") провод, "сигнальное заземление";

DCD (Carrie Detect) – детектирование принятого сигнала;

DTR (Data Terminal Ready) – используется при работе с модемом;

RI (Ring Indicator) – индикатор вызова, который используется при работе с модемом телефонной сети;

GND (System Ground) – корпус ("земля") устройства;

FG – защитное заземление (экран) кабеля.

Данные передаются побайтно. К каждому байту впереди прибавляется стартовый бит, а в конце – бит чётности и 1-2 стоповых бита. Получив стартовый бит, приемник выбирает из линии связи в приемный регистр биты данных тактами через установленные интервалы времени. Важно, чтобы продолжительность тактов приемника и передатчика была одинаковой ($\pm 10\%$). Скорость передачи выбирается из следующего стандартного ряда: 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600 или 115200 бит/с (это – максимум). Расстояние, на которое ведется передача, не должно превышать 15 м.

Внешний интерфейс RS-232 поддерживают почти все микроконтроллеры и микроконверторы, в которые конструктивно встроены для этого соответствующие узлы и внешние выводы ("последовательный порт").

Возможность передачи данных на расстояния до 1200 м одновременно нескольким адресатам и получения данных от нескольких (до 32) абонентов со скоростью до 10 Мбит/с обеспечивает стандарт EIA RS-485, который часто используют в промышленности.

В последнее время все более популярным становится интерфейс USB (Universal Serial Bus). Первая версия этого стандарта утверждена в 1996 г. Нынешние компьютеры допускают подключение этого интерфейса даже в процессе работы, автоматически распознают его и активируют

требуемый для работы с ним драйвер. Протокол USB предусматривает 2 скорости передачи данных: высокую (12 Мбит/с) и низкую (1,5 Мбит/с). Он допускает большое количество соединенных в сеть устройств – до 127. Максимальная длина кабеля соединения – до 5 м. Сигналы передаются через 4-жильный кабель и 4-контактный разъём (рис. 26.9).

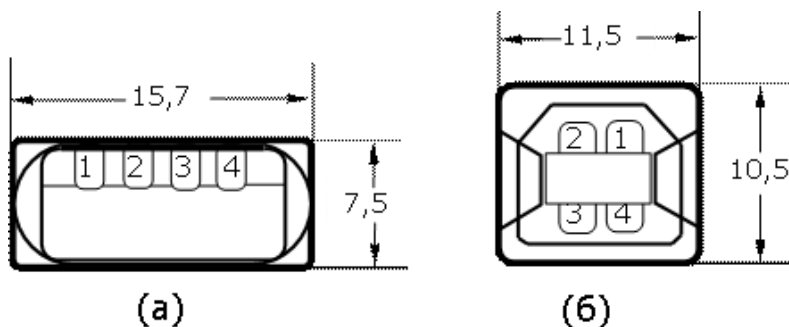


Рис. 26.9. Конструкция разъёмов USB, предназначенных: а) для соединения кабеля с компьютером; б) для соединения с периферийным устройством

Стандартом предусмотрено 2 формы разъёма: одна – для соединения кабеля с компьютером, другая – для соединения с периферийным устройством, в нашем случае – с интеллектуальным сенсором. Конструкция USB разъёмов рассчитана на многократное быстрое соединение/ разъединение, что важно для портативных сенсоров. Через первый контакт разъёма подается напряжение питания (обычно +5 В), которое может быть использовано для питания периферийного устройства небольшой мощности; через контакт 2 происходит прием, через контакт 3 – передача данных; контакт 4 – это "общая шина" (шина "земли").

"Старшим братом" интерфейса USB называют стандарт IEEE 1394, который именуют еще FireWire или L-Link. Он обеспечивает скорость передачи данных до 400 Мбит/с, которой достаточно даже для того, чтобы передавать в реальном времени динамические цветные видеозображения. К сожалению, большинство компьютеров еще не имеют соответствующего порта приема/передачи данных и не поддерживают этот стандарт. Тем не менее, он довольно перспективен.

Кроме последовательного интерфейса, существует немало стандартов **параллельного интерфейса**. В таком интерфейсе с целью ускорения обмена информацией данные передаются не по одному проводу бит за битом, а параллельно по нескольким проводам – байтами, полубайтами, 16-разрядными словами. Каждый бит передаётся в этом случае через свою жилу многожильного кабеля. Описание разных вариантов параллельного интерфейса довольно громоздко. В интеллектуальных сенсорах он практически не применяется. Поэтому детально описывать их мы не будем. Это можно прочитать в стандарте на параллельный интерфейс IEEE 1284.

Соединительный проводящий кабель вовсе не является обязательным элементом для обмена данными между сенсором и компьютером. Уже давно разработаны и используются устройства "инфракрасного" интерфейса. Большинство из нас пользуется пультками дистанционного инфракрасного (ИК) управления телевизорами, видеомэгагнитофонами, другой бытовой техникой. Сейчас действует стандарт на ИК интерфейс IrDA (Infra red Data Association), рассчитанный на "ближний" ИК диапазон длин волн 850–900 нм с максимумом спектральной плотности излучения вблизи 880 нм. Он позволяет использовать недорогие малогабаритные устройства ИК связи. Функциональная схема такого устройства показана на рис. 26.10. Он состоит из генератора тока (ГТ) через ИК светодиод (СД), фотодиода (ФД), как правило, с *p-i-n* структурой, из узла усиления и порогового детектирования сигналов (УПД).

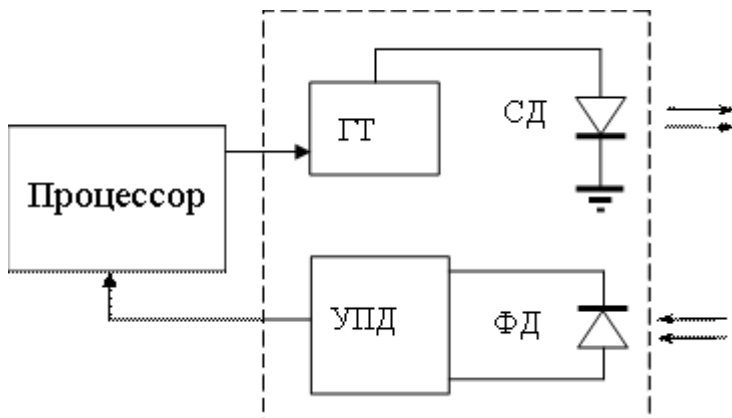


Рис. 26.10. Функциональная схема узла инфракрасного интерфейса

Стандарт IrDA требует, чтобы информация передавалась побайтно. В начале каждого байта прибавляется стартовый бит ("0"), а в конце – стоп-бит ("1"); всего выходит 10 бит. Последовательные биты кодируются таким образом: "0" передается ИК импульсом продолжительностью от 1,6 нс до 3/16 периода передачи одного бита; "1" передается отсутствием ИК излучения на указанном интервале времени. Интенсивность излучения в конусе $\pm 30 \text{ deg}$ должна быть 40-50 мВт/стерадиан. Двоичные коды, предназначенные для передачи, в том числе, стартовый и стоп-бит, формирует компьютер (в интеллектуальном сенсоре – микроконтроллер) и бит за битом подает их на ГТ. Когда поступает "0", то импульс тока пропускается через СД, который излучает при этом импульсы ИК света. Когда импульсы света попадают на ФД, в нем формируются соответствующие импульсы фототока, которые усиливаются и детектируются в УПД.

Принятый байт передается в компьютер. В программном обеспечении компьютера для своевременного обнаружения ошибок передачи могут предусматриваться периодическая передача и контроль 2-байтной контрольной суммы, двух- или трехкратная передача одних и тех же данных, передача ряда дополнительных контрольных битов, позволяющих обнаруживать и исправлять ошибки, и другие "хитрости". Скорость передачи может быть от 2400 бит/с до 4 Мбит/с.

Относительно скорости передачи, продолжительности импульсов, использования контрольных сумм, максимальной продолжительности одного "кванта" передачи, паузы между "квантами", о способе подтверждения приема сигналов и т.п. "соглашениях", стороны "договариваются" при установлении связи.

В последние годы все чаще стали применяться также *беспроводные интерфейсы* сверхвысокочастотной радиосвязи, особенно **Bluetooth**. Согласно стандарту Bluetooth 1.1 связь происходит на частоте около 2,4 ГГц (не лицензированная полоса частот) радиосигналами малой мощности на расстоянии до 10 м (с усилителем – до 100 м). Уже ряд фирм промышленно выпускают готовые Bluetooth модули, в которых заложена вся электроника и программное обеспечение, требуемые для установления и поддержания связи. Разработчику интеллектуальных сенсоров нет необходимости углубляться в детали работы этих модулей. Следует лишь обратить внимание на то, какие "профили" Bluetooth поддерживает избранный модуль, и есть ли среди них те, которые нужны для "общения" с нужными Вам компьютерами.

Один из примеров Bluetooth модулей – модуль BGB203-S06 компании NXP, показан на рис. 26.11. Он выпускается в миниатюрном корпусе HVQFN, предназначенном для поверхностного монтажа.



Рис. 26.11. Bluetooth модули BGB203-S06 компании NXP. Размер 8x7x0,8 мм

Модуль реализует наиболее популярный Bluetooth профиль – профиль последовательного интерфейса "Serial Port Profile" и автоматически обеспечивает эмуляцию стандартных последовательных интерфейсов RS-232 или USB. В модуль интегрирована флэш-память на 268 Кб, которая позволяет пользователю расширить выполняемые модулем функции.

26.6. Питание портативных интеллектуальных сенсоров

В завершение обзора элементной базы интеллектуальных сенсоров коснемся еще важного вопроса питания портативных сенсоров. Работая в автономном режиме, они часто не могут быть запитаны от стационарной электросети. В таких случаях для питания сенсора используют батарейки или аккумуляторы. При их выборе, кроме цены, важнейшее значение имеет такая их характеристика, как удельная энергоёмкость – отношение запасенной электроэнергии к массе или объему. В табл. 26.1 для 5 типов наиболее распространенных аккумуляторов приведены значения их удельной энергоёмкости.

Таблица 26.1. Удельная энергоёмкость аккумуляторов (средняя)

Тип аккумулятора	Удельная энергоёмкость	
	Вт·часов/кг	Вт·часов/ л
Щелочной	50	100
Никель–кадмиевый	45-80	140
Никель–металлогидридный	60–120	225
Ионно-литиевый	110–160	310
Ионно-литиевый полимерный	160–170	320–350

Как видно из этой таблицы, наибольшей удельной энергоёмкостью характеризуются ионно-литиевые полимерные аккумуляторы. Соответственно их и рекомендуется применять в портативных автономных сенсорах, у которых критически важны массогабаритные характеристики.

Краткие итоги

Интеллектуальные сенсоры должны выдавать пользователю информацию в наиболее удобной для него форме, предоставлять ему возможности изменять режимы работы сенсора, влиять на функционирование, привлекать внимание пользователя в критических и других предусмотренных ситуациях. С этой целью в состав сенсоров вводят узлы отображения (визуализации) информации, клавиатуру управления и звуковые сигнализаторы. Чаще всего в интеллектуальных сенсорах используют индикаторы на жидких кристаллах. Они потребляют мало энергии, имеют высокое отношение полезной площади к объёму, надёжны в работе и относительно недороги. Их работа основана на способности молекул жидких кристаллов переориентироваться в достаточно сильном электрическом поле и в их способности поворачивать плоскость поляризации проходящего поляризованного света. Сейчас промышленно выпускаются одно- и многопозиционные сегментные и матричные ЖК индикаторы, многострочные и сегментно-матричные, монохромные и цветные графические ЖКИ разных форматов и размеров. Как правило, они выпускаются вместе с электроникой, обеспечивающей формирование изображений и их запоминание.

Для "общения" пользователя с сенсором применяют разнообразные клавиатуры. Это могут быть отдельные кнопки или клавиши, пленочные (мембранные) или силиконовые клавиатуры.

Преимуществами пленочных и силиконовых клавиатур по сравнению с обычными кнопочными являются большой рабочий ресурс (свыше 20 млн. переключений), простота монтажа, небольшая цена, возможность спроектировать и воплотить уникальный собственный дизайн.

В интеллектуальных сенсорах часто применяют сенсорные экраны, в которых клавиатура и экран объединены в одно целое. Вместе с необходимым изображением на свободных местах экрана формируются изображения виртуальных кнопок управления, которые могут потребоваться в данном режиме работы. Для управления сенсором пользователь дотрагивается до экрана в соответствующих точках. Сообщение о прикосновении передается в микроконтроллер, который организует нужную реакцию на указание пользователя. При изменении режима работы сенсора виртуальные кнопки управления, ставшие не нужными, исчезают с экрана, а в других местах могут появиться другие кнопки управления в зависимости от потребности. Диалог интеллектуального сенсора с пользователем становится от этого более естественным, надежным, более понятным, дружелюбным.

В некоторых интеллектуальных сенсорах той памяти, которая обычно имеется в микрокомпьютере, оказывается недостаточно. Тогда используют необходимые виды дополнительной памяти: оперативной, постоянной, репрограммируемой или память большого объема с последовательным доступом. Набор промышленных микросхем памяти, пригодных для применения в интеллектуальных сенсорах, достаточно широк.

Для предоставления пользователям возможности непосредственного соединения их интеллектуального сенсора с внешним компьютером или с сетью связи применяют различные интерфейсы. Наиболее часто применяется последовательный интерфейс RS-232. Его поддерживают почти все микроконтроллеры и микроконверторы, в которые встроен для этого т.н. "последовательный порт". Все более популярным становится интерфейс USB. Нынешние компьютеры допускают подключение этого интерфейса даже в процессе работы. При необходимости в интеллектуальных сенсорах может быть использован также беспроводный интерфейс. Наиболее подходят для этого

"инфракрасный" интерфейс IrDA, рассчитанный на "ближний" ИК диапазон длин волн, и интерфейс сверхвысокочастотной радиосвязи Bluetooth.

27. Селекция полезных сигналов.

27.1. Обзор способов селекции полезных сигналов

Поскольку сигналы на выходах чувствительных элементов часто являются не только слабыми, но и зашумленными, то при разработке сенсоров возникает необходимость не только усиливать их, но и выделять из них лишь полезную часть, "отфильтровывать" шумы, помехи, посторонние влияния.

27.1.1. Взгляд на сенсор как на систему связи

В этом плане полезно иметь в виду то, что *сенсор* почти всегда *можно рассматривать как систему связи*. Источником "сообщений" в ней является исследуемый объект (процесс), от которого мы хотим получить ту или иную информацию. Технические узлы и среда, по которым "сообщение" проходит от объекта к чувствительному элементу и далее к микрокомпьютеру, – это "канал связи".

Микрокомпьютер и все другие узлы сенсора, обеспечивающие выдачу информации пользователю, можно рассматривать как "приёмник".

Если сенсор является активным, то узлы воздействия на объект (процесс) можно рассматривать как "канал обратной связи", а сенсор в целом, вместе с объектом исследования, – как "адаптивную систему с обратной связью". Взгляд на сенсор под такими углами зрения весьма плодотворен потому, что на сегодняшний день для систем связи, радио- и эхолокации и т.п. отработано уже много эффективных теоретических и практических способов селекции полезных сигналов, выделения их из помех и шумов. Поскольку это – отдельная самостоятельная широкая тема, то, отсылая особо заинтересованных слушателей к специальной литературе, в этой лекции мы дадим лишь краткий обзор способов селекции полезных сигналов.

Сначала сделаем ударение на том, что правильный выбор способов селекции зависит от конкретных обстоятельств. Во-первых, от того, какая именно информация от объекта является полезной для данного

конкретного применения; и, во-вторых, от того, каков характер шумов, помех, посторонних влияний в данном конкретном случае, и насколько они мешают получению нужной информации. Чем лучше известны ответы на эти вопросы, тем более эффективный способ селекции можно выбрать.

" *Полезный сигнал* " – понятие относительное. Обобщая, можно сказать, что это – та составляющая сигналов от чувствительных элементов, которая несет нужную пользователю информацию о наблюдаемом объекте, процессе в соответствии с назначением сенсора. В каждом конкретном сенсоре конкретизация этого понятия – своя.

27.1.2. Способы выделения дифференциальных сигналов, использования опорного канала, дифференцирования, интегрирования

Во многих случаях является важным не абсолютное значение какой-то физической величины, а текущее ее отклонение от определенной нормы. В таких случаях применяют способ "*выделения дифференциальных сигналов*".

В "Элементная база интеллектуальных сенсоров. Часть 1" и в предыдущих лекциях мы уже рассказывали о применении с целью фильтрации шумов и посторонних воздействий *пар чувствительных элементов* и обработке дифференциальных сигналов от них.

В многоканальных сенсорах для выделения полезной информации часто выполняется *сопоставительный анализ* измеряемых в разных каналах сигналов. Это может быть их сложение, вычитание, "наложение", мультиплицирование, вычисление отношений, корреляций и т.д. Один из каналов может рассматриваться при этом как "*опорный*". Помехи и посторонние влияния, одинаково действующие на все каналы, могут быть, благодаря этому, скомпенсированы.

В тех случаях, когда сенсор должен реагировать на скорость изменения измеряемой величины (скорость изменений и является в данном случае "полезным" сигналом), в селекторе выполняют дифференцирование сигнала. Оно может выполняться в аналоговой форме (например, с помощью известной электрической "дифференцирующей цепочки")

или же в цифровой форме – в микрокомпьютере, входящем в состав сенсора.

Дифференцирование применяют также для более точной фиксации моментов резкого изменения состояния объекта или нарушения хода исследуемого процесса.

В тех случаях, когда шумы, помехи, посторонние влияния являются биполярными, т.е. могут как уменьшать, так и увеличивать полезный сигнал, эффективным бывает *метод* интегрирования сигналов на определенном интервале времени. Часто с этой целью используют R-C-цепочку и накопление электрического заряда на конденсаторе. Положительные и отрицательные вклады шумов, помех, посторонних влияний благодаря интегрированию во времени взаимно компенсируют друг друга, а энергия полезного сигнала накапливается и как бы "вырастает над фоном". Иногда именно интегрированный сигнал и является "полезным", как, например, в сенсоре количества света, получаемого растениями за световой день.

В двухканальных сенсорах, в которых используется не только "измерительный", но и т.н. "опорный" (или "референтный") канал, интегрирование сигналов в обоих каналах можно проводить до тех пор, пока в "опорном" канале суммарный сигнал не достигнет определенного заведомо заданного уровня. В этот момент сигнал, накопленный в "измерительном" канале, пропорционален отношению сигналов в обоих каналах. Помехи и посторонние влияния, одинаково действующие на оба канала, будут благодаря этому тоже скомпенсированы.

27.1.3. Частотная селекция

Следующим способом, который широко применяют на практике, является частотная селекция. Она эффективна в тех случаях, когда частотный спектр полезных сигналов существенно отличается от частотного спектра шумов, помех, посторонних влияний. Шумы, например, имеют обычно очень широкий частотный спектр. Если с помощью *частотного фильтра* выделить лишь ту полосу частот, которая нужна для правильного воспроизведения полезных сигналов, то последние будут лишь незначительно ослаблены фильтром, а энергия шумов будет ослаблена во много раз, – тем сильнее, чем уже

частотная полоса "пропускания" фильтра. И соотношение "сигнал/шум" может значительно возрасти.

Наиболее распространены электрические частотные фильтры, но, как мы видели в предыдущих лекциях, применяются также оптические, акустические, механические та другие частотные фильтры.

Когда надо воспринимать информацию о характеристиках объектов (процессов), которые могут изменяться лишь медленно, то применяют *низкочастотные фильтры*, которые хорошо пропускают сигналы с частотами ниже некоторого "порога" (ν_H), но сильно ослабляют или, еще лучше, совсем "отрезают" сигналы с частотами выше ν_H . Если, например, надо фиксировать и измерять изменения атмосферного давления, влажности воздуха, температуры человеческого тела или другого большого инерционного объекта, которые из-за значительной инерции не могут изменяться быстро, то компоненты сигнала с частотами выше 1-10 Гц можно смело "отрезать". Благодаря этому работа сенсоров только улучшится.

Когда надо, наоборот, выделять только высокочастотные сигналы, применяют *фильтры высоких частот*, которые хорошо пропускают сигналы с частотами выше определенного "порога" (ν_B), но очень ослабляют или, еще лучше, совсем "отрезают" сигналы с частотами ниже ν_B . Такие фильтры применяют тогда, когда надо избавиться от влияния постоянного "фона" и низкочастотных помех, например, от постоянной внешней подсветки, от влияния постоянного магнитного поля Земли, атмосферного давления и т.п.

Когда надо выделять сигналы лишь из определенной полосы частот, то применяют полосовые фильтры, которые хорошо пропускают сигналы с частотами в диапазоне от $(\nu - \Delta\nu)$ до $(\nu + \Delta\nu)$, но очень ослабляют, а еще лучше совсем "отрезают" сигналы с частотами вне этого диапазона. Величину $\Delta\nu$ называют полушириной частотной полосы пропускания фильтра. Именно полосовые фильтры используются чаще всего. Светофильтры в оптике, радиотехнические фильтры для выделения радиосигналов лишь нужного диапазона частот, акустические фильтры для выделения ультразвуковых (УЗ) волн заданной частоты в УЗ сенсорах и эхолокаторах, – далеко не полный их перечень.

Применяют также и так называемые "*режекторы*", которые очень ослабляют или совсем "отрезают" сигналы с частотами в диапазоне от

$(v-\Delta v)$ до $(v+\Delta v)$, но хорошо пропускают сигналы всех других частот. Режекторы применяют тогда, когда надо целенаправленно "заглушить" помехи и посторонние влияния в заведомо известной полосе частот (так называемые "сосредоточенные" помехи). Скажем, известно, что в условиях города часто донимают электромагнитные помехи от сети электропитания переменного тока с частотой около 50 Гц. Если в полезных сигналах компоненты с частотами 50 Гц и (кратной ей) 100 Гц не несут какой-то важной информации, то электромагнитные помехи от сетей питания можно значительно уменьшить, используя соответствующие режекторы.

В активных сенсорах часто оказывается выгодным *целенаправленно модулировать* одно из воздействий на объект и после чувствительного элемента с помощью частотного фильтра выделять лишь составляющую первичного сигнала с соответствующей частотой модуляции. Она как раз и несет избирательную информацию об отклике объекта на переменное воздействие. Изменяя частоту модуляции воздействия, можно таким образом исследовать частотный спектр откликов и сделать выводы о динамических свойствах объекта наблюдения.

27.1.4. Временная и синхронная селекция

В тех случаях, когда полезные сигналы имеют некоторые временные особенности, эффективной может быть их временная селекция. Чаще всего ее применяют тогда, когда изменения в объекте, которые интересуют пользователя, имеют импульсный характер. Выделяя лишь импульсы нужного диапазона продолжительности и "отсекая" более короткие и более длинные импульсы, тоже можно значительно улучшить соотношение сигнал/шум. В активных сенсорах этим иногда можно воспользоваться, умышленно организовав именно импульсное воздействие на объект и измеряя соответствующий импульсный отклик.

Когда "сообщения" от объекта наблюдения имеют вполне определенные моменты и временные интервалы своего появления или же имеют полностью определенные частоты и фазы, то в таком случае особенно эффективной становится *"синхронная" селекция*.

Принцип временной синхронной селекции показан на рис. 27.1.

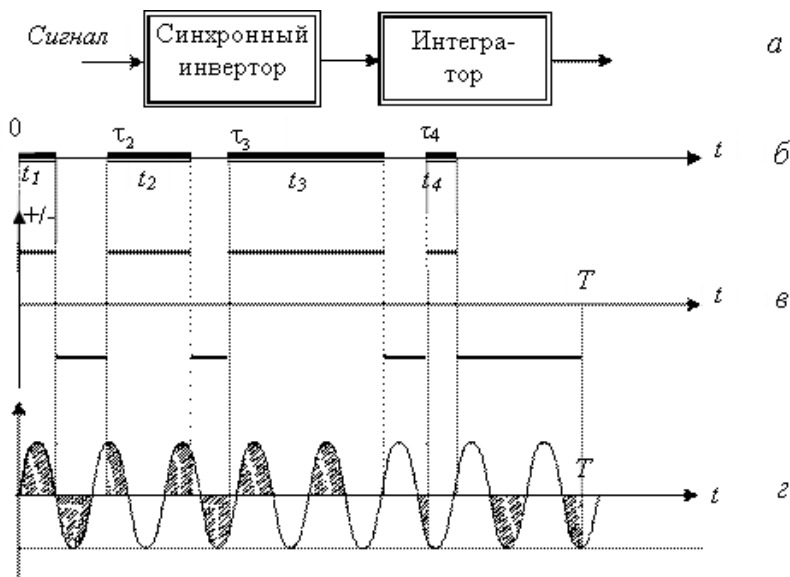


Рис. 27.1. Принцип временной синхронной селекции

На рис. 27.1, *а* изображена функциональная схема такого синхронного селектора. Он состоит из интегратора и синхронного инвертора, который в периоды отсутствия полезного сигнала инвертирует ток, поступающий от чувствительного элемента.

На рис. 27.1, *б* на оси времени толстыми линиями выделены те интервалы, когда может поступать полезный сигнал. В данном примере мы имеем 4 таких интервала. Отсчет времени начинается от начала первого интервала, другие интервалы начинаются соответственно в моменты времени T_2, T_3, T_4 . Продолжительность интервалов времени составляет t_1, t_2, t_3, t_4 соответственно. В эти интервалы времени сигнал проходит на интегратор без инвертирования.

В паузах между ними и после последнего интервала сигнал перед подачей на интегратор инвертируется. Общее время интегрирования $T=2(t_1 + t_2 + t_3 + t_4)$ точно вдвое превышает суммарную продолжительность всех интервалов поступления полезного сигнала. Поэтому суммарные продолжительности интегрирования не инвертированного и инвертированного сигналов одинаковы (рис. 27.1,

в). Если средняя мощность шума или помех не изменяется существенно за время приема сигнала (а это почти всегда так), то на выходе интегратора их среднеквадратический суммарный вклад приблизительно нулевой, т.е. они эффективно "отфильтровываются". А вклад полезного сигнала при интегрировании с инверсией не изменяется, так как в соответствующие интервалы времени полезный сигнал отсутствует.

Наиболее опасны лишь помехи, совпадающие по частоте и фазе с какими-то компонентами полезного сигнала. В качестве примера на рис. 27.1, з приведена помеха, согласованная по частоте и фазе с первым интервалом полезного сигнала. Штриховкой выделены те ее части, которые суммируются в интеграторе. А части, которые вычитаются в интеграторе, оставлены не заштрихованными. Легко видеть, что суммарные площади обоих типов частей благодаря аperiodичности временной структуры полезного сигнала приблизительно одинаковы. Итак, даже такие наиболее опасные помехи существенно ослабляются.

В активных сенсорах очень эффективен метод "синхронной модуляции/демодуляции". Нужно специально подобрать такую временную структуру полезного сигнала, чтобы его можно было эффективно отфильтровывать от имеющихся или потенциально возможных помех. Воздействия на объект во времени производятся в соответствии с подобранной структурой. А синхронный инвертор синхронизируется от микрокомпьютера одновременно с управлением узлами воздействия.

Методы синхронной селекции полезных сигналов в случае, если "сообщения" от объекта наблюдения имеют вполне определенные частоты и фазы, описаны в литературе.

Наличие микрокомпьютера в интеллектуальных сенсорах позволяет широко использовать в них с целью селекции также цифровую обработку сигналов, методы которой описаны в литературе. В активных интеллектуальных сенсорах с целью селекции сигналов и оптимизации работы можно реализовать также новейшие методы организации адаптивных систем связи.

27.2. Проектирование интеллектуальных сенсоров

Создание и внедрение интеллектуальных сенсоров – это сложный процесс, который, как мы видели, иногда растягивается на десятки лет. Он требует разносторонних профессиональных знаний, глубокого проникновения в предмет исследования, слаженной совместной работы многих специалистов из разных областей знаний. Даже уже созданные действующие, доказавшие свою эффективность интеллектуальные сенсоры, как правило, требуют еще многих лет "доводки" – испытаний, усовершенствований, проверки практикой применения, иногда коренных, очень существенных изменений. Тем не менее, "рождение" интеллектуального сенсора начинается всегда с удачной идеи, с ее воплощения в конкретные конструкции, исследования, экспериментальной проверки, теоретического обоснования и анализа, дополнения и конкретизации общей идеи важными деталями, методиками, схемами, программами. Всё это – стадия научно-исследовательской разработки. Именно эту стадию мы и рассмотрим подробнее.

Основные этапы научно-исследовательской разработки интеллектуальных сенсоров показаны на рис. 27.2.

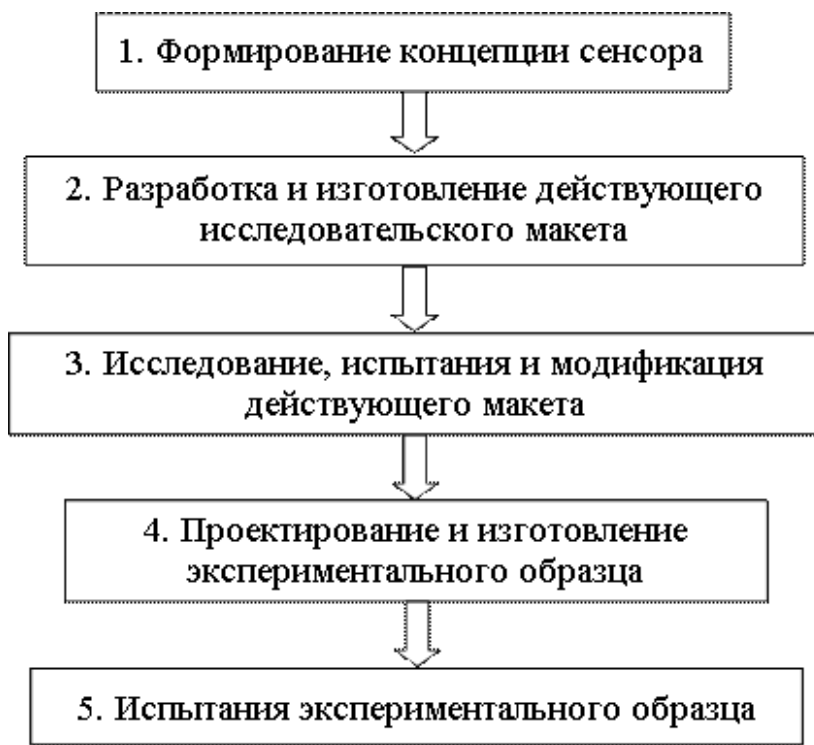


Рис. 27.2. Основные этапы научно-исследовательской разработки интеллектуальных сенсоров

27.2.1. Формирование концепции сенсора

Особенно важен первый этап, поскольку именно от его успешного выполнения зависит судьба всей дальнейшей разработки. Формулируя *общую* концепцию построения сенсора, надо ответить на такие вопросы:

1. Для чего предназначен данный сенсор? Какие изменения в исследуемом объекте или процессе надо обнаруживать, какие параметры измерять? Какие задачи решать?
2. Существуют ли уже разработанные сенсоры подобного назначения (сенсоры-аналоги)? Если есть, то какие характеристики они имеют?

3. Какими будут принципы действия сенсора? Какие явления и закономерности будут использованы? Нужно ли будет как-то воздействовать на объект исследования и как именно?
4. Как надо будет обрабатывать получаемую "сырую" информацию?
5. Можно ли будет и за счет каких факторов превзойти, улучшить характеристики сенсоров-аналогов?
6. Какие принципиальные трудности могут возникнуть при реализации проекта, и есть ли пути преодоления этих трудностей?

Имеются *разные подходы* к формированию концепции интеллектуальных сенсоров. В одних случаях разработчики исходят из *назревших нужд практики*. В таком случае ответы на вопрос 1 уже известны до начала работы, и надо начинать с вопросов 2. Если известны ответы и на них, – то начинать с вопросов 3.

Например, известны сенсоры, измеряющие концентрацию глюкозы в крови человека (глюкометры). Но для их применения надо брать у человека пробу крови. Это связано с болевыми ощущениями, потенциальной опасностью заражений и необходимостью строго придерживаться правил асептики. Для больных сахарным диабетом I типа, которым необходимо контролировать уровень сахара в крови 4-6 раз в сутки, это неприятная процедура. Поэтому имеется потребность в неинвазивных глюкометрах, позволяющих определять концентрацию глюкозы в крови человека без взятия пробы крови.

Уже при постановке данной задачи известны ответы на вопросы 1 и 2. Разработка начинается с поиска ответов на вопрос 3. В ходе поиска следует рассмотреть как можно более широкую "палитру" возможных принципов действия. В примере с разработкой неинвазивного глюкометра "палитра" возможных принципов действия охватывает, например, такие варианты:

- поляриметрический принцип (известно, что молекулы сахаров, в том числе и глюкозы, при прохождении сквозь них плоскополяризованного света, немного поворачивают его плоскость поляризации; это характерное свойство сахара уже давно используют в сахариметрах – сенсорах для определения концентрации сахара в растворах); в этом случае какой-то участок тела (например, мочку уха) надо освещать

- поляризованным светом и измерять угол поворота плоскости поляризации света, прошедшего сквозь этот участок;
- спектрофотометрический принцип (известно, что химические элементы и вещества имеют характерные спектры излучения и поглощения света, поэтому анализируя состав теплового излучения тела или изменения в спектральном составе света после прохождения его сквозь какую-то часть человеческого тела, например, сквозь мочку уха можно надеяться на количественное определение содержания в ней глюкозы); в этом случае исследуемый участок тела надо будет облучать светом определенного спектрального состава;
 - принцип косвенного измерения (можно надеяться, что концентрация глюкозы в крови человека прямо связана с концентрацией глюкозы в легко доступных тканевых жидкостях; поэтому, измерив концентрацию глюкозы в этих жидкостях, можно рассчитать ее концентрацию в крови), в этом случае надо обеспечить доступ к тканевой жидкости;
 - тепловой принцип (основная часть тепла в человеческом теле выделяется при "сжигании", т.е. при окислении в живых клетках именно глюкозы, поэтому измеряя количество теплоты, которая, выделяется некоторым участком тела, кровотоком сквозь этот участок, количество доставленного кислорода, можно надеяться на расчет концентрации глюкозы в крови);
 - реографический принцип (изменение концентрации глюкозы в крови, в окружающих клетках и в межклеточной жидкости может влиять на электропроводность и электроемкость ткани); измеряя электрическое сопротивление участка тела постоянному току и импеданс на разных частотах, можно надеяться рассчитать концентрацию глюкозы в крови) и т.п.

Каждый из возможных принципов действия надо внимательно рассмотреть, чтобы дать ответы на вопросы 4, 5, 6. С этой целью следует получить консультации специалистов каждого соответствующего направления науки, во многих случаях нужны модельные эксперименты или компьютерное моделирование. Особенно тщательно следует искать ответы на вопрос 6. Недостаточное внимание к этим вопросам может обернуться большими разочарованиями, задержками и потерями на следующих этапах разработки.

Дальше мы рассмотрим некоторые досадные, но поучительные примеры из истории разработки неинвазивных глюкометров, не называя конкретные фирмы и фамилии разработчиков, чтобы не навредить их деловой репутации. Подобные неприятности могут случиться с каждым, поскольку сложные научно-технические разработки всегда дело рискованное, заведомо однозначно не гарантированное. Ведь это почти всегда – шаг в сторону неизвестного.

Исторически первыми начались разработки неинвазивных глюкометров на поляриметрическом принципе. Сначала была исследована "оптическая активность" глюкозы. В соответствии с известным законом Био угол ϕ поворота плоскости поляризации после прохождения света сквозь слой раствора толщиной d с концентрацией оптически активного вещества c задается формулой

$$\phi = [a] cd \quad (27.1)$$

где $[a]$ называют удельным коэффициентом оптической активности или константой вращения. Измеряя угол поворота ϕ и зная $[a]$ и d , по этому закону можно вычислить концентрацию оптически активного вещества в исследуемом растворе. Для глюкозы найдена константа вращения $[a] \approx 0,0052$ град/(ммхг %). Далее было взято типичное значение концентрации глюкозы в крови человека $c \approx 100$ мг % и подсчитано, что при прохождении плоскополяризованого света сквозь живую ткань (например, мочку уха) пути $d \approx 5$ мм при указанной концентрации глюкозы угол поворота плоскости поляризации будет составлять порядка 10 угловых секунд. Измерение таких малых углов поворота довольно сложная техническая задача. Опытные разработчики предложили и запатентовали разнообразные хитроумные способы и устройства для решения этой задачи. Тем не менее, надежных результатов на этом пути до сих пор достичь не удалось.

Дело в том, что в начале разработок так и не были получены обоснованные ответы на вопрос 6. Своевременно не обратили внимание на тот факт, что объемная доля крови в доступных для исследования частях тела (мочка уха, палец, и т.п.) составляет лишь 2-5%. Поэтому средняя концентрация глюкозы в живой ткани на самом деле в 20-50 раз меньше, чем в крови, т.е. порядка 2-5 мг %. И соответственно углы поворота плоскости поляризации на самом деле тоже в 20-50 раз меньше, т.е. составляют порядка десятых частей угловой секунды. Поэтому те технические находки, которые с большими трудностями работали на модельных растворах глюкозы с

концентрацией 100 мг %, на реальном человеческом теле не срабатывали. Кроме того, препятствием становится еще и значительное рассеяние света биологической тканью, частично деполаризирующее свет.

Иная ситуация при формировании концепции "интеллектуальных" сенсоров возникает тогда, когда научно-техническая фирма уже в совершенстве владеет какой-то технологией, получает от ее использования прибыль, но хочет *расширить рамки применения своей технологии*. В таком случае принцип действия сенсора, явления и закономерности, которые будут использоваться, уже заведомо известны. Тогда разработка начинается с поиска ответов на вопросы 1 и 2. В таком случае следует предварительно рассмотреть как можно более широкий спектр возможных применений Вашей технологии, чтобы выбрать самую перспективную сенсорную задачу, решение которой обещает наибольший успех. Для каждого из возможных применений надо дать ответы на вопросы 4, 5 и особенно тщательно искать ответы на вопрос 6.

Приведем пример тоже из реальной истории разработки неинвазивного глюкометра. Фирма в совершенстве владела технологией построения БИК спектрофотометрических сенсоров, т.е. сенсоров, работающих в ближней инфракрасной (БИК) области спектра. Она наладила, например, серийный выпуск БИК сенсоров для неповреждающего контроля наличия и определения содержания жиров в продуктах питания (в пакетах с молоком, сметаной и другими молокопродуктами, и т.п.) и получала от этого неплохие прибыли. Желая расширить область применения своей технологии, фирма могла рассмотреть, например, такие направления:

- выявление наличия и измерение концентрации других веществ с характерными спектрами в БИК области;
- создание незаметных невооруженным глазом охранных БИК сенсоров для фиксации пересечения какой-то контрольной линии посторонними людьми, существами или предметами;
- создание неинвазивных глюкометров;
- создание БИК сенсоров для незаметной телекоммуникации в залах, на стадионах, для дистанционного управления любой техникой и т.п.

Фирма остановилась на актуальной задаче создания неинвазивных глюкометров. Учитывая возрастающее количество людей, больных на диабет, в случае успешного решения этой задачи можно было надеяться на получение наибольших прибылей. В качестве модельного объекта в поиске ответа на вопрос 4 тоже были использованы слабые растворы глюкозы с типичными для крови концентрациями порядка 30; 100 и 300 мг %. Найдено и запатентовано несколько способов и устройств, которые на пределе возможного, но "работали" на указанных модельных объектах, даже когда в раствор добавляли фоновые вещества, подобные обычно присутствующим в крови (растворимые жиры, белки и т.п.). Тем не менее, когда спроектировали и изготовили экспериментальные образцы глюкометра, в которых концентрация глюкозы измерялась путем просвечивания пальца руки и анализа прошедшего сквозь него БИК света, то результаты оказались намного хуже. Специалисты фирмы выискивали пути усовершенствования сенсора, разработали и изготовили с десятков новых "поколений" прибора. В конце концов, из-за недостаточной точности прибор так и не смог пройти официальные медицинские испытания.

Повышенный риск неудачи и здесь был заложен еще на этапе формирования концепции построения сенсора из-за недостаточного внимания к поиску ответов на вопрос 6. Здесь не учли то, что измерения будут проводиться не непосредственно на крови, а на живой ткани, в которой кровь занимает лишь незначительную долю объема, поэтому средняя концентрация глюкозы в десятки раз меньше.

27.2.2. Следующие этапы научно-исследовательской разработки

На этапе разработки и изготовления действующего исследовательского макета следует особенно позаботиться о том, чтобы модельный объект был максимально приближен к реальному, создавал все трудности, которые могут быть и в реальном объекте, и даже большие. А еще лучше, если это возможно, обеспечить условия, при которых исследования действующего макета можно проводить на реальных объектах.

Исследовательский макет следует проектировать так, чтобы в него можно было относительно легко вносить изменения, добавлять новые узлы, блоки, регулировать режимы работы, иметь по возможности более широкий динамический диапазон измерений.

На этапе исследования, испытания и модификации действующего макета надо быть очень придирчивым к самому себе, страховать себя от получения ненадежных, случайных, ошибочных результатов. Полученные результаты ни в коем случае нельзя приукрашивать, выдавать желаемое за действительное, поскольку с этим могут быть связаны очень значительные потери на следующих этапах разработки.

В вышеприведенных примерах разработки неинвазивных глюкометров ошибка проектировщиков на этапах 2 и 3 как раз и заключалась в том, что модельные объекты – слабые растворы глюкозы были не адекватны реальному объекту, т.е. живой ткани тела.

На этапе проектирования и изготовления экспериментального образца сенсора следует досконально изучить и проанализировать имеющуюся в данный момент элементную базу, выбрать из нее оптимальные варианты. "Оптимальность" не означает, что это обязательно должны быть наилучшие электронные, оптические или оптоэлектронные компоненты. Ведь наилучшие, новейшие компоненты, как правило, и наиболее дороги. "Оптимальность" означает, что компоненты должны удовлетворять всем требованиям, необходимым для надежной работы сенсора в заданном диапазоне условий, но при этом должны быть по возможности более дешевы, доступны, технологически удобны при изготовлении и налаживании сенсоров.

На этом этапе надо уже провести детальные расчеты схем, энергетики сигналов. Следует проанализировать все факторы, от которых зависят чувствительность сенсора и точность измерений, защита от возможных вредных посторонних влияний и помех. Следует предусматривать возможность оперативных модификаций экспериментальных образцов сенсора, программ их работы. Наличие микрокомпьютера в составе "интеллектуальных" сенсоров способствует этому, если предусмотреть возможность его перепрограммирования, изменения заложенных в рабочую микропрограмму параметров и исходных данных.

В вышеприведенном примере разработки спектрофотометрического БИК сенсора глюкозы каждый экспериментальный образец "ради экономии времени" проектировался сразу "начисто", чтобы он был готов к промышленному воплощению. Поэтому и пришлось проектировать и изготавливать десяток "готовых к промышленному воплощению" "поколений" этого сенсора, тратя излишне много

времени. Сроки разработки можно было сэкономить, если бы конструкция экспериментального образца проектировалась более "гибкой", удобной для модификации и доработки.

Уже на *этапе испытаний экспериментального образца* сенсора следует привлечь специалистов-практиков, которые будут в дальнейшем пользоваться этим сенсором, проводить испытания в том числе и в реальных условиях применения сенсора и, желательно, в разных местах. Именно там можно уточнить эксплуатационные и эргономические требования к сенсору, особенности, нюансы применения, понять, как сделать его удобным для пользования. Одновременно можно начать и предварительные маркетинговые исследования, результаты которых нужны для обоснования целесообразности создания промышленных образцов. Предварительные испытания по показателям назначения должны выполняться как можно объективнее, без всяких поблажек и попыток необоснованно отбросить неприятные для разработчика результаты, как якобы ошибочные или "случайные". Опыт многих и многих разработок свидетельствует о том, что выявление тех или иных недостатков сенсоров лишь на заключительном этапе официальных сертификационных испытаний оказывается намного более болезненным, чем в случае их своевременного выявления на этапе предварительных испытаний.

Требования к этапам последующей опытно-конструкторской разработки сенсоров являются общепринятыми, в значительной мере стандартизованы и излагаются в общетехнических курсах. Поэтому на них мы останавливаться не будем.

27.3. Программирование интеллектуальных сенсоров

Для того, чтобы сенсор был и в самом деле интеллектуальным, "разумным", его надо правильно *запрограммировать*. Это означает – разработать и записать в память сенсора всесторонне продуманные и проверенные программы работы микрокомпьютера.

Значительная часть "интеллектуальности" сенсора определяется именно его программным обеспечением. Тот, кто всерьез занимался программированием компьютеров или микрокомпьютеров, не раз сталкивался с удивительным ощущением. Имеешь дело с тем же самым "железом", с той же конструкцией машины, устройства,

сенсора. В их составе ничего не меняется. Ты лишь заносишь в память лучшую программу. И на глазах происходит чудо: плохо "соображавший" ранее "тупой автомат" вдруг превращается в "разумное существо", которое удивительно осмысленно, рационально действует на всем множестве прогнозируемых ситуаций! И чем лучше продумана программа, тем "умнее", точнее становятся действия сенсора, его реакции на изменения ситуации. А при хорошо продуманных программах сенсор разумно "ведет себя" даже и в заранее не прогнозируемых ситуациях. В такие минуты ощущаешь себя "чутьочку богом", поскольку именно ты "вселил в мертвое железо ум".

Но, ради истины, надо подчеркнуть, что значительную часть "интеллектуальности" сенсора определяют также его конструкция, выбранный микропроцессор, микроконтроллер, микроконвертор. Когда переходишь от одного микропроцессора к другому, более совершенному, который почти на таком же кремниевом чипе имеет значительно больше возможностей, на котором "идут" значительно более сложные и эффективные программы, то понимаешь, что микропроцессор – это далеко не "мертвое железо". И всегда восхищаешься мудростью и мастерством тех, кто разрабатывал, проектировал и изготавливал этот чип. Ведь они создали не больше и не меньше, как "искусственный мозг", который во многом уступает, но кое в чем и превосходит биологический мозг, созданный природой!

27.3.1. Рекомендуемый порядок разработки программ

Исходя из собственного опыта программирования интеллектуальных сенсоров, мы можем посоветовать следующий порядок разработки текстов программ. Разработку стоит начинать с подготовки документа "Постановка задачи" и написания полного "сценария" работы сенсора (рис. 27.3).



Рис. 27.3. Рекомендуемая последовательность разработки текста программы работы интеллектуального сенсора

"Сценарий работы" интеллектуального сенсора представляет собой детальное описание работы сенсора во всех предполагаемых режимах и ситуациях. Он нужен для того, чтобы четко понимать, что в каждом из режимов, в каждой ситуации должен делать микрокомпьютер.

Оба эти документа следует обсудить, обдумать, согласовать с конструкторами всех основных узлов сенсора и с теми специалистами, которые будут им пользоваться. Сам факт официального подписания этих документов с последующей возможной ответственностью за ошибки стимулирует всех участников добросовестно отнестись к работе по их созданию, избежать многих досадных "промахов", которые обычно случаются при легкомысленном отношении к этой работе и очень досаждают, а то и могут дорого обойтись на следующих этапах разработки интеллектуального сенсора. "Постановка задачи" и "Сценарий работы", насколько это возможно, должны предусматривать и перспективное развитие, предполагаемые усовершенствования сенсора, должны быть ориентированы в будущее. На конкретном этапе разработки временный сценарий работы может быть упрощенным, неполным, "урезанным". Но ориентировка "на максимум", на будущее заложит основу для существенного сокращения работы по программированию будущих усовершенствованных версий сенсора.

27.3.2. Метод постепенной декомпозиции

На основе хорошо продуманного, согласованного со специалистами сценария составляются блок-схемы программы методом постепенной декомпозиции. Сначала составляется наиболее общая ("системная") блок-схема, определяющая крупнейшие программные блоки, которые будут обслуживать основные режимы и этапы работы сенсора, порядок передачи управления от одних блоков к другим. Названия программных блоков и их программные "метки" следует подбирать так, чтобы по названию легко было догадаться об их назначении. Далее крупные программные блоки детализируют, создавая блок-схемы уже для каждого из них. Детализацию продолжают до тех пор, пока не станет возможным для каждого из программных модулей начертить уже детальную схему алгоритма его работы или свести его к какой-то стандартной подпрограмме, которая уже отработана у разработчика и имеется в библиотеке стандартных программных модулей. На этом этапе алгоритмизации надо рассмотреть все возможные методы реализации сложных преобразований и выбрать из них наилучший для данных конкретных условий. Затраты времени на это, как правило,

окупаются потом сокращением сроков разработки и качеством программ.

Сопоставляя алгоритмические схемы всех программных модулей, находят похожие их части или почти одинаковые блоки и, если это сулит определенный выигрыш, формируют специфические для данного сенсора стандартные процедуры. Разработанные алгоритмические схемы корректируют с учетом этих процедур и внимательно выискивают пути дальнейшей рационализации.

Уже на этом этапе следует подбирать контрольные примеры для последующей отладки всех возможных разветвлений ("веток", "траекторий") каждой процедуры. Во-первых, так или иначе, это придется сделать на этапах отладки и контроля программы, во-вторых, это поможет как можно раньше выявить ошибки и своевременно избавиться от неопределенностей и нестыковок в составленной алгоритмической схеме, что сократит время разработки. Чтобы подобрать эффективные контрольные примеры, анализируют поведение программного модуля при изменении значений входных данных, определяют область допустимых значений, критические значения входных данных, если таковые есть. Размышляют над тем, как будет работать программный модуль, если в него по ошибке попадут критические входные данные или данные, выходящие из области допустимых значений. И, в случае необходимости, вводят страхующие процедуры. На этом этапе стоит обратить внимание на потребности в использовании таймеров-счетчиков и предотвратить возможность "конфликтов" в их использовании разными подпрограммами.

Во многих учебниках и указаниях по программированию утверждается, что каждый программный модуль должен иметь лишь одну точку входа и одну точку выхода. В большинстве случаев таки следует придерживаться этой рекомендации. Но не стоит воспринимать ее как категорически необходимое требование. В частности, это касается "диагностических" программных модулей, контролирующих значения входных или внутренних текущих данных и, если они выходят за допустимый диапазон, должны сообщить об этом пользователю и дальше действовать по его указаниям. Такие модули могут иметь несколько выходов. Но надо внимательно проанализировать каждый из возможных выходов, чтобы ни один из них не создавал предпосылок для ошибочного функционирования

следующих программных модулей. На каждом из выходов всё должно быть "тщательно убрано за собой".

Для "подпрограмм", которые претендуют на пополнение библиотеки стандартных подпрограмм, это требование "один вход и один выход" является обязательным. Это зафиксировано даже в международном стандарте на программные продукты Hierarchy-Input-Process-Output (HIPO). Для подпрограмм исключается также "эффект последствия", когда текущая работа программы может повлиять на ее работу при следующих вызовах. Как правило, подпрограммы параметризуются, т.е. предполагается, что вызов такой подпрограммы должен сопровождаться указанием значений ее параметров и/или операндов (входных данных, которые в ней будут обрабатываться).

Преимуществами широкого использования подпрограмм являются сокращение длины программы работы сенсора в целом, возможность их автономной отладки, параллельной их разработки несколькими программистами, экономия времени при комплексной отладке сенсора и перспектива использования при программировании следующих усовершенствованных образцов сенсора и при будущих разработках других сенсоров.

На этапе коррекции алгоритмических схем программных модулей следует провести многократное "мысленное имитирование" их работы в специально осложненных случаях, при наличии всех возможных прерываний (даже не предвиденных), в том числе, когда из-за отвлечения на обработку прерываний можно не заметить какое-то важное кратковременное событие.

27.3.3. Подготовка текстов программ

Лишь после итерационной коррекции алгоритмических схем, когда они уже стали для Вас совсем четкими и прозрачными, следует приступить к написанию текстов процедур, подпрограмм и программных модулей. К этому времени должны быть окончательно известны программные адреса всех интерфейсов контроллера, т.е. выводов и портов, через которые вводится или выводится каждый элемент данных, и формат, в котором это происходит. Сначала делают предварительное распределение памяти программ и памяти данных и выбирают язык программирования.

Практика показала, что оптимальными для программирования интеллектуальных сенсоров являются 2 алгоритмических языка: "ассемблер" и "СИ". Программировать на них несколько сложнее и дольше, чем на языках высокого уровня, но после трансляции на машинный язык программы выходят короче, эффективней и работают быстрее. Существует много учебников и справочников по программированию на этих языках. Мы советуем начинать написание текстов с подпрограмм обработки прерываний. Они должны быть как можно короче, быстро выполняться и, главное, не вредить работе тех программных модулей, выполнение которых они могут прерывать, и всех других. С этой целью для подпрограмм обработки прерываний выделяют отдельные ячейки памяти или регистры либо в начале их работы "прячут" коды, находящиеся в нужных им регистрах, а после окончания работы восстанавливают исходное содержимое этих регистров.

Дальше мы советуем не пожалеть время на так называемую спецификацию памяти, т.е. на поиск наиболее рациональной схемы использования областей (блоков) памяти данных, ее наиболее быстро доступных регистров и ячеек с разными правилами доступа с учетом нужд подпрограмм обработки прерываний. Ведь от этого будет зависеть время выполнения, надежность, длина создаваемой программы.

При написании текстов программных модулей обязательно надо сопровождать их достаточным количеством комментариев-объяснений, чтобы через полгода – год, когда Вы уже забудете детали этой программы, Вы сами или тот, кто продолжит работу, смогли по имеющимся комментариям быстро понять всю логику программы. Не следует экономить время, отказываясь от комментариев, поскольку может произойти так, что через полгода и Вам самим, и другому программисту легче будет написать новый текст программы, чем разобраться в Вашем, к которому нет никаких объяснений. Призрачная "экономия" превратится в свою противоположность – в дополнительные затраты времени.

После написания текстов всех программных модулей стоит для каждого из них составить полные списки адресов памяти, которые в них используются, с указанием назначения. Дальше эти списки надо внимательно сопоставить и проанализировать с целью недопущения конфликтов между программными модулями, которые используют тот

самый регистр или одну и ту же ячейку и поэтому потенциально могут помешать друг другу, изменяя код в этой ячейке. В случае необходимости оптимизируют распределение памяти данных и корректируют тексты соответствующих программных модулей.

27.3.4. Отладка программ

Дальше следует использовать одну из так называемых "кросс-систем" автоматизированной подготовки программ, которые ныне легко доступны. В состав такой системы обычно входят:

- редактор текстов программ, который автоматически обнаруживает синтаксические и другие ошибки в тексте и позволяет их исправить;
- программы-трансляторы, которые автоматизируют процесс создания объектных модулей, т.е. процесс перевода (трансляции) программных текстов на алгоритмическом языке в объектные коды, – понятные микрокомпьютеру двоичные слова-команды;
- программы-эмуляторы, которые полностью имитируют работу микрокомпьютера и, таким образом, позволяют имитировать функционирование программных модулей в нем; лучшие эмуляторы могут имитировать также работу соединенных с микрокомпьютером источников информации и исполнительных узлов в приближенном к реальности масштабе времени;
- программы отладки программных модулей, которые позволяют проверять выполнение отдельных команд или указанных последовательностей команд, подсчитывать число использованных на это машинных тактов, имитировать прерывания или поступление некорректных данных, разветвления по условию и т.п.

Отладку программы работы сенсора осуществляют в несколько этапов:

- автономная отладка каждого отдельного программного модуля в статическом режиме, т.е. без учета временного хода последовательности команд;
- определение времени работы критических программных модулей (в первую очередь, модулей обработки прерываний) при самых сложных условиях и, если необходимо, коррекция

программ, чтобы обеспечить требования относительно времени их работы;

- комплексная отладка всей программы в статическом режиме;
- комплексная отладка всей программы в динамическом режиме, т.е. с учетом фактора времени.

На этапе отладки очень пригодятся контрольные примеры, подобранные при алгоритмизации программных модулей. И с учетом результатов отладки их надо скорректировать и подобрать новые, чтобы получить "заготовку" для будущих контрольных испытаний программы.

Окончательную отладку и доработку программы делают уже по результатам предварительных испытаний действующего образца интеллектуального сенсора.

Краткие итоги

Сигналы на выходах чувствительных элементов часто не только слабы, но и зашумлены. Поэтому возникает необходимость не только усилить их, но и выделять из них полезную часть, "отфильтровывать" шумы, помехи, посторонние влияния. Для правильного выбора способов селекции надо знать, какая именно информация от объекта является полезной для данного конкретного применения, и от каких именно шумов, помех, посторонних влияний в данном конкретном случае надо избавляться. С учетом обстоятельств в интеллектуальных сенсорах применяют такие способы селекции полезных сигналов, как выделение дифференциальных сигналов, сопоставительный анализ сигналов из разных каналов многоканального сенсора, дифференцирование и интегрирование сигнала. Широко применяют частотную, временную и синхронную селекцию. Рассмотрение сенсора как системы связи позволяет использовать многие эффективные методы селекции полезных сигналов, разработанные в технике связи.

Процесс создания и внедрения интеллектуальных сенсоров растягивается иногда на десятки лет. Первой и наиболее критичной стадией этого процесса является стадия научно-исследовательской разработки. На этой стадии формируют концепцию построения и функционирования сенсора, разрабатывают, изготавливают и испытывают его действующий макет, а затем и усовершенствованный

экспериментальный образец. По результатам исследований и испытаний принимают решение о целесообразности затрат на внедрение данного сенсора в жизнь. При формировании концепции сенсора особое внимание надо уделять выяснению принципиальных трудностей, которые могут возникнуть при реализации проекта, и реальных путей преодоления этих трудностей. Тестовые объекты, на которых испытываются макет и экспериментальный образец сенсора, должны быть максимально приближены к реальным.

Исследовательский макет и экспериментальный образец следует проектировать так, чтобы в них можно было относительно легко вносить изменения, добавлять новые узлы, блоки, изменить режимы работы, расширить динамический диапазон измерений. Испытания должны выполняться как можно объективнее, без всяких поблажек и попыток необоснованно отбросить неприятные для разработчика результаты, как якобы ошибочные или "случайные". Ни в коем случае нельзя выдавать желаемое за действительное. Надо помнить, что выявление недостатков сенсора на этапе официальных сертификационных испытаний оказывается намного более болезненным, чем в случае их своевременного выявления на этапе предварительных испытаний.

Значительная часть "интеллектуальности" сенсора определяется его программным обеспечением. Для его создания на основе хорошо продуманного, согласованного со специалистами сценария работы сенсора составляются блок-схемы программы методом постепенной декомпозиции: сначала наиболее общая ("системная") блок-схема, определяющая крупнейшие программные блоки. Далее крупные программные блоки детализируют, создавая блок-схемы уже для каждого из них. Детализацию продолжают до тех пор, пока не станет возможным для каждого из программных модулей начертить детальный алгоритм его работы или свести его к какой-то стандартной подпрограмме. К написанию текстов подпрограмм, программных процедур и модулей стоит приступать лишь после того, как их алгоритмические схемы стали совсем четкими и прозрачными. Тексты программных модулей надо сопровождать достаточным количеством комментариев. С целью недопущения конфликтов между программными модулями, использующими одни и те же ячейки памяти, надо внимательно проанализировать, не могут ли они потенциально помешать друг другу, и предотвратить такие конфликты. Отладку программы производят поэтапно: сначала отдельно каждого модуля, затем комплексную отладку всей программы в статическом, а потом в динамическом режиме. При

отладке очень пригодятся контрольные примеры, подобранные еще при алгоритмизации программных модулей.

28. Перспективы развития интеллектуальных сенсоров.

28.1. Перспективы развития интеллектуальных сенсоров

Техника интеллектуальных сенсоров ("сенсорика") развивается как в направлениях совершенствования существующих, создания новых видов, типов и новых классов интеллектуальных сенсоров, так и в направлениях создания сенсорных систем и сенсорных сетей. Рассмотрим вкратце каждое из этих направлений.

28.1.1. Перспективы создания новых видов интеллектуальных сенсоров

В настоящее время уже просматриваются перспективы создания на основе интеллектуальных сенсоров новых искусственных органов чувств человека. Они не только смогут заменить некоторые естественные органы чувств, которые по каким-то причинам у человека не функционируют, но и предоставят людям возможность непосредственно ощущать то, что природой не было предусмотрено. Сигнальный выход таких интеллектуальных сенсоров будет или непосредственно связан с нервными окончаниями или, например, с тактильными сенсорами человека. Благодаря "вживлению", скажем, миниатюрного интеллектуального сенсора радиации, человек получит возможность непосредственно ощущать ионизирующую радиацию, начиная даже от незначительных доз. Одетый на пальцы искусственный "орган ощущения радиации" поможет легко найти источник радиации. После "вживления" миниатюрного газового сенсора обладатель этого дополнительного "органа обоняния" будет ощущать присутствие химических соединений, которые для обычного человека не имеют запаха. Например, на ряде опасных химических производств персоналу чрезвычайно важно иметь сенсоры, непосредственно сигнализирующие ему об опасных химических агентах: угарном газе, фосфорорганических пестицидах, ядах. Человек, которому это требуется по роду профессии, сможет слышать

инфразвуки или ультразвуки определенных диапазонов, например, ультразвуки, издаваемые дельфинами, и т.д.

Благодаря развитию сенсорики люди смогут в необходимых случаях обрести "внутреннее зрение". Дело в том, что на уровне сознания мы почти не ощущаем свои внутренние биохимические процессы. Имеющаяся у нас сигнальная система информирует нас о возникших нарушениях метаболизма только посредством болевых ощущений. Ощущения эти возникают, к сожалению, только после значительных и уже необратимых изменений. Вживленные в организм сенсоры смогут успешно определять содержание важных биохимических соединений (глюкозы, мочевины, холестерина и т.д.) и позволят нуждающемуся в этом человеку проводить мониторинг своего внутреннего метаболического состояния на уровне сознательного индивидуального постоянного контроля. Гипертоники, не ощущающие повышение своего давления, смогут явственно воспринимать его изменения. Людям, страдающим неизлечимым алкоголизмом, могут быть "вживлены" сенсоры, дающие болевые ощущения или тошноту от одного запаха спиртного, не говоря уже о его проникновении в организм.

Применение новейших микросистемных и нанотехнологий может со временем сделать возможным создание интеллектуальных медицинских "микророботов". Имея микронные размеры, они после введения в организм человека смогут двигаться там по слизистым оболочкам, кровеносным или лимфатическим сосудам, выполняя филигранные медицинские функции. Это станет началом будущей "наномедицины" – новых методов исследования, лечения и контроля биологических систем человека на микроуровне. Прогнозируется, например, создание:

- искусственных фагоцитов, которые смогут быстро обнаруживать в крови человека болезнетворные частицы или токсины и будут обезвреживать их;
- "респираторов", которые, подобно естественным эритроцитам, в легких будут аккумулировать значительные запасы кислорода и адресно доставлять его с потоком крови к органам и клеткам, особенно в этом нуждающимся;
- глюкороботов, которые будут контролировать уровень глюкозы в крови и, в случае необходимости, выделять нужные дозы имеющегося у них в запасе инсулина;

- транспортных микророботов, которые будут доставлять требуемые дозы лекарства в заданное врачом время к определенным больным участкам и клеткам тела, и т.д.

Постепенная реализация этой программы уже началась. Например, американское ведомство по контролю за продуктами питания и лекарствами уже выдало разрешение на применение в медицинской практике *миниатюрной видеокамеры*, заключённой в пилюле длиной 25 мм (рис. 28.1).



Рис. 28.1. Исследовательская пилюля со встроенной видеокамерой

Пациент глотает пилюлю, после чего она начинает своё естественное продвижение по пищеварительному тракту. А камера ведёт цветную съёмку крупным планом состояния слизистой оболочки. Пациент занимается своими обычными делами, а изображения слизистой оболочки его желудка и кишечника через миниатюрный радиопередатчик дважды в секунду поступают на маленький приёмник на поясе или в сумке. Клинические испытания показали, что для диагностики воспалений, язв, эрозий, полипов и прочих аномалий слизистой желудка и кишечника, пилюля вдвое эффективнее, чем традиционная эндоскопия. Кроме того, обычный эндоскоп не имеет возможности обследовать тонкий кишечник, имеющий в длину около 7 м. А пилюля позволяет! По завершении обследования, которое длится от 8 до 72 часов, приёмник сдаётся врачу, и тот переписывает из него накопленную информацию в свой компьютер. Видеокамера извлекается из вышедшей со стулом пилюли, помещается в новую оболочку и снова готова к применению.

Дальнейшим развитием стала *контролируемая по радио капсула*, которая имеет шесть ножек с крошечными крючочками на окончании.

Они предотвращают скольжение по слизистой оболочке во время движения, но они слишком маленькие, чтобы повредить мягкие ткани. Этих "зацепов" вполне достаточно, чтобы все устройство не проталкивалось дальше под действием мускульных пульсаций. Благодаря этому, врач может остановить капсулу для более детального изучения интересующего его участка.

Европейскими учеными уже разработан действующий макет пилюли-робота, который помогает, путешествуя по желудочно-кишечному тракту, выискивать места, подозрительные на рак (рис. 28.2). Продвигаясь по желудочно-кишечному тракту, "пилюля" передает цветное изображение внутренних слизистых оболочек на монитор врача. Замечая место, подозрительное на рак, врач посылает радиосигнал "пилюле", которая останавливается и производит анализ отраженного от этого места света.

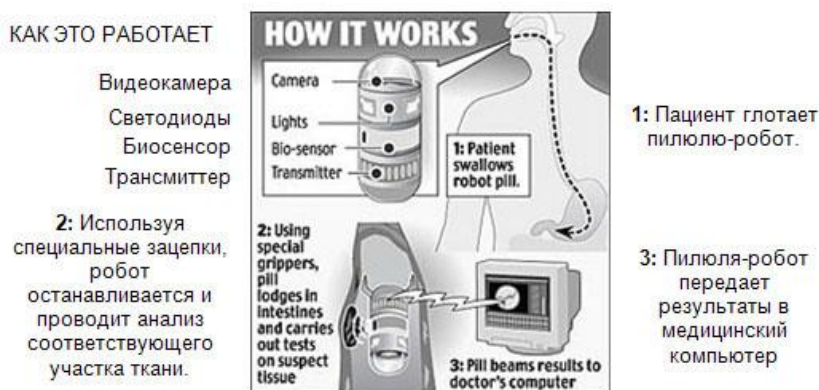


Рис. 28.2. Схема действий пилюли-робота для диагностики рака кишечника

Известно, что в местах роста раковых клеток формируется более густая сеть кровеносных сосудов и в силу этого увеличиваются локальное кровенаполнение и локальная концентрация гемоглобина в ткани. Такие изменения и можно увидеть в отраженном свете соответствующей длины волны.

Уэл Бэдоуи (Wael Badawy) из университета Калгари (University of Calgary) уже изготовил "интеллектуальную пилюлю" (Intelligent Pill,

сокращённо — iPill), в составе которой имеются датчики, контролирующие температуру и кислотно-щелочной баланс среды, в которой они находятся, микроконтроллер, микронасос, а также лекарство в объёме 1 мл. Пиллюля программируется так, чтобы выпускать лекарства через заданные интервалы времени или при заданных обстоятельствах. Для этого микроконтроллер активирует микронасос, выталкивающий требуемую дозу лекарства. Запасенной энергии пиллюле пока хватает примерно на четыре часа.

У микрохирургов, выполняющих операции на головном мозге, в глазах, в ушной раковине, на микрососудах или на нервных узлах, – везде, где важна исключительная точность и безопасность, – уже вскоре появятся т.н. "*цифровые скальпели*" (data knives). На их лезвии будут находиться миниатюрные сенсоры давления и микросенсоры, сигнализирующие хирургу о том, что вблизи лезвия находится кровеносный сосуд или ответственный нервный узел.

28.1.2. Интеллектуальные здания

Развитие в направлении создания сенсорных систем тоже происходит уже сегодня. Известным примером этого стали т.н. "интеллектуальные здания" (англ. intelligent building, рис. 28.3) .



Рис. 28.3. Интеллектуальное здание. Показана лишь часть его основных систем

Имеется много разных определений, что такое "интеллектуальное здание". С точки зрения сенсорики – это здание, снабженное продуманной, достаточно полной системой сенсоров, позволяющей всесторонне контролировать функциональное состояние здания и на этой основе разумно управлять функционированием всех его важнейших систем жизнеобеспечения. В первую очередь, речь идет о сенсорах, контролирующих системы электроснабжения, газо- и водоснабжения, отопления, пожарной безопасности, освещения, микроклимата, санкционированного доступа в здание и в его отдельные части и т.п. Интеллектуальные сенсоры могут при этом осуществлять учет расходов ресурсов каждым отдельным помещением и разумное управление локальными подсистемами. Они могут, например, автоматически отключить подачу электроэнергии в контролируемое помещение в случае короткого замыкания или превышения порога потребляемой мощности; немедленно перекрыть газовую магистраль, если в помещении обнаружилась утечка газа; перекрыть вентиль подачи воды в случае обнаружения протечки воды; включить подачу тепла, если температура в помещении упала ниже

предписанного нижнего порога, или уменьшить подачу тепла, если температура превысила верхний порог; автоматически выключить освещение, если появился достаточно яркий дневной свет либо никого не осталось в помещении, или включить свет, как только там появился человек и освещенность недостаточна, и т.д. Разумное согласованное управление всей системой и интегральное управление функционированием всего здания осуществляет центральный компьютер.

Опыт показывает, что потребление энергоресурсов и затраты на них благодаря этому сокращаются на 20-30%. Грамотно спроектированное "интеллектуальное" здание в случаях аварийного отключения внешней энергосети или подачи воды по сигналам от соответствующих сенсоров автоматически задействует резервный электрогенератор, запасную схему водоснабжения, аварийное освещение и т.д. и предупредит пользователей здания об аварийной ситуации. Это практически сводит на нет возможность выхода из строя высокотехнологического оборудования, что также ведет к экономии средств. Такое оборудование может работать бесперебойно в течение многих лет. В "интеллектуальном" здании снижено влияние человеческого фактора. Это помогает избежать ошибок при эксплуатации, аварий, а также снизить затраты на содержание персонала.

Интеллектуальные здания уже широко используются крупными корпорациями, государственными и межгосударственными учреждениями, бизнес-центрами, высококлассными гостиницами и т.д.

Системы интеллектуальных сенсоров "приходят" и в наши жилища. Их назначение – не только оптимизировать энерго- и ресурсопотребление, обезопасить нашу жизнь, но и облегчить её, создать нам всё больше удобств и комфорта. Встроенные в кровать сенсоры проследят за положением нашего позвоночника, головы, ног во время сна, обеспечат возможность автоматической коррекции деформаций матраса, подушки, одеяла с целью обеспечения отропедически правильного положения. Сенсоры, встроенные в детскую кроватку, будут чутко и неусыпно "прислушиваться" к дыханию ребенка, улавливать его беспокойство и малейшие изменения температуры его тела, подавать родителям сигнал о необходимости его обслуживания. Сенсоры, встроенные в "интеллектуальное" кресло, помогут поддерживать его удобство при любых положениях нашего тела.

Интеллектуальные сенсоры, контролирующие состав атмосферы в Вашем жилище, позаботятся о своевременном его проветривании, оповестят Вас о появлении в воздухе опасных веществ. Видеодомофон (рис. 28.4) позволит не только услышать, но и увидеть того, кто стоит на входе в Ваше жилище. Интеллектуальные сенсоры, установленные на улице, дадут Вам возможность видеть то, что делается в окрестностях Вашего дома, выдадут информацию для автоматической ориентации солнечных батарей точно в направлении солнца или ветроэлектрогенератора – в направлении ветра. Другие интеллектуальные сенсоры позволят, в зависимости от погоды и от Ваших указаний, автоматически управлять ставнями, жалюзи, поливом зеленых насаждений вокруг дома. Интеллектуальные сенсоры в аквариуме с Вашими любимыми рыбками даже в Ваше отсутствие обеспечат возможность автоматической подачи им в установленное время указанного количества корма, кислорода, включения/выключения освещения, пополнения чистой водой.



Рис. 28.4. Видеодомофон. Слева – камера на входе в жилище, справа – терминал с экраном в доме

Оборудованное такими системами сенсоров жилище принято называть "умным домом" (англ. Smart Home, рис. 28.5).

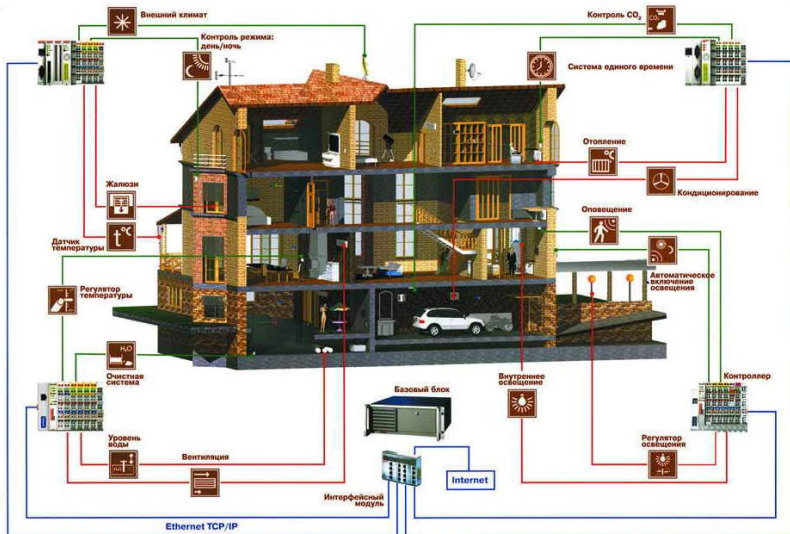


Рис. 28.5. "Умный дом". Показана лишь часть его основных систем

Управлять "умным" домом можно при помощи сенсорной панели. Используя высвечиваемые на ней меню, Вы легкими касаниями к соответствующим "клавишам" сможете сами создавать сценарий вашего уюта и комфорта.

28.1.3. Интеллектуальный транспорт

Разумно подобранные системы интеллектуальных сенсоров позволят повысить эффективность функционирования и комфортность не только жилищ людей, но всех других сложных устройств: установок, оборудования, производственных, медицинских, оздоровительных, развлекательных и спортивных комплексов и т.д. Системы интеллектуальных сенсоров являются основой для создания умных роботов по уходу за детьми, инвалидами, домашними животными и растениями, для выполнения функций личного секретаря, повара, уборщика и т.п.

В качестве примера остановимся кратко на системе сенсоров, необходимых для реализации т.н. "интеллектуального транспорта". Речь идет не только об "интеллектуальных транспортных средствах"

", но и об " **интеллектуальных дорогах** ", " *интеллектуальных транспортных системах* " в больших городах и регионах, " *интеллектуальных системах доставки грузов* ".

Ещё в 1997 г. прессе был представлен экспериментальный автомобиль "CyCab", разработанный совместно компаниями EDF, RATP и Andruet S.A. (США). Благодаря компьютерной системе управления, он может управляться не только водителем с помощью джойстика, но и работать полностью автоматически в различных режимах (рис. 28.6).

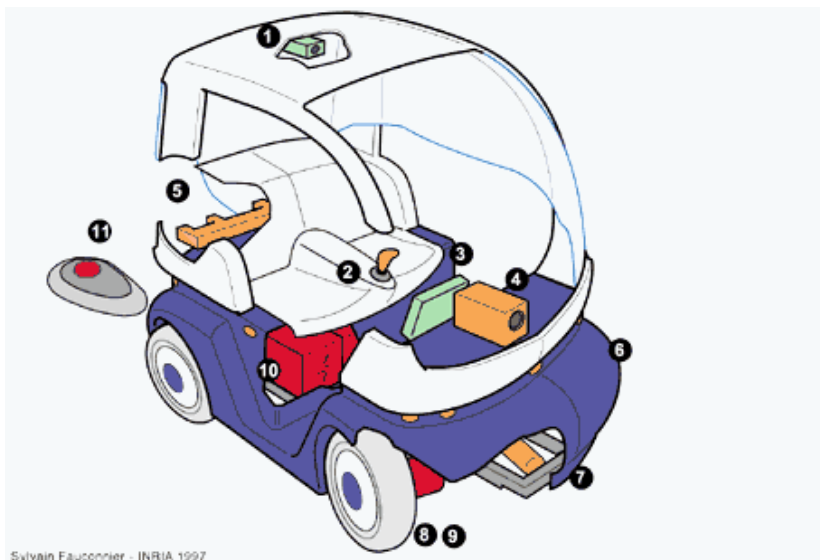


Рис. 28.6. Интеллектуальный электромобиль "CyCab": 1 – видеочкамера; 2 – ручка управления; 3 – сенсорный экран; 4 – интеллектуальный сенсор дистанции; 5 – сенсоры ИК связи; 6 – УЗ сенсоры для избегания столкновений; 7 – привод управления; 8 – по одному электромотору на каждое колесо; 9 – по одному электрическому тормозу на каждое колесо; 10 – 4 аккумуляторных батареи и система электропитания

"CyCab" – это двухместный электромобиль массой 300 кг и размерами в плане 1,9х1,2 м, имеющий по одному электромотору мощностью 1 кВт на каждое колесо, развивающий скорость до 30 км/час и обеспечивающий дальность пробега 40 км без подзарядки.

Кроме сенсоров, указанных на рис. 28.6, в состав системы сенсоров входят датчики тока через каждый электромотор, крутящих моментов, моментов сил сопротивления, действующих на каждое колесо, скорости вращения. Могут использоваться также приемник сообщений о ситуациях на дорогах, сенсор координат GPS, навигатор, сенсоры давления в шинах и др.

В электромобиле реализованы две технологии управления: ручного и автоматического. В ручном режиме пассажир ведет автомобиль с помощью ручки управления 2 (джойстика) и сенсорного экрана. Джойстик соединен с компьютером, который непосредственно управляет движением, обеспечивая его безопасность. Например, он автоматически ограничивает скорость на поворотах и в других опасных местах. Для управления не требуется специальных навыков, электромобилем может пользоваться каждый. Через сенсорный экран можно узнать свое местоположение, скорость движения, пройденную дистанцию, еще возможную дальность пробега; можно установить автоматический режим работы электромобиля, связаться со службой поддержки и т.д. Также можно реализовать и другие режимы автономного движения (например, радиоуправление или движение по указателям). Этот электромобиль был разработан с учетом всех требований, которым должен удовлетворять общественный транспорт массового пользования: экономичность, небольшие размеры, надежность, простота управления и обслуживания.

Уже доказана возможность создания на основе этого автомобиля в ряде городов эффективной транспортной системы с целью уменьшить количество личных автомобилей. Множество таких электромобилей, своего рода такси без шофера, доступно всем пользователям с помощью электронной кредитной карты. Такое "такси" можно "взять" на стоянке или вызвать через Интернет. Тогда оно само подъедет к указанному клиентом месту. Когда клиент освобождает "такси", электромобиль сам отъезжает к ближайшему месту парковки и подзаряжает аккумуляторы. Такой вид транспорта удобен для пользования, создает мало шума, не загрязняет атмосферу, занимает мало места и экономичен.

В настоящее время ведутся разработки и других "*интеллектуальных транспортных средств*" – разнообразных автоматических систем управления автодорожными, воздушными, морскими, речными, рельсовыми транспортными средствами. Поставлена цель, чтобы они

даже при воздействии случайных факторов (нештатные ситуации, отказы или сбои компонент) были способны функционировать столь же "разумно", как и опытный человек-оператор, и даже надежней. Возможность этого обеспечивается соответствующими системами интеллектуальных сенсоров.

Под "*интеллектуальной дорогой*" подразумевают транспортный путь (автодорогу, железнодорожный или трамвайный путь, улицу города, судоплавную реку, ...), оборудованный системой интеллектуальных сенсоров, которая позволяет собирать достаточно полную информацию о состоянии пути и его загруженности транспортом, информировать об этом водителей и службы пути и на этой основе оптимизировать движение, повышать его безопасность.

Наиболее известными интеллектуальными сенсорами этой системы являются *автоматические видеокамеры с регистрацией и определением скорости движения*. Как только такой интеллектуальный сенсор фиксирует превышение скорости, он передает соответствующую видеозапись в центральную диспетчерскую, и нарушителю высылается квитанция на оплату штрафа. Если нарушение совершено повторно, то принимаются и более строгие предусмотренные законом меры. Практика показала, что на оборудованных такими сенсорами дорогах число "лихачей" и фактов превышения скорости сокращается на порядок.

На основе видеокамеры созданы также интеллектуальные сенсоры, *автоматически распознающие номера автомобилей*, находящихся в поле зрения камеры. Такой сенсор фиксирует и сохраняет распознанный номер и время регистрации в базе данных вместе с изображением транспортного средства и кадром с номерным знаком. Формируется база всех транспортных средств, прошедших через зону контроля, с возможностью добавления текстового комментария к каждому распознанному номеру. Такой сенсор может также сравнивать номера автомобилей с перечнем номеров автомобилей, находящихся в розыске. В случае совпадения немедленно включается его видеосъемка и отсылается сообщения в соответствующие органы. Подобные сенсоры уже установлены, например, на въездах в центр Лондона. По зафиксированным сенсором номерам частных автомобилей в базе данных отыскивается адрес владельца. И ему автоматически высылается счет на оплату за въезд в центральную часть города.

Следующим является интеллектуальный *сенсор для контроля характеристик транспортных потоков*. Он подсчитывает число проезжающих автомобилей, измеряет их среднюю скорость, рассчитывает интенсивность движения на заданном участке. Может определять типы транспортных средств, составлять статистические данные за определенный период времени (час, сутки), автоматически фиксировать факты ДТП, автомобильных пробок, замедлений движения и т.д.

" *Интеллектуальные транспортные системы* " – это системы автоматического регулирования транспортного движения, которые используют данные системы описанных выше сенсоров транспортных потоков. Собирая информацию от многих таких сенсоров, они соответствующим образом оптимизируют работу светофоров, сообщают по радио рекомендации водителям о целесообразных в данный период времени маршрутах проезда, направляют регулировщиков в наиболее напряженные участки. На наиболее напряженных перекрестках устанавливают web-видеокамеры, которые непрерывно транслируют информацию о транспортной обстановке в Интернет. Водители получают возможность лично увидеть обстановку на соответствующем перекрестке и своевременно оптимизировать маршрут своего движения.

Накапливаемая в интеллектуальных транспортных системах статистика помогает объективно определить, куда в первую очередь надо вкладывать средства, выделяемые на совершенствование инфраструктуры дорог.

28.1.4. Сенсорные сети

Наличие микрокомпьютера в составе интеллектуальных сенсоров и создание миниатюрных узлов беспроводного радиointерфейса типа Bluetooth, описанных в "Радиосенсоры и радиолокаторы" , предоставляет возможность организации сложных беспроводных сенсорных сетей. Стремительное уменьшение размеров современных сенсоров вместе с их удешевлением и снижением энергопотребления приближает время прихода эпохи сенсорных сетей. Миниатюрные интеллектуальные сенсоры с возможностями такой связи (см. рис. 28.7) можно разместить на контролируемой территории, и они сами налаживают между собой связь, сформируют беспроводную сеть и станут передавать данные на заранее указанные пункты сбора информации.

Объединенные в сеть сенсоры могут отслеживать параметры окружающей среды: влажность, давление, движение, освещенность, состав атмосферы (воды), температуру и т.д.

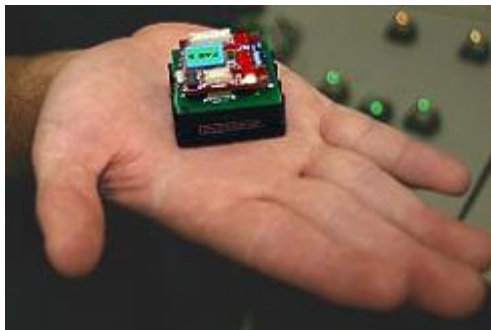


Рис. 28.7. Один из современных элементов сенсорной сети, разработанный компанией Intel

Мониторинг может осуществляться на очень большой территории, потому что сенсоры передают информацию "по цепочке" – от соседа к соседу. Технология позволяет им годами (даже десятилетиями) работать без смены батарей. Даже если какой-то сенсор выходит из строя, в сети тут же находятся другие пути передачи информации.

Тысячи дешевых сенсоров в поле, настроенные на контроль состава и увлажнения почвы, в зависимости от меняющихся условий будут автоматически регулировать искусственное орошение и внесение удобрений. Тысячи маленьких автономных сенсоров, разбросанных по всей территории биосферного заповедника, будут автоматически собирать и передавать информацию о всех важных событиях и изменениях, которые происходят на его границах и на всей территории. Они позволят значительно надежнее беречь, охранять уникальную флору и фауну. Тысячи сенсоров, разбросанных в верховьях рек, позволят своевременно узнавать об угрозе наводнений. Миллионы интеллектуальных сенсоров, свободно плавающих в океане, обеспечат мониторинг за процессами, происходящими на его огромных акваториях. Позволят своевременно обнаруживать зарождение штормов и цунами, изменения течений, подводные землетрясения, извержения подводных вулканов.

Некоторые футурологи считают, что сенсорные сети – именно тот элемент, который позволит Интернету выйти на следующий, качественно новый, этап своего развития. Ведь сенсорные сети могут быть подключены к Интернету, а каждый из миллиардов сенсоров может получить IP-адрес. Сотни миллиардов сенсоров, встроенных буквально во все предметы, от деревьев в парке до детских кроваток, смогут реагировать на окружающую среду и контактировать друг с другом беспроводным образом, решая много полезных задач. Это и неусыпный контроль за состоянием окружающей среды, наблюдение и уход за детьми, престарелыми, больными людьми, за животными, биологический и медицинский мониторинг, прогноз погоды, контроль вулканической и сейсмической активности. Это и сквозной мониторинг транспортных магистралей, нефте- и газопроводов, трасс электро- и теплоснабжения, решение антитеррористических задач и т.д.

28.2. Заключительные замечания

Как мы уже отмечали, интеллектуальные сенсоры соединяют реальный материальный мир, в котором живут и действуют люди, функционируют автоматизированное оборудование и роботы, с внутренним, ментальным "миром" людей, автоматов, роботов. Для выживания и успешного функционирования разумных систем в далеком не всегда благоприятном и предсказуемом реальном мире интеллектуальные сенсоры должны быть надежным связующим звеном, в котором рождается адекватная, высококачественная информация.

Производство и выпуск интеллектуальных сенсоров – это новая перспективная, растущая отрасль промышленности, которая активизирует развитие всех других сфер человеческой деятельности, которая уже приносит и в скором времени принесет еще большую пользу людям. Поэтому мы уверены, что полученные Вами в данном курсе лекций знания окажутся не только интересными, но и полезными.

Насколько могли, насколько позволил объем книги, мы описали основные виды и этапы разработки интеллектуальных сенсоров, особенности их структуры, программирования, их типовые узлы, сделали ударение на важности учета специфики и нюансов той конкретной прикладной области, в которой будет применяться сенсор.

Мы старались продемонстрировать также богатейшую палитру разнообразных хитроумных способов, с помощью которых можно достичь решения сложных задач в сенсорике.

Разработка интеллектуальных сенсоров включает в себя (1) хорошо обоснованный замысел; (2) кропотливую коллективную работу над использованием при построении сенсора современных высоких технологий и глубоких знаний в соответствующих областях науки и техники; (3) внимательную проработку всех деталей, всех режимов функционирования сенсора и технологии его применения; (4) тщательный анализ возможных помех, неисправностей и наилучших способов их устранения; (5) создание хорошо продуманных программ работы; (6) тщательное тестирование.

В одной книге трудно охватить все виды интеллектуальных сенсоров. Вне нашего рассмотрения остался ряд видов оптических сенсоров (интерферометрические, поляризационные и т.д.), рентгеновские, квантовые и некоторые другие сенсоры. Но мы, собственно, и не ставили задачу охватить абсолютно все виды интеллектуальных сенсоров. Главной нашей задачей было продемонстрировать, что интеллектуальные сенсоры уже уверенно вошли в нашу жизнь, раскрыть общие принципы их построения, подходы к разработке и проектированию. Чем дальше, тем большую роль будут играть эти сенсоры в нашей жизни. На их основе постепенно будет создаваться не просто благоприятная, но уже и интеллектуальная среда для жизни людей.

Наше рассмотрение подтвердило также условность и относительность всех подходов к классификации сенсоров, в том числе и принятого нами – информационного. Химики, например, любят выделять в отдельный класс *химические* сенсоры. К этому классу они относят все сенсоры, предназначенные для исследования химического состава вещества, выявление наличия и определение концентраций важных химических соединений и химических элементов, для наблюдения за ходом химических реакций и измерения их констант. Такие же веские основания имеют и биологи, выделяя в отдельный класс *биологические* сенсоры, важной составной частью которых являются селективно чувствительные элементы биологического происхождения: ферменты, специфические белки, антитела, живые клетки или даже их комплексы – биорецепторы. Именно эти чувствительные элементы придают биологическим сенсорам беспрецедентную избирательность, точную

нацеленность на объект наблюдения. Физическая природа первичных информационных сигналов под таким углом зрения становится второстепенной. Все другие составляющие сенсора рассматриваются лишь как "трансдюсер" – преобразователь сигналов биологического селективно чувствительного элемента в любую другую, удобную для восприятия форму.

Но в этой книге мы старались показать, что каждое звено, каждая деталь в интеллектуальных сенсорах является одинаково важной, поскольку, как и в обычной механической цепи, свойства сенсора как целого определяет его самая слабая деталь! И для жизни, для использования сенсора важен не его классификационный признак, а весь комплекс свойств сенсора в их единстве.

Чем дальше, тем чаще интеллектуальные сенсоры становятся комбинированными и многофункциональными. В них для выполнения поставленных задач используются вместе, в комплексе, первичные сигналы разной физической природы. Многие из комбинированных сенсоров мы, собственно, уже рассматривали в данном цикле лекций. Это, например, интеллектуальные магнитокардиографы ("Магнитные сенсоры. Сенсоры на сквидах. Индуктивные сенсоры"), в которых кроме первичных магнитных сигналов используются и первичные электрические сигналы (ЭКГ), и первичные механические сигналы перемещения чувствительных интерферометров с целью формирования пространственной динамической картины работы сердца. Это также мобильные телефоны ("Радиотелевизионные сенсоры"), которые для выполнения своих функций должны воспринимать не только информационные радиосигналы, но и акустические сигналы голоса пользователя для кодирования и передачи его речи, механические сигналы кнопок управления, электрические сигналы от датчика напряжения на его батарее. Некоторые из них имеют и встроенный цифровой фотоаппарат, который воспринимает оптические сигналы, и встроенный трехосный акселерометр и т.п. Классификация такого рода сенсоров является еще более условной и субъективной. Она нужна в основном лишь для учебных целей, для облегчения усвоения соответствующих знаний и для организации подачи материалов об интеллектуальных сенсорах.

Краткие итоги

Техника интеллектуальных сенсоров развивается в направлениях совершенствования существующих и создания новых видов интеллектуальных сенсоров, в направлениях создания сенсорных систем и сенсорных сетей. На основе интеллектуальных сенсоров прогнозируется создание искусственных органов чувств человека. Они не только смогут заменить некоторые естественные органы чувств, которые у человека не функционируют, но и смогут предоставить человеку возможность непосредственно ощущать то, что природой не было предусмотрено: радиацию, инфразвуки или ультразвуки, некоторые вещества "без вкуса и без запаха", состав своей внутренней среды ("внутреннее зрение") и т.д.

Применение новейших микросистемных и нанотехнологий может привести к созданию интеллектуальных медицинских "микророботов". Имея микронные размеры, они будут вводиться в организм человека, двигаться там, реализуя новые методы контроля, исследования и лечения биологических систем человека.

Системы интеллектуальных сенсоров позволяют создавать умные роботы для ухода за детьми, инвалидами, домашними животными и растениями, для выполнения функций личного секретаря, повара, уборщика и т.п. Разумно подобранные сенсорные системы позволяют автоматизировать и повысить эффективность функционирования производственного и исследовательского оборудования, охранных систем, комфортность жилищ людей, медицинских, оздоровительных, развлекательных и спортивных комплексов.

Уже сейчас осознана перспективность т.н. "интеллектуальных зданий", "умного дома", "интеллектуального транспорта". С точки зрения сенсорики – это здания, дом, транспорт, снабженные продуманной, достаточно полной и надежной системой интеллектуальных сенсоров, позволяющей всесторонне контролировать функциональное состояние сложного объекта и на этой основе разумно управлять функционированием всех его важнейших систем жизнеобеспечения. Это позволяет значительно снизить потребление энергоресурсов и затраты на функционирование, увеличить пропускную способность и надёжность транспортных магистралей, повысить комфортность жилищ, офисов, транспортных средств.

Наличие микрокомпьютера в составе интеллектуальных сенсоров и создание миниатюрных узлов беспроводного интерфейса предоставляют возможность организации сложных беспроводных сенсорных сетей. Стремительное уменьшение размеров сенсоров вместе с их удешевлением и снижением энергопотребления приближает время прихода эпохи сенсорных сетей. Интеллектуальные сенсоры можно будет тогда разместить на обширной контролируемой территории, и они сами наладят между собой связь, сформируют беспроводную сеть и станут передавать данные на заранее указанные пункты сбора информации. Объединенные в сеть сенсоры будут отслеживать состояние окружающей среды, предупреждать о зарождении штормов и цунами в океанах, об угрозе наводнений в долинах рек, о пробуждении вулканов, надежнее беречь уникальную флору и фауну в биосферных заповедниках и т.д.

Производство и выпуск интеллектуальных сенсоров – это новая перспективная, растущая отрасль промышленности, которая активизирует развитие всех других сфер человеческой деятельности, которая уже приносит и в скором времени принесет еще большую пользу людям.

29. Методы распознавания тактильных образов

Для распознавания объектов роботом используется система специальных тактильных датчиков. Среди достоинств метода тактильного распознавания следует отметить:

- отсутствие необходимости в освещении исследуемого объекта;
- слабое влияние окружающей среды на точность распознавания — алгоритм распознавания;
- сравнительно малый объем информации, поступающей от датчиков, что позволяет реализовать обработку информации простым вычислительным устройством за малый отрезок времени.

29.1. Бионический подход к проблеме разработки тактильного сенсора и тактильного распознавания пространственных образов

В статье Киносита описан бионический подход к проектированию искусственного тактильного сенсора. При создании математической

модели кожного покрова его трехслойная структура упрощенно трактуется как однослойная с постоянным коэффициентом упругости. При определении закона распределения силы упругости (напряжения) для плоскою бесконечного кожного покрова в цилиндрической системе координат (ρ, θ, z) приняты допущения:

- ось вращения объекта, соприкасающегося с кожным покровом и вызывающего это распределение напряжения в нем, совпадает с осью цилиндрической системы координат;
- изменение формы поверхностного слоя является симметричным относительно оси Z .

Если обозначить:

$\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_z$ — нормальные составляющие напряжения по соответствующим координатам ρ, θ, z ;

$\tau_{z\rho}, \tau_{\theta z}, \tau_{\rho\theta}$ — тангенциальные составляющие напряжения в плоскостях $z\rho, \theta z, \rho\theta$;

U_ρ, U_θ, U_z — составляющие смещения поверхности под действием приложенной внешней силы, то из уравнений равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{1}{\rho} (\sigma_\rho - \sigma_\theta) = 0;$$

$$\frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} = 0$$

и граничных условий:

$z=0, 0 \leq \rho \leq a, U_z = [U_z(\rho)]_{z=0}; \rho \geq a; \sigma_z = 0; 0 \leq \rho \leq \infty; \tau_{\rho z} = 0$ ($z = \infty$ значения напряжения, смещения $\rightarrow 0$), где a — расстояние от оси Z до точки, в которой объект отделяется от упругой поверхности, получается закон распределения составляющих напряжения, смещения по оси Z :

$$U_z = -a [2(1-\nu) I_0^0 + \xi I_0^1];$$

$$\sigma_z = 2G [I_0^1 + \xi I_0^2];$$

$$I_m^n = \int_0^\infty \rho^n f(\rho) e^{-\rho \xi} J_m(\rho \rho_0) d\rho;$$

$$f(\rho) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{2}n\right)}{\Gamma\left(\frac{3}{2} + \frac{1}{2}n\right)} A_n \left[\cos \rho + \rho \int_0^1 U^{n+1} \sin \rho U \cdot U d \right],$$

где A_n — коэффициент; G — коэффициент поперечной упругости; ν — коэффициент Пуассона; $\xi = z/a; \rho = a\rho_0$.

Наибольшие напряжения имеют место внутри соприкасающегося с объектом участка поверхности кожного покрова, причем максимальные значения напряжения приходятся на контур, расположенный с внутренней стороны от границы участка поверхности, соприкасающегося с объектом ($\rho = 0,9a$).

В работе Киносита приведена модель группы нервных окончаний в дерме (свободные окончания, диски Меркела, тельца Майснера) и в подкожной ткани (тельца Пачини); определена реакция этих нервных окончаний при соприкосновении объекта с поверхностью кожного покрова упрощенной структуры (рис. 1).

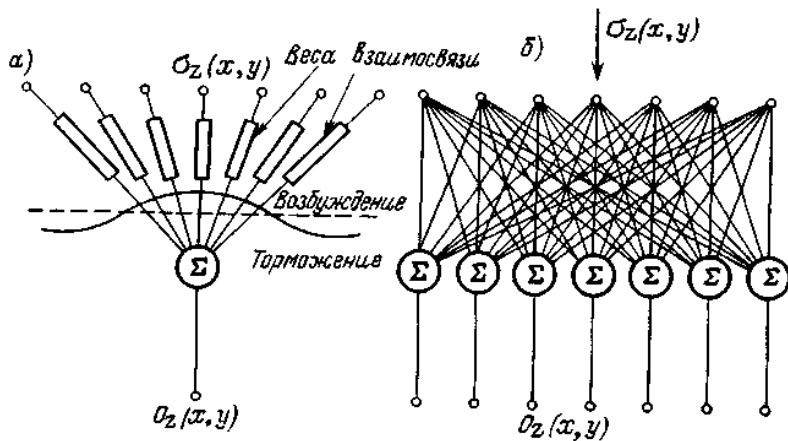


Рис. 1. Модель первичных окончаний в слое дермы

Сигналы, поступающие с концов ответвлений на элемент, суммируются. Взаимосвязь боковых ответвлений (рис. 1, а) пропорциональна расстоянию от центра до конца ответвления и характеризуется весовой функцией $\omega_z(x, y)$. Возбуждения $V_z(x, y)$, возникающие в боковых ответвлениях под действием напряжений в кожном покрове, пропорциональны нормальной составляющей напряжения по оси Z, действующей на ответвление: $V_z(x, y) = k_z \sigma_z(x, y)$, где k_z — коэффициент пропорциональности.

Весовая функция имеет распределение Гаусса и определяется следующим образом:

$$\omega_z(x, y) = \frac{\alpha_1}{2\pi\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{x^2 - y^2}{2\sigma_1^2}\right) - \frac{\alpha_2}{2\pi\sigma_2^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_2^2}\right),$$

где $\alpha_1, \alpha_2 > 0$; α_1 — коэффициент силы возбуждения на выходе; α_2 — коэффициент силы торможения на выходе, σ_1, σ_2 задают распределение возбуждающих и тормозящих ответвлений.

При моделировании область, лежащая у поверхности, принимается равной нулю, а выходной сигнал определяется выражением

$$\alpha_z(x, y) = \int_s \int_{\xi} \omega_z(\xi - x, \eta - y) V_z(\xi, \eta) d\xi d\eta,$$

здесь s — величина, которая характеризует распределение ответвлений и которая определяется из значений σ_1, σ_2 .

Хотя в подкожной ткани имеются различные нервные окончания (рис. 1, б), моделировались только реагирующие на давления тельца Пачини.

Механическое раздражение передается на сердцевину тельца Пачини, где возбуждает рецепторный потенциал. Между перепонками в слоистой структуре тельца имеется вязкая жидкость, которая влияет на динамику его работы. В модели Киносита учитываются только статические характеристики модели Лоуенштейна. Тельца Пачини в ней расположены в узлах решетчатой структуры.

К поверхности тельца Пачини прикладывается разность $A_n = \sigma_{z_1}(x, y) - \sigma_{z_1} + a_n(x, y)$ между напряжением $\sigma_{z_1}(x, y)$ на глубине $z = z_1(x, y)$ и напряжением $\sigma_{z_1} + a_n(x, y)$ в части, расположенной глубже z_1 , на радиус a_n тельца Пачини, т.е. на глубине $z_1 + a_n$ по давлению A_n на поверхности тельца можно вычислить давление p_0 в его сердцевине. Последняя величина принимается и для давления на выходе из тельца. Давление p_i прикладываемое к i -й перепонке, определяется по формуле

$$p_i = \sigma_{i+1} - \sigma_i.$$

Реакция на внешнее давление в форме напряжения σ_i зависит от относительного смещения, которое определяется смещением ω_i i -й перепонки и смещением ω_{i-1} $i-1$ -й перепонки, и выражается следующим образом:

$$\sigma_i = \frac{\omega_i - \omega_{i-1}}{h_i} \alpha E, \quad \omega_i = B_i \cos(2\theta) \cos\left(\pi \frac{x'_i}{b}\right),$$

где

$$B_i = A_i k_i, \quad k_i = \frac{a_i^2}{E d_i} \left(1 + \frac{4 b^2}{\pi^2 a_i^2}\right)^2,$$

h_i — расстояние между i -й и $i-1$ -й перепонками, d — коэффициент ($\alpha \ll 1$); E — модуль Юнга; A_i — максимальная величина p_i ; a_i —

радиус i -й перепонки, k_i — упругость i -й перепонки; d_i — толщина i -й перепонки; ω_i — смещение i -й перепонки; b — длина тельца Пачини; θ, x_j — параметры, характеризующие положение места на перепонке, для которого определяется напряжение.

$$\frac{B_{i+1} - B_i}{h_{i+1}} \alpha E = A_n$$

рассматривается в качестве граничного условия для поверхности тельца Пачини, т. е. для $i = n$. Здесь сердцевина тельца Пачини рассматривается как абсолютно твердое тело, поэтому для $i=1$ принято $B_{i-1} = 0$. Напряжение, прикладываемое к сердцевине тельца Пачини, определяется из следующих уравнений:

$$p_0 = \frac{A_n}{\prod_{j=1}^n \left(1 - \frac{c_j}{k_j}\right)}; \quad c_j = \frac{h_j}{\alpha E} + \frac{k_{j-1} c_{j-1}}{k_{j-1} + c_{j-1}}.$$

Было проведено моделирование процесса формирования выходных сигналов для случая, когда поверхности кожного покрова касается торцевая часть кругового цилиндра с плоским дном. Максимальная величина выходного напряжения приходится на контур, несколько смещенный за кромку цилиндра к центру. Величина этого напряжения тем больше, чем ближе нервные окончания к поверхности кожного покрова.

Нервные окончания в кожном покрове воспринимают раздражения, которые образуются на их поверхности в результате искривления поверхности кожного покрова и связанных с этим перераспределений сил упругости. При этом имеет место эффект латерального торможения, заключающийся в том, что усиливается выходное напряжение в участках с сильным возбуждением нервных окончаний и тормозится ответная реакция на участках со слабым возбуждением. Это способствует выделению кромок и выступающих частей объекта. Искусственный тактильный сенсор (рис. 2) построен на основании этой модели.

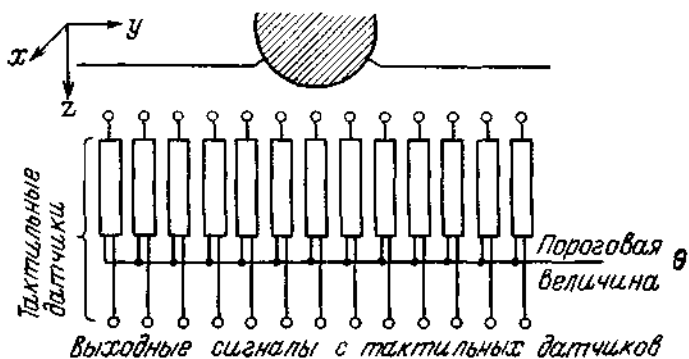


Рис 2 Структурная схема искусственного тактильного сенсора.

Пространство между датчиками давлений заполнено упругим веществом. Когда объект соприкасается с поверхностью сенсора, вещество испытывает деформацию, которая передается на пьезоэлектрические преобразователи. С выхода пьезоэлектрического преобразователя (рис. 3) снимается электрический сигнал (величина его пропорциональна величине давления на входе).

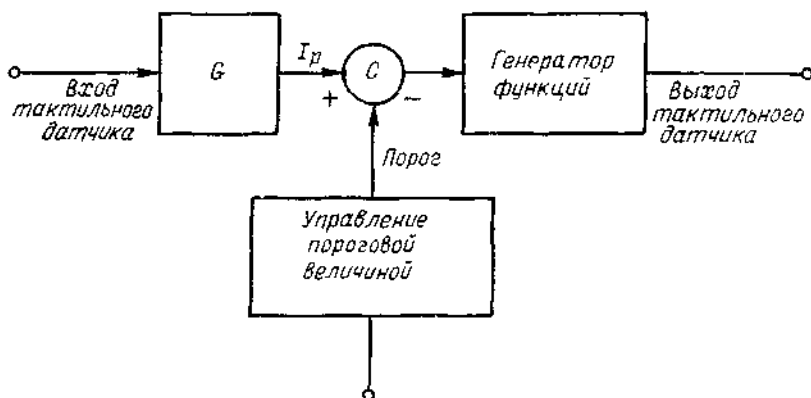


Рис. 3. Структурная схема тактильного датчика.

Передаточная функция этого датчика определяется традиционными методами, поэтому считается, что внутреннее состояние или внутренний потенциал I_p заданы. Внутренний потенциал I_p датчика

сравнивается с пороговой величиной θ , которая может задаваться произвольно, а на выходе появляется сигнал только при $I_p > \theta$. Пространственный образ представляется в виде ряда двухмерных (плоских) образов и соответствующих им величин порога, которые затем суммируются на ЭВМ.

Этот метод назван ВАРИШОУЛД-методом и является модифицированным для целей распознавания ИМИКТРОН-методом. В нем величина порога меняется во времени и связана с функцией реинтеграции, что позволяет применить математический аппарат нечеткой логики аналогично тому, как это делается в динамических сетях для распознавания зрительных образов.

Если обозначить распределение пороговой величины в общем случае $p(\theta_i)$, то множество пересечений x_i можно определить:

$$x_i = V(x, y, z) \cap p(\theta_i), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Здесь рассматривается плоское распределение пороговой величины $p(\theta)$. Это означает, что в каждый момент времени на все датчики подается одинаковая пороговая величина, меняющаяся по определенному закону во времени. В общем случае распределение пороговой величины $p(\theta)$ является сложной функцией не только времени, но и пространственных координат, и может рассматриваться как пространственная, временная или пространственно-временная функция. В этом случае сигнал на выходе тактильного датчика

$$m(\alpha) = \text{sign } \Phi, \quad \Phi = I_p - \theta \quad \begin{array}{l} \text{при } \Phi > 0 \quad \text{sign} = 1; \\ \text{при } \Phi < 0 \quad \text{sign} = 0, \end{array}$$

где α — пространственная, временная или пространственно-временная переменная; I_p — величина возбуждения или величина внутреннего состояния датчика; θ — пороговая величина.

В случае плоского распределения пороговой величины множества пересечения x_i при геометрической интерпретации можно рассматривать как срезы, образующиеся при рассечении пространственной фигуры $V(x, y, z)$ ПЛОСКОСТЯМИ $p(\theta_i)$.

Здесь

$$z = p(\theta_i) = \theta_i; \quad \Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i+1}.$$

В этом случае возможна аппроксимация $V(x, y, z)$ следующим образом:

$$V(x, y, z) = V_1 \oplus V_2 \oplus \dots \oplus V_n; \quad V_i = x_i \otimes \Delta\theta_i,$$

где \oplus , \otimes означают соответственно прямую сумму и прямое произведение.

На рис. 4 приведена классификация образов при помощи параллельной проекции.

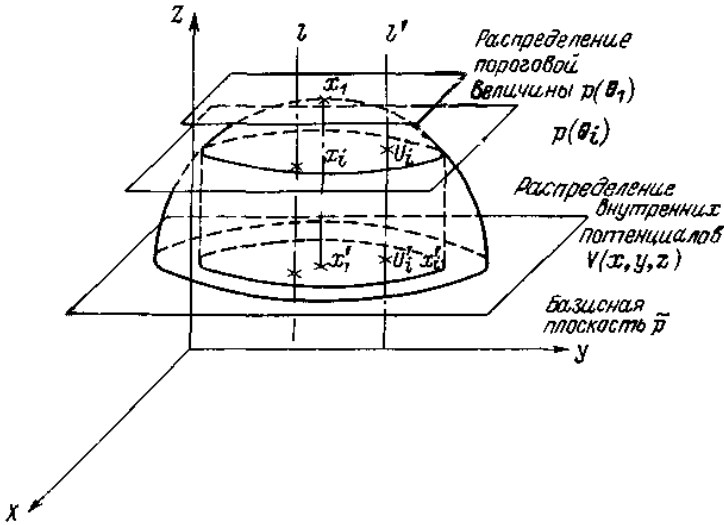


Рис 4 Геометрическая интерпретация классификации образов при помощи параллельной проекции

Определяется базисная плоскость для распознавания \tilde{p} , на которой $\tilde{x}: \tilde{x} = V(x, y, z) \Pi_{\tilde{p}}$, где $\tilde{p} = p(\theta_i = \beta)$; β — постоянная величина.

По определению \tilde{p} и $p(\theta_i)$ взаимно параллельные плоскости.

Определяется прямая l , параллельная оси Z , и определяется прямая l' , которая проходит через точку U_i' из множества x_i на плоскости $p(\theta_i)$ и которая параллельна l ; U_i' определяется из равенства

$$U_i' = l'(U_i) \Pi_{\tilde{p}}$$

Таким образом, параллельная проекция

$$\Pi_{l, \tilde{p}}(U_i) = U_i', \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где $\Pi_{l, \tilde{p}}$ — параллельная проекция на \tilde{p} в направлении l . В этом случае x_i' может быть определено:

$$\Pi_{l, \tilde{p}}(x_i) = x_i', \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где индекс $i=1$ соответствует базисной плоскости для $V(x, y, z)$.

Таким образом, любая пространственная форма объекта может быть аппроксимирована подобным образом либо непосредственно, либо через соотношения для наиболее подходящих основных пространственных форм. Точность приближения зависит от величины приращения $\Delta\theta$ в выражении:

$$\theta = \theta_i + \Delta\theta.$$

Если ввести следующие определения:

$$U_1 = V(U_i) \Pi p(\theta_i);$$

$$U_i = V(U_i) \Pi p(\theta_i);$$

$$\tilde{U} = V(U_i) \Pi \tilde{p},$$

где U_i должно удовлетворять условию $U_i = s_1 U_i + s_2 \tilde{U}$, а также

$$s = \overline{U, \tilde{U}}, s_1 = \overline{U_i \tilde{U}}/s, s_2 = \overline{U_i U_i}/s, s_1 + s_2 = 1;$$

$$x_1 = V(x, y, z) \Pi p(\theta_1);$$

$$x = V(x, y, z) \Pi p;$$

$$x_i = V(x, y, z) \Pi p(\theta_i),$$

$\Gamma_1(x_1), \tilde{\Gamma}(\tilde{x}), \Gamma_i(x_i)$ — площади образов x, \tilde{x}, x_i , то имеет место следующая теорема.

Теорема 1. $\Gamma_1(x_1), \tilde{\Gamma}(\tilde{x}), \Gamma_i(x_i)$ должны удовлетворять следующему неравенству: $\Gamma_i(x_i) \geq s_1 \Gamma(x_1) + s_2 \tilde{\Gamma}(\tilde{x}_2)$.

Если $U_1 \geq U_n > U_i > U_m > \tilde{U}$, $U_i = s_n U_n + s_m U_m$, где $s = \overline{U_n U_m}$,

$$s_m = \overline{U_n U_i}/s, s_n = \overline{U_i U_m}/s, s_n + s_m = 1,$$

причем $\Gamma_n(x_n), \Gamma_m(x_m), \Gamma_i(x_i)$ — площади образов, полученных для распределений пороговой величины $p(\theta_n), p(\theta_m), p(\theta_i)$, которым соответствуют точки U_n, U_m, U_i , то на основании теоремы 1 доказана теорема 2.

Теорема 2. $\Gamma_n(x_n), \Gamma_m(x_m), \Gamma_i(x_i)$ должны удовлетворять следующему условию: $\Gamma_i(x_i) \geq s_n \Gamma_n(x_n) + s_m \Gamma_m(x_m)$, равенство имеет место только в случае цилиндрической или пирамидальной формы распределения потенциалов $V(x, y, z)$. Теорема 2 определяет количественную зависимость между площадями образов для любой пороговой величины в пределах от $p(\theta_i)$ до \tilde{p} .

Теорема 3. Если $\Gamma_n(x_n) = \Gamma_m(x_m) = \Gamma_i(x_i)$, то часть распределения потенциалов $V(x, y, z)$ между $p(\theta_n)$ и $p(\theta_m)$ имеет цилиндрическую форму.

В работе Киносита рассмотрено применение методов дифференциальной геометрии для количественного определения зависимости между распределением электрических потенциалов $V(x, y, z)$ и распределением пороговой величины $p(\theta_i)$ для случая точечного соприкосновения этих распределений в точке p_0 .

Вторая квадратичная форма II для распределения потенциалов $V = V(U, V)$, записанная через индикацию кривизны U, V , имеет вид $II = L dU^2 + M dU dV + N dV^2$, здесь $L = V_{uu} \cdot e$; $M = V_{uv} \cdot e$;

$N = V_{vv} \cdot e$; e — вектор нормали; L, M, N — коэффициенты второй квадратичной формы для кривизны U, V . Для этих коэффициентов имеет место следующая теорема.

Теорема 4. 1) если точка распределения $V(U, V)$, находящаяся в окрестности точки p_0 , лежит с одной стороны от этой точки, и p_0 — эллиптическая точка поверхности, то имеет место следующее условие:

$$L > 0, LN - M^2 > 0;$$

2) если точка распределения $V(U, V)$, находящаяся в окрестностях точки p_0 , лежит с обеих сторон от этой точки и p_0 — гиперболическая точка поверхности, то имеет место условие:

$$L < 0, LN - M^2 < 0;$$

3) если p — параболическая точка поверхности, то имеет место условие: $LN - M^2 = 0$.

Если $z = f(x, y)$ — уравнение поверхности распределения электрических потенциалов и нормаль к распределению пороговой величины $p(\theta_i)$ параллельна оси z , то можно вычислить кривизну этой поверхности и образ для распределения пороговой величины: $p(\theta_2) = p(\theta_1 - \Delta\theta_1)$. Обозначим через θ угол между плоскостью, нормальной к этому распределению, и плоскостью xz . Кривизна R для среза поверхности распределения электрических потенциалов, нормальной к плоскости, в которой лежит ось z и которая образует угол θ с плоскостью xz , определяется из выражения

$$\frac{1}{R} = \frac{\cos^2 \theta}{R_1} + \frac{\sin^2 \theta}{R_2},$$

где R_1 — кривизна среза распределения плоскостью

$$xz (\theta = 0), \quad \frac{1}{R} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2};$$

R_2 — кривизна среза распределения плоскостью

$$yz \left(\theta = \frac{\pi}{2} \right), \quad \frac{1}{R_2} = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}.$$

Для малых отклонений пороговой величины $\Delta\theta_1$ в результате разложения $\Delta\theta_1$ в ряд, можно получить

$$\Delta\theta_1 = \frac{1}{2} (rx^2 + ty^2) + \frac{1}{6} (\dots ,$$

где $r = \partial^2 z / \partial x^2$, $s = \partial^2 z / \partial x \partial y = 0$, $t = \partial^2 z / \partial y^2$.

Если $\frac{x}{\sqrt{2|\Delta\theta_1|}} = x$, $\frac{y}{\sqrt{2|\Delta\theta_1|}} = y$, то $\frac{\Delta\theta_1}{|\Delta\theta_1|} = rx^2 + ty^2 +$

$$+ \frac{\sqrt{2|\Delta\theta_1|}}{3}$$

(... при $\Delta\theta_1 \rightarrow 0$, $rx^2 + ty^2 = \varepsilon$ (ε — постоянная величина).

В геометрической интерпретации это соответствует ортогональной проекции образа распределения электрических потенциалов для пороговой величины $p(\theta_2)$ на распределение пороговой величины $p(\theta_1)$. Таким образом, распознавание формы распределения электрических потенциалов в окрестности точки p_0 возможно и при малых отклонениях пороговой величины $\Delta p(\theta_1)$ от исходного распределения пороговой величины $p(\theta_1)$. Это позволяет использовать простой тактильный сенсор на двухпозиционных переключателях, реагирующих на давление.

Для упрощения обработки плоских тактильных образов и структуры тактильного сенсора желательно получить хорошую точность распознавания образа при минимальном числе тактильных датчиков. В работе Киносита предложен метод определения расстояния между тактильными датчиками, оптимального в смысле некоторого критерия расчета.

Плоский тактильный образ имеет собственное значение, удовлетворяющее уравнению Гельмгольца. Если R_α — область рецептивного поля, занимаемая образом x_α , а c_α — граница этой области, и если учесть, что функция $\Phi \neq 0$ в области R_α , то собственное значение λ^* образа может быть получено из уравнения Гельмгольца с учетом следующего условия:

$$\Delta\Phi + \lambda^*\Phi = 0 \text{ в } R_\alpha, \\ \Phi = 0 \text{ на } c_\alpha,$$

Δ — двумерный лапласиан,

$$\Delta\Phi = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}.$$

Поскольку в области R_α число тактильных датчиков ограничено, они формируют только дискретные значения образа x_α . Кроме того, поскольку собственное значение образа x_α зависит от занимаемой им площади, осуществляется его нормализация. При записи функции $\Delta\Phi$ в приращениях, она может быть представлена как

$$\Delta\Phi(i, j) = \frac{1}{h^2} \{ \Phi(i+1, j) + \Phi(i-1, j) + \Phi(i, j+1) + \\ + \Phi(i, j-1) - 4\Phi(i, j) \}.$$

В этом случае уравнение Гельмгольца можно переписать в виде

$$\left[-\frac{1}{h^2} A + \lambda E \right] \Phi = 0.$$

Здесь A — матрица оператора в приращениях; Φ — вектор функции Φ ; E — единичная матрица. Для $\Phi \neq 0$:

$$\left| -\frac{1}{h^2} A + \lambda E \right| = 0.$$

Если Λ — собственное значение A , то $\lambda = \frac{1}{h^2} \Lambda$.

В случае $h \rightarrow 0$ требуется доказать условие сходимости для λ . Это было сделано в работе Forsythc $\lim_{h \rightarrow 0} \lambda = \lambda^*$.

По результатам сравнения полученных аналитически и по методу Якоби собственных значений основных геометрических фигур (квадрат, прямоугольник, окружность) было получено выражение

$$\bar{\lambda}_\delta = \frac{\lambda_\delta}{1 - \frac{0,08\lambda_\delta}{s}}$$

Здесь λ_δ — δ -е собственное значение для λ , \bar{s} определяется из условия $\bar{s}h^2 = 1$.

Если $x_\alpha \in \Omega$, где Ω — множество образов, а $\Omega^{(\beta)}$, $\beta = 1, 2, \dots, m$ — подмножества этого множества, то $x_\alpha^{(\beta)} \in \Omega^{(\beta)}$, $\beta = 1, 2, \dots, m$; $\lambda_0^{(\beta)}$ — минимальная величина собственного значения любого из образов $x_\alpha^{(\beta)}$; $\lambda_0^{(\beta)} = \min \{\lambda_1^{(\beta)}, \lambda_2^{(\beta)}, \dots, \lambda_n^{(\beta)}\}$; здесь δ — размерность матрицы A (число тактильных датчиков в области R_α), для которой были получены $\lambda^{(\beta)}$.

Собственное значение дискретного образа, зависящее от числа тактильных датчиков на рецептивном поле, получается как приближенное значение λ^* или $\bar{\lambda}$. Если обозначить через $\sigma^{(\beta)}$ относительную погрешность, вызванную отклонением собственного значения дискретного образа от собственного значения исходного образа, то $\lambda_0^{(\beta)}$ через относительную погрешность $\sigma^{(\beta)}$ можно определить следующим образом:

$$\lambda_0^{(\beta)} = (1 - \sigma^{(\beta)}) \bar{\lambda}_0^{(\beta)}$$

После определения для каждого образа $x_\alpha^{(\beta)}$ значения интервала $h^{(\beta)}$, $\beta = 1, 2, \dots, m$ выбирается минимальное из этих значений

$$h = \min \{h^{(1)}, h^{(2)}, \dots, h^{(m)}\}.$$

В работе Киносита и др. рассмотрено проектирование тактильного сенсора для распознавания образов круглой и квадратной форм, а также приведены соответствующие экспериментальные данные. Оказалось, что относительная погрешность квадратного образа меньше относительной погрешности круглого образа, однако собственное значение квадратного образа зависит от его ориентации на рецептивном поле, в то время как для круглого, нормализованного образа собственное значение остается постоянным. Приведенные в работе зависимости между собственным значением и углом

ориентации образа, положением его центра тяжести для различных значений h , позволяют оценить относительную погрешность распознавания для различных значений интервала между тактильными датчиками.

Можно выделить два типа распознавания тактильных образов при помощи искусственной руки. Согласно первому тактильная информация поступает в результате соприкосновения с объектом от рецептивных полей (например, от каждого рецептивного поля между суставами), и цельный образ формируется соответствующей компоновкой этих фрагментальных образов.

Процесс распознавания формы объекта в этом случае реализуется по иерархическому принципу и может иметь три уровня:

- в результате соприкосновения объекта с рецептивным полем;
- благодаря охвату объекта искусственной рукой;
- в результате ощупывания объекта искусственной рукой.

Известный ВАРИШОУЛД-метод относится к этому типу распознавания. Однако при этом методе необходима параллельная обработка информации, поступающей от расположенных на рецептивном поле с высокой плотностью пьезоэлектрических преобразователей, что представляет большие технические трудности. В работе Киносита рассмотрен подобный метод классификации тактильных пространственных образов при помощи построения разграничивающих гиперплоскостей

На поверхности искусственной руки размещены в качестве тактильных датчиков r штук двухпозиционных выключателей, которые обозначены соответственно x_1, x_2, \dots, x_r . Совокупность состояний этих двухпозиционных выключателей, которая получается при охвате объекта искусственной рукой, обозначаемся

$$V(x_1, x_2, \dots, x_r).$$

При многократном охватывании объекта искусственной рукой можно получить в этом r -мерном пространстве множество точек

$$V_1(x_1, x_2, \dots, x_r), V_2(x_1, x_2, \dots, x_r), \dots, V_q(x_1, x_2, \dots, x_r).$$

Это множество точек разбивается на несколько подмножеств, соответствующих определенным категориям объектов. Для точки V_i , относящейся к категории α , и точки V_j , относящейся к категории β , уравнение гиперплоскости может быть записано следующим образом:

$$(V_i - V_j) \cdot V + \frac{1}{2} |V_j|^2 - \frac{1}{2} |V_i|^2 = 0;$$

$$|A|^2 = A \cdot A,$$

где $A \cdot B$ — скалярное произведение A и B .

Подмножества точек разграничиваются при помощи соответствующего числа гиперплоскостей, и объект, в зависимости от своей формы, попадает в ту или другую категорию.

Был проведен эксперимент по распознаванию при помощи искусственной руки с двухпозиционными выключателями (22 штуки) предметов двух категорий: 5 цилиндров с круглым и 5 с квадратным сечением, включая эталонные образцы диаметром 0,09 м и со стороной квадрата 0,07 м. Каждый из этих предметов охватывался искусственной рукой по 10 раз. Классификация осуществлялась автоматически в такой последовательности операций:

- 1) обнаружение объекта;
- 2) схватывание объекта большим и указательным пальцами;
- 3) подъем объекта;
- 4) схватывание объекта мизинцем;
- 5) отделение указательного пальца;
- 6) охват пятью пальцами и классификация.

Размеры распознаваемых предметов и результаты распознавания приведены в таблице.

Распознаваемые объекты и процент правильных ответов для предметов с круглым и квадратным поперечным сечением

Предмет с круглым сечением	Название объекта	C1	C2	C3	C4	C5
	Радиус, мм	70	80	90	100	110
	Процент правильных ответов	0	90	100	100	50
Предмет с квадратным сечением	Название объекта	S1	S2	S3	S4	S5
	Поперечный размер грани, мм	50	60	70	80	90
	Процент правильных ответов	25	95	100	90	100

Для предметов, близких по размерам к эталонным, число правильных ответов превышает 90%. При распознавании предметов, размеры которых значительно отличаются от размеров эталонных, целесообразна регулировка длины пальцев, которая осуществляется опытным путем.

29.2. Алгоритм тактильного распознавания.

В рассмотренном примере классификации предметов двух типов алгоритм распознавания был настолько прост, что легко реализовывался при помощи простой логической схемы. В более общем случае синтез алгоритма распознавания является сложной проблемой.

В работе Окада акцент сделан на алгоритме тактильного распознавания пространственного образа при помощи манипулятора с пятью степенями подвижности (рис. 5).

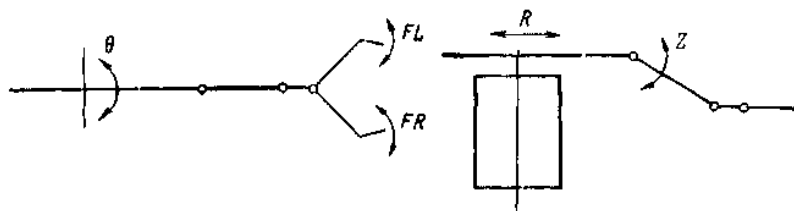


Рис.5. Схема степеней подвижности манипулятора

Степени подвижности можно разделить на две группы: одни (θ , R , Z) позволяют осуществить перемещение схвата манипулятора в пределах рабочего пространства, другие (FL , FR)—сжатие и разжатие двух пальцев (по одной степени подвижности на каждый палец). На конце каждого пальца имеется тактильный датчик в виде контакта, замыкание которого сигнализирует о соприкосновении пальца с поверхностью тела. Управление манипулятором осуществлялось от ЦВМ.

Программа распознавания состоит из двух частей: подпрограммы управления манипулятором и главной программы распознавания. Подпрограмма управления манипулятором на основании полученных данных выдает на преобразователь управляющие команды по каждой степени подвижности. При поступлении сигналов от тактильных датчиков вычисляет их положение в декартовой системе координат, после чего передает управление главной программе распознавания, которая, получив необходимые данные от подпрограммы управления манипулятором, выдает результаты распознавания на построение печатающее устройство и координатный графопостроитель. Обмен данными между обеими программами осуществляется через общий участок памяти с метками IN (для данных, вводимых в программу управления манипулятором), OUT (для вывода результатов распознавания) из главной программы распознавания).

В программе управления манипулятором (рис. 6) исходные данные записываются раздельно по каждой степени подвижности.

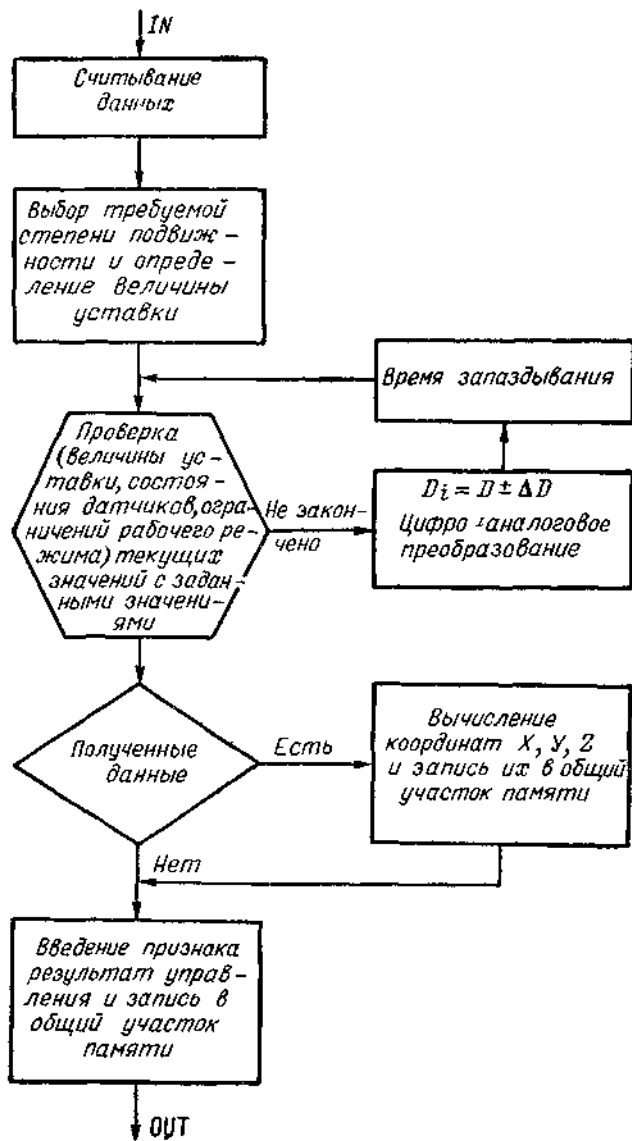


Рис 6. Структурная схема программы управления манипулятором.

Управляющее воздействие реализуется отдельными малыми порциями: после выдачи команды на перемещение манипулятора по данной

степени подвижности, соответствующей очередной порции управляющего воздействия, следующая команда не выдается до тех пор, пока привод не отработает эту команду. При выполнении команды «разжать пальцы» или «сжать пальцы» пальцы раздвигаются или сжимаются постепенно, а в момент полного раскрытия или сжатия пальцев выдается сигнал о завершении выполнения команды. При управлении манипулятором по степени подвижности Z для вертикального перемещения схвата осуществляется также управление по степени подвижности R для компенсации криволинейности траектории перемещения схвата

Наблюдаемые предметы различаются по своим размерам и по форме. В первом случае различие устраняется соответствующим масштабированием образов. Во втором случае многообразие форм сводится к нескольким основным геометрическим фигурам, таким, как шар, круговой цилиндр, круговой конус, n -гранная призма, n -угольная пирамида и т. п., соответствующей комбинацией которых с заданной степенью точности может быть аппроксимирована форма любого объекта.

Предложенная программа распознавания рассчитана только на эти основные геометрические формы. Пространственная ориентация распознаваемых тел выбирается такой, чтобы в сечении получились также наиболее простые фигуры.

В качестве первого шага в распознавании кривых мы ограничились пока распознаванием только двух типов линий: прямой линии и кривой, являющейся частью окружности.

Поскольку определение оптимальной кривой, проходящей через группу точек с известными координатами на плоскости достаточно сложно, в эксперименте, кроме координат на плоскости, учитывалась последовательность ввода данных о точках.

Согласно методу контроля расстояния и угла, в случае n точек проводится аппроксимирующая прямая для предшествующих $n-1$ точек, и на эту прямую опускается перпендикуляр из точки n . Длина полученного таким образом перпендикуляра PH_i ($i=1, 2, \dots, n-2$) сравнивается с некоторой эталонной величиной PH_{MAX} . Аналогично для аппроксимирующей прямой, проведенной через группу из $n-1$ точек, измеряется угол отклонения, образованный ее пересечением с прямой, соединяющей точку $n-1$ с точкой n . В результате получаются значения углов $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-2}$, сумма которых: $SUMD = \sum_{i=1}^{n-2} \theta_i$. Если удовлетворяются два неравенства: $PH_i < PH_{MAX}$, $ISUMDK < SUMMAX$ для $i \leq n-2$, то считается, что точки лежат на прямой. Здесь

эталонные величины PHMAX и SUMMAX являются соответственно предельно допустимым расстоянием и предельно допустимым углом отклонения.

После обнаружения объекта схватом манипулятора получаются данные о расположении группы точек на линии воображаемого среза тела плоскостью, параллельной плоскости ХОУ и сдвинутой относительно нее на величину Z_i , причем по отдельности распознаются группы точек, полученных левым пальцем и правым пальцем. Распознавание осуществляется согласно методу контроля расстояния и угла.

Для распознавания линии необходимо не менее трех точек.

Эксперимент показал, что оптимальным числом можно считать 4—5 точек, а при дальнейшем увеличении числа точек существенных изменений распознаваемого образа не происходит.

Если в результате распознавания левым и правым пальцами получаются прямые линии, то распознаваемое тело в этой плоскости среза имеет угол, который вычисляется по уравнениям этих линий.

Когда распознавание левым и правым пальцами дает сочетание прямой и дуги окружности, распознавание этим методом невозможно. Когда результатами распознавания обоими пальцами являются дуги окружности, считается, что левым и правым пальцами выявлена одинаковая кривая (учитывая вышеприведенные ограничения на форму и пространственную ориентацию распознаваемых тел). На основании полученных данных эта кривая аппроксимируется окружностью, после чего вычисляются координаты центра и радиус окружности. Структурную схему программы распознавания плоских фигур см. на рис 7.

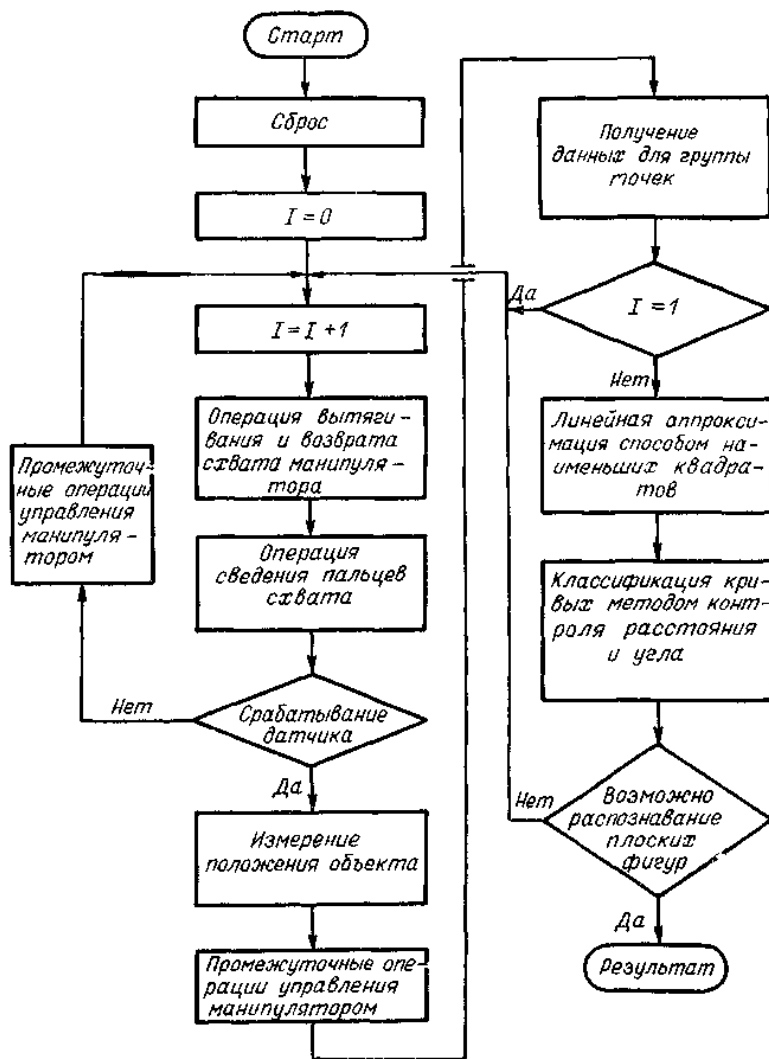


Рис. 7 Структурная схема программы распознавания плоских фигур

Для распознавания плоских фигур нужны данные о 4—5 точках (для каждого пальца в отдельности).

Пространственный образ можно рассматривать как результат наложения друг на друга плоских образов, каждый из которых соответствует определенной координате Z_i пространственного образа. Результаты распознавания будут тем точнее, чем больше число i плоскостей среза.

Если исключить случай, когда необходимо знать высоту тела, то для общего распознавания можно ограничиться $i = 3$. Следовательно, для распознавания трехмерного образа необходимы пространственные координаты 30 точек. Структурная схема алгоритма распознавания пространственной формы тела приведена на рис. 8.

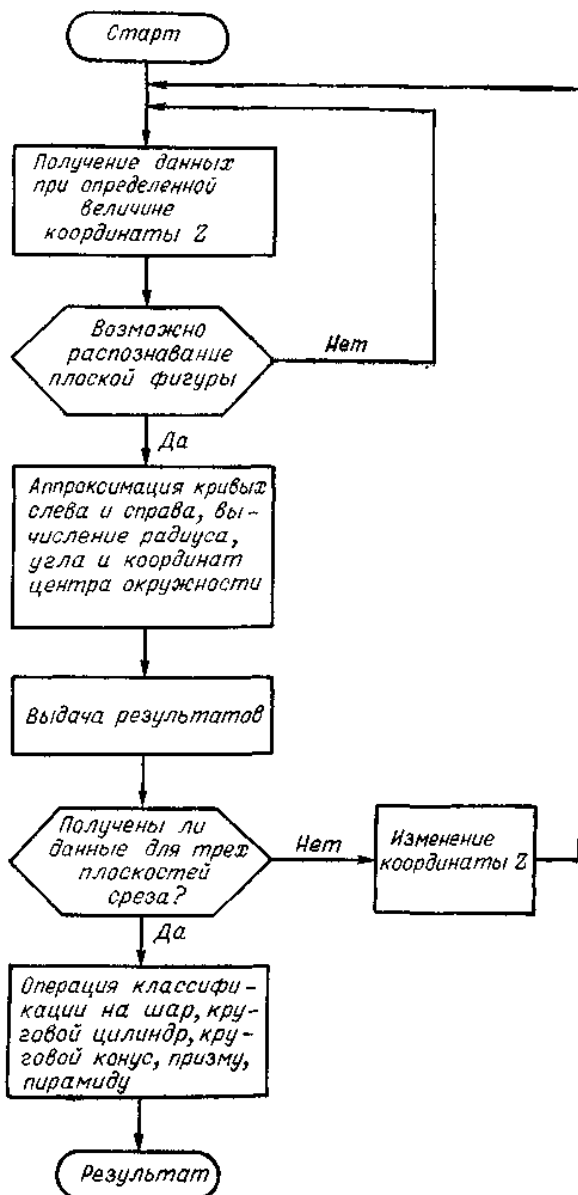


Рис. 8. Структурная схема алгоритма распознавания пространственной формы тела.

В этом алгоритме исследуется зависимость от координаты Z таких компонентов, как радиус, угол и т. п., полученных в результате распознавания фигур в плоскости среза. Результаты этого исследования позволяют легко провести классификацию предметов.

29.3. Симбиотическая система распознавания образов.

В работе Аида описана система, которая позволяет путем координированной обработки визуальной и тактильной информации формировать образ недостаточно четко видимых объектов, что делает ее эффективной при распознавании объектов под водой. Система может быть реализована в двух вариантах - в виде незамкнутой системы и в виде замкнутой системы с обратной связью, содержащей обучающиеся устройства. В незамкнутой симбиотической системе выходной сигнал с визуального сенсора служит входным сигналом для тактильного сенсора. Обработка визуального сигнала используется для уточнения изображения объекта. Тактильный сенсор движется к объекту и ощупывает его заданную часть, в результате чего формируется детекторная матрица объекта. Тактильная информация затем преобразуется в визуальный сигнал. Обработка матрицы проводится для краев объекта.

В замкнутой симбиотической системе имеется канал обратной связи с выхода тактильного сенсора на вход визуального сенсора (рис. 9).

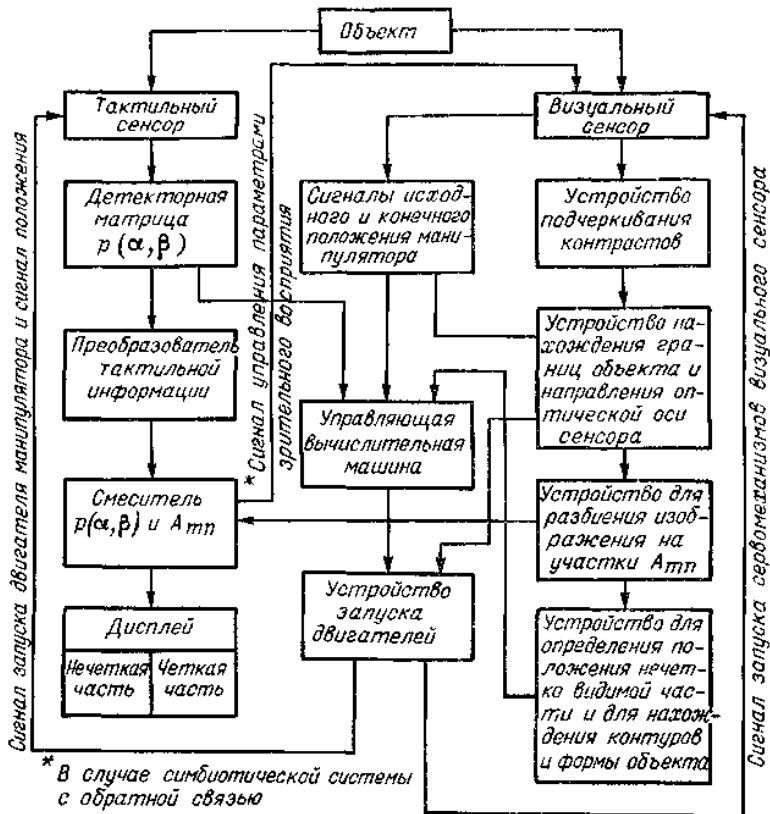


Рис. 9. Структурная схема визуально-тактильной симбиотической системы.

Благодаря этому, выходной сигнал тактильного сенсора может влиять на выходной сигнал визуального сенсора. Это позволяет контролировать уровень яркости изображения или правильно выбрать способ сканирования.

Выше были рассмотрены три основных направления, по которым исследуется проблема тактильного распознавания пространственных объектов:

1) разработка искусственного тактильного сенсора для восприятия и предварительной обработки тактильной информации, в частности бионический подход к решению этой проблемы;

- 2) синтез алгоритма распознавания;
- 3) создание симбиотических систем распознавания образов.

При тактильном распознавании образов многое определяется выбором конкретного метода получения первичной информации. Например, использование дискретных тактильных датчиков типа двухпозиционных микровыключателей упрощает схемную реализацию, поскольку не требуется аналого-цифрового преобразования исходной информации о соприкосновении объекта с искусственной рукой для ввода ее в ЦВМ. Кроме того, меньшее количество передаваемых данных уменьшает время их обработки и позволяет использовать более простое вычислительное устройство. Попытка получить больше данных за одно соприкосновение наталкивается на ограниченную плотность размещения таких датчиков на рецептивном поле. Аналоговые тактильные датчики типа пьезоэлектрических преобразователей позволяют за одно соприкосновение получить значительно больше информации и тем самым уменьшить долю непроизводительно затрачиваемого на перемещение искусственной руки времени.

Алгоритмы тактильного распознавания пространственных образов можно рассматривать как частный случай общей проблемы распознавания и классификации образов. Любые успехи и достижения в этом направлении стимулируют появление более совершенных методов и алгоритмов тактильного распознавания пространственных образов.

Нетрудно видеть большую перспективность различного рода методов симбиотического распознавания, позволяющих получить объемный образ исследуемого объекта на основании частных образов, вырабатываемых отдельными подсистемами (визуальными, тактильными, гидроакустическими). Такой подход позволяет максимально использовать достоинства каждой подсистемы получения информации и эффективно компенсировать их недостатки. При ограниченной видимости в подводной среде целесообразно, вероятно, формирование комплексного образа объекта по этому методу на основании не только визуальной, тактильной информации, но и гидроакустической информации, формируя, например, частный образ по методу ультразвуковой голографии.

Можно отметить два направления, по которым ведется разработка инструмента на конце исполнительного органа манипулятора:

- 1) разработка набора сменных однофункциональных инструментов;

2) разработка многофункциональных, несменяемых схватов типа «искусственная рука».

Первое направление появилось в результате естественного стремления расширить функциональные возможности простых копирующих манипуляторов, которые отличались либо упрощенной системой тактильных датчиков, либо полным отсутствием тактильного очувствления . Наборы одно-функциональных инструментов, по желанию оператора заменяемых (часто автоматически) на конце исполнительного органа манипулятора, широко применяются для промышленных роботов и подводных манипуляторов.

Литература

- 1. Allan R [MEMS Microphone-Amp chips breaks acoustics ground. MEMS microphone IC heralds new era for sound processing](#)
- 2. Allan R [Mini low-g accelerometers sport five functions](#) 2007
- 3. Amarasinghe R. et al Design and fabrication of miniaturized six-degree of freedom piezoresistive accelerometer MEMS 2005: 18th IEEE International Conference on microelectromechanical systems. – P. 351 – 354
- 4. Anderson R. R., Parrish J. A The optics of human skin J. Invest. Dermatol. – 1981. – 77. – P. 13 – 19
- 5. Arensman R Mini-microphones make big market waves Electronic Business. – 2006. – 9, N 1
- 6. Bard A. J., Faulkner L. R Electrochemical Methods and Applications NY: Wiley, 2001
- 7. Baird Ch. I., Myszka D. G Current and emerging commercial optical biosensors J. Mol. Recognit. – 2001. – 14. – P. 261 – 268
- 8. Barker S. J. and Tremper K. K Pulse oximetry Anesthesia Equipment, Principles and Applications. – St Louis: Mosby-Year Book, Inc., 1993
- 9. Barker S. J. and Tremper K. K Pulse oximetry: applications and limitations Int. Anesthesiol. Clin. – 1987. – 25. – P. 155
- 10. Bedoya M., Diez M. T., Moreno-Bondi M. C., Orellana G Humidity sensing with a luminescent Ru(II) complex and phase-sensitive detection Sensors and Actuators B: Chemical. – 2006. – 113, Issue 2. – P. 573 – 581
- 11. Berger J. L., Brissot J., Cazaux Y., Descure P A Line Transfer Color Image Sensor with 576x462 Pixels Intl. Solid-State Circuits Conf., Feb. 1984. – P. 28 – 29
- 12. Beus Sh [MEMS microphone enables better acoustic designs](#) ECN, 2005. – 7, N 1
- 13. Biagiotti V., Tamburri E. et all, Valentini F. Synthesis and characterization of polymeric films and nanotubule nets used to assemble selective sensors for nitrite detection in drinking water Sensors and Actuators B: Chemical. – 2006. – 116, Issue 1
- 14. Bilger W., Johnsen T. and Schreiber U UV-excited chlorophyll fluorescence as a tool for the assessment of UV-protection by the epidermis of plants J. Exp. Botany. – 2001. – 52. – P. 2007 – 2014
-

- 15. Bilger H. W., Longe O. L., Shreiber V. Determination of leaf heat resistance: comparative investigation of chlorophyll fluorescence changes and tissue necrosis methods *Oecologia*. – 1984. – 63, №2. – P. 256 – 262
- 16. Blanc V. F., Haig M., Troli M. and Sauve B Computerized photoplethysmography of the finger *Can. J. Anaesth.* – 1993. – 40. – P. 271 – 278
- 17. Bruls W. A. G. and Van der Leun J. C Forward scattering properties of human epidermal layers *Photochem. Photobiol.* – 1984. – 40. – P. 231 – 242
- 18. Bruulsema J. T., Essenpreis M., Heinemann L. et al Detection of Changes in Blood Glucose Concentration in-vivo with Spatially Resolved Diffuse Reflectance *OSA Conf. On Biomedical Optical Spectroscopy and Diagnostics*. – 1996
- 19. Budnyk M. M., Chaikovsky I. A., Voytovych I. D. et al Supersensitive magnetocardiographic system for early identification and monitoring of heart diseases (Medical Applications) *Управляющие системы и машины*. – 2005. – № 3. – С. 50 – 62
- 20. Budnyk M. M., Minov Yu. D., Voytovych I. D. et al Supersensitive magnetocardiographic system for early identification and monitoring of heart diseases (hardware) *Управляющие системы и машины*. – 2004. – №6. – С. 21 – 30
- 21. Budnik N., Sosnitsky V., Vojtovich I. et al Pulse-relaxation oscillation SQUID-magnetometer Proc. 13 IMEKO World Congress, Torino (Italy), 1994. – 3. – P. 2383 – 2387
- 22. Budnyk M., Gapelyuk A. et al, Voytovych I. Computer-aided bioimagnetic investigation systems *Управляющие системы и машины (УСиМ)*. – 1995. – № 3. – С. 31–46
- 23. Cameron B. D., Corde H., Cote G. L Development of an Optical Polarimeter for in vivo Glucose Monitoring Part 2 of the SPIE Conference on Optical Diagnostics of Biological Fluids, San Jose, California, January 1999
- 24. Cano-Raya C., Capitan-Vallvey L. F, Fernandez-Ramos M. D., Gomez-Sanchez J. Irreversible optical sensor for mercury determination based on tetraarylborate decomposition *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2006. – 117, Issue 1. – P. 135 – 142
- 25. Charlotte Bell [Understanding Contemporary Pulse Oximetry](#) 2005

- 26.

Chen Po-Jui, Humayun M. S. and Tai Yu-Chong, Rodger D. C.

Unpowered spiral-tube parylene pressure sensor for intraocular pressure sensing

Sensors and Actuators A: Physical. – March 2006. – 127, Issue 2. – P. 276 – 282

- 27.

Ching-Liang Dai

A capacitive humidity sensor integrated with micro heater and ring oscillator circuit fabricated by CMOS–MEMS technique

Sensors and Actuators B: Chemical. – 2006. – 116, Issue 1

- 28.

Bernhardt R. and Pyun J. C, Chung J. W., Kim S. D.

Application of SPR biosensor for medical diagnostics of human hepatitis B virus (hHBV)

Sensors and Actuators B: Chemical . – 2005. – 111-112. – P. 416 – 422

- 29.

Chuvashov V. D

New methods and facilities for polarization refractometry

J. Opt. Technol. – 1997. – 64, N 3. – P. 179 – 181

- 30.

Colin K. Campbell

Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications. – Boston: Academic Press, 2000. – 1633 p

- 31.

Dallimore S. R., Davis J. L

Ground probing radar investigations of measure ground ice and near surface geology in continuousness permafrost

Pap.Geol. Surv. Can. – 1987. – № 87-1A/2. – P. 913 – 924

- 32.

Annan A. R., Davis J. L., Killey R. W. D., Vaughan C

Surface and borehole ground-penetrating radar surveys for mapping geological structure

NWWA/EPA Conf. Surface and Boreholle, Geophys. Meth. Ground Water Invest., San Antonio, Tex. Febr 7-9 1984 Proc. – Worthington, Ohio, 1984. – P. 681 – 712

- 33.

Barker J., Dawson J. B., Ellis D. J. et all

A theoretical and experimental study of light absorption and scattering by in vivo skin

Med. Biol. – 1980. – 25. – P. 695 – 709

- 34.

Compton S, DeBlase F. J.

Infrared emission spectroscopy: a theoretical and experimental review

Applied Spectroscopy. – 1991. – 45. – P. 611 – 618.

- 35.

Del Prete, Monteleone L. and Steindler R, Z.

A novel pressure array sensor based on contact resistance variation metrological properties

Rev. Sci. Instrum. – 2001. – 72(3) . – P. 1548

- 36.

De Trafford J. C. and Lafferty K

What does photoplethysmography measure?

Med. Biol. Eng. Comput. – 1984. – 22. – P. 479 – 480

- 37.

Diffey B. L

A mathematical model for ultraviolet optics in skin

Phys. Med. Biol. – 1983. – 28. – P. 647 – 657

- 38.

Fedack V., Kytaev O., Romanov V., Voytovych I

Portable chronofluorometer for express-diagnostics of photosynthesis

Proc. Of the Third IEEE Workshop on “Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications”, IDAACS’2005. – Sofia, Bulgaria. – 2005, September 5–7. – P. 287 – 288

- 39.

Freitas R. A. Jr

Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Mechanical Artificial Red Cell. Artificial Cells, Blood Substitutes, and Immobile

Biotech. . – 1998. – 26. – P. 411 – 430

- 40.

Freitas R. A. Jr

Nanomedicine, Volume IIA: Biocompatibility

Landes Bioscience. – Georgetown: TX, 2003

- 41.

Garshka Ev. L., Giriuniene R

Electronic processes in acoustoresistive sensors

Sensor Electronics and Microsystem Technologies. – 2004. – N 1. – P. 30

- 42.

Genty B

Effects of drought on primary photosynthetic processes of cotton leaves

Plant. Physiol. – 1987. – 83. – P. 360 – 364

- 43.

Gigante G., Mugnaini S., Staderini E. M

[The Photoplethysmography Page](#)

- 44.

Gilmour D. J

The effect of ionic stress on photosynthesis in *Duraliella tetriolecta*:
chlorophyll fluorescence kinetics and spectral characteristics

Planta. – 1985. – 163. – P. 250 – 256

- 45.

Girousi S., Ozkan D., Ozsoz M

Electrochemical DNA biosensors for the detection of infectious and
inherited diseases considering public health and environment

55 Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry
"Electrochemistry: From Nanostructures to Power Plants",
Thessaloniki, 19–24 Sept., 2004. – Lausanne: Int. Soc.
Electrochem., 2004. – P. 376

- 46.

Bode B. W., Einhorn D. et al, Gross T. M.

Performance evaluation of the MiniMed continuous glucose
monitoring system during patient home use

Diabetes Technol. Ther. – 2000. – 2(1) . – P. 49 – 56

- 47.

Gross T. M., Mastrototaro J. J

Efficacy and Reliability of the Continuous Glucose Monitoring System

Diabetes Technol Ther. – 2000. – 2 (Suppl 1). – P. 19

- 48.

Brahim S., Guiseppi-Ehe A., Slaughter G., Ward K. R

Design of Subcutaneous Implantable Biochip for Monitoring of Glucose and Lactate

IEEE Sensors Journal. – 2005. – 5, N 3. – P. 345 – 355

- 49.

Havaux M., Lannoye R

Effects of chilling temperatures on prompt and delayed chlorophyll fluorescence in maize and barley leaves

Photosynthetica. – 1984. – 18. – P. 117 – 127

- 50.

Havaux M., Lannoye R

In vivo chlorophyll fluorescence and delayed light emission as rapid screening techniques for stress tolerance in Crop plants

Zeitschrift Pflanzenzucht. – 1985. – 95. – S. 1 – 13

- 51.

Heer K.-P

Intelligente Stellungsregler nutzen Piezoventile und Magnetsensor

Industriearmaturen. – 2004. – Heft 4. – S. 285 – 287

- 52.

Heise H. M., Janatsch G., Kruse-Jarres J. D, Marbach R.

Determination of Glucose in Whole Blood Attenuated Total Reflection Infrared Spectroscopy

Anal. Chem. – 1989. – 61. – P. 2009 – 2015

- 53.

Gries F. A, Heise H. M., Koschinsky Th., Marbach M. R.

Noninvasive blood glucose sensors based on near-infrared spectroscopy

Artific. Organs. – 1994. – N 18. – P. 439 – 477

- 54.

Gauglitz G, Homola J., Yee S. S.

Surface plasmon resonance sensors: Review

Sensors and Actuators. – 1999. – 54. – P. 3 – 15

- 55.

Houck Richard T

Measuring the electrical properties of coal using ground-penetrating radar

IEEE Trans. Geosci. And Remote Sens. – 1985. – 23, № 6. – P. 851 – 854

- 56.

Hui E

[Microelectromechanical Systems](#)

2007

- 57.

Dumania P, Jachowicz R. S.

Evaluation of thin-film humidity sensor type MSP–MOS

Moisture and Humidity: Proceedings of the International Symposium on Moisture and Humidity/ Ed. Chaddock. – Washington, DC, 1985

- 58.

Jacques S. L

[Origins of tissue optical properties in the UVA, visible and NIR regions](#)

- 59.

Danzer K. et al, Fischbacher C., Jagemann K.-U.

Application of Near-Infrared Spectroscopy for Non-Invasive Determination of Blood/Tissue Glucose Using Neural Networks

Zeitschrift fur Physikalische Chemie. – 1995. – 191. – S. 179 – 190

- 60.

James D. Taylor

Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems

CRC Press, 1995

- 61.

Jaremko J., Rorstad O

Advances Toward the Implantable Artificial Pancreas for Treatment of Diabete

Diabetes Care. – 1998. – 21, N 3. – P. 444 – 450

- 62.

Johnson R. C

[Lab claims world's best MEMS sensor](#)

2007

- 63.

Johnston K. S., Mar M., Yee S. S

Prototype of multi-channel planar substrate SPR probe

Sensors and Actuators. B. – 1999. – 54. – P. 57 – 65

- 64.

et al, Fagerstam L., Ivarsson B., Jonsson U.

Real-time biospecific interaction analysis using surface plasmon resonance and a sensor chip technology

Biotechniques. – 1991. – 11. – P. 620 – 627

- 65.

Kajiwara K., Kishikawa H. et al, Uemura T.

Non-invasive Measurement of Blood Glucose Concentrations by Analyzing Fourier Transform Infrared Absorbance Spectra Through Oral Mucosa

Med. & Biol. Eng. Comput. – 1993. – 31. – P. 17 – 22

- 66.

Johnston K.S., Jung C.C, Karlsen S.R., Yee S.S.

First order surface plasmon resonance sensor system based on a planar light pipe

Sensors and Actuators. B. – 1996. – 32. – P. 137 – 141

- 67.

Hirsch A, Kautsky H.

Neue Versuche zur Kohlensaureassimilation

Naturwissenschaften. – 1931. – 19. – S. 964

- 68.

Fomenko I., Kermani B. G., Kotseroglou T. et al

Decoding beads in a randomly assembled optical nose

Sensors and Actuators B: Chemical. – 2006. – 117, Issue 1. – P. 282 – 285

- 69.

Knoll G.F

Radiation Detection and Measurement

New York: John Wiley & Sons, 1999

- 70.

Fumihito Arai, Kohei Motoo, Toshio Fukuda et al

High sensitive touch sensor with piezoelectric thin film for pipetting works under microscope

Sensors and Actuators A: Physical. – 2006. – 126, Issue 1. – P. 1 – 6

- 71.

Ditrichova D., Kolarova H., Wagner J

Penetration of the laser light into the skin in vitro

Lasers in surgery and medicine. – 1999. – 24. – P. 231 – 235

- 72.

Korsunsky V. M., Palagin O. V., Romanov V. O., Vojtovych I. D

Noninvasive research of the condition of microcirculatory channel of blood circulation system

Управляющие системы и машины. – 2002. – № 6. – С. 29 – 36

- 73.

Kretschman E

Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberflächenplasmonschwingungen

Z. Phys. –1971. – N 241. – S. 313 – 324

- 74.

Kretschman E., Roether H

Zeitschrift fur Naturforschung

1968. – 23. – S. 2135

- 75.

Jakoby B, Kohl F., Kuntner J.

Simultaneous thermal conductivity and diffusivity sensing in liquids using a micromachined device

Sensors and Actuators A: Physical. – 2006. – 130-131, August. – P. 62 – 67

- 76.

Lai-Kwan Chau, Shu-Fang Cheng and Tsao-Jen Ein, Yi-Fang Lin

Fiber-optic chemical and biochemical probes based on localized surface plasmon resonance

Sensors and Actuators B: Chemical. – 2006. – 113, Issue 1. – P. 100 – 105

- 77.

Lang H.P

Cantilever array sensors

Materialstoday. – April 2005. – 8, Issue 4. – P. 30 – 36

- 78.

Leung A., Shankar P. M. and Mutharasan Raj

A review of fiber-optic biosensors

Sensors and Actuators B: Chemical. – 2007. – 125, Issue 2. – P. 688 – 703

- 79.

Lichtenthaler H.K

The Kautsky effect: 60 years of chlorophyll fluorescence induction kinetics

Photosynthetica. – 1992. – 27 (1-2) . – P. 45 – 55

- 80.

Li Y., Ling M., Yang M., Zhu Y

Surface acoustic wave humidity sensors based on poly(p-diethynylbenzene) and sodium polysulfonesulfonate

Sensors and Actuators B: Chemical. – 2006. – 116, Issue 2. – P. 8

- 81.

Landau J. I. et al, Malchoff C. D., Shoukri K.

A Novel Noninvasive Blood Glucose Monitor

Diabetes Care. – 2002. – 25. – P. 2268 – 2275

- 82.

Gries F. A., Heise H. M, Koschinsky Th., Marbach R.

Non-invasive Blood Glucose Assay by Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy of the Human Inner Lip

Appl. Spect. – 1993. – 47(7). – P. 875 – 881

- 83.

Markey F

Biacore 3000 – primed to perfection

BIAJournal. – 1998. – N 2. – P. 4 – 7

- 84.

Markstadter E. A

Epidermal transmittance of leaves of *Vicia faba* for UV radiation as determined by two different methods

Photosynth. Res. – 2001. – 67. – P. 17 – 25

- 85.

Fischer B., Marshall N., Quesser H.J

Dispersion of Surface Plasmons in InSb

Physical Review Letters. – 1971. – 27, N 2. – P. 95 – 97

- 86.

Ichirou Yamaguchi, Masayuki Yokota, Takeshi Kenmochi and Toshihiko Yoshino, Yuji Sato

A compact polarimetric glucose sensor using a high-performance fibre-optic Faradey rotator

Meas. Sci. Technol. – 2004. – 15. – P. 143 – 147

- 87.

[MEMS in space: Draper inertial stellar compass fully operational](#)

2007

- 88.

Godel E. at all, Minic J., Persuy M.-A.

Functional expression of olfactory receptors in yeast and development of a bioassay for odorant screening

FEBS J. – 2005. – 272. – P. 524 – 537

- 89.

Monk P. M. S

Fundamentals of Electroanalytical Chemistry

UK: Wiley, 2001

- 90.

Myszka D. G

Survey of the 1998 optical biosensor literature

J. Mol. Recognit. – 1999. – 12. – P. 279 – 284

- 91.

Nedayvoda I. V., Primin M. A., Vasylyev V. E., Voytovych I. D

Supersensitive magnetocardiographic system for early identification and monitoring of heart diseases (software)

Управляющие системы и машины. – 2005. – № 2. – С. 43 – 56

- 92.

Neul R

Micromachined angular rate sensors for automotive applications

IEEE Sensors Journal. – Feb. 2007. – 7, Issue 2. – P. 302 – 309

- 93.

Essenpreis M. et all, Hermann M., Nickell S.

Anisotropy of light propagation in human skin

Phys. Med. Biol. – 2000. – 45. – P. 2873 – 2886

- 94.

Norton P. R

Infrared in the next millenium

SPIE Proc. – 1992. – 3698. – P. 652 – 665

- 95.

Nowak H

Biomagnetism / Magnetism in Medicine

Berlin: Wiley-VCH, 1998. – S. 286-301

- 96.

Olesberg J. T

Noninvasive Blood Glucose Monitoring in the 2.0 – 2.5 μ m Wavelength Range

The University of Iowa. Department of Chemistry and the Optical Science and Technology Center. – 2004

- 97.

Olsen E. S

Acoustical solutions in the design of a measurement microphone for surface mounting

Bruel & Kjaer Technical Review. – 2005. – N 1. – P.1

- 98.

Omar S. Khalil

Spectroscopic and clinical Aspects of Noninvasive Glucose Measurements

Clinical Chemistry. – 1999. – 45(2). – P. 165 – 177

- 99.

Crotzer D. R., Falcone R

Pat. 5 273 777 USA. Metod for manufacturing hygristors

Publ. 1993

- 100.

Rosenthal R. D.

Pat. 5,703,364 USA. Method, apparatus for near-infrared quantitative analysis

Publ.1997

- 101.

Merrill R. B

Pat. 6632701 USA. Vertical color filter detector group and array

Publ. Oct. 2003

- 102.

Pinnaduwege L. A

Moore's law in homeland defense: an integrated sensor platform based on silicon microcantilevers

IEEE Sensors Journal. – Aug. 2005. – 5, Issue 4. – P. 774 – 785

- 103.

Pologe J. A

Pulse oximetry: technical aspects of machine design

Int. Anesthesiol. Clin. – 1987. – 25. – P. 137

- 104.

Rajan S. C. and Gupta B. D

Fabrication and characterization of a surface plasmon resonance based fiber-optic sensor for bittering component Naringin

Sensors and Actuators B: Chemical. – 2006. – 115, Issue 1. – P. 344 – 348

- 105.

Brown C. W., Letcher S. V, Rand A. G., Ye J.

Optical Biosensors for Food Pathogen Detection

Foodtechnology. – 2002. – 56, N 3. – P. 32 – 38

- 106.

Ratches J. A

Night vision modeling: historical perspective

SPIE Proc. – 1999. – 3701, pp. 2-12

- 107.

Reago D. A

Third Generation Imaging Sensor System Concepts

SPIE Proc. – 1999. – 3701. – P. 108 – 117

- 108.

Lanz R., Muralt P, Rey-Mermet S.

Bulk acoustic wave resonator operating at 8 GHz for gravimetric sensing of organic films

Sensors and Actuators B: Chemical. – 2006. – 115, Issue 1

- 109.

Franzen S., Jon-Paul M. et al, Rhodes C.

Surface plasmon resonance in conducting metal oxides

Journal of Applied Physics. – 2006. – 100, September

- 110.

Myszka D. G, Rich R.

Survey of the 1999 surface plasmon resonance biosensor literature

J. Mol. Recognit. – 2000. – 13. – P. 1 – 20

- 111.

Robbes D

Highly sensitive magnetometers – a review

Sensors and Actuators A: Physical. – 2006. – 129, May. – P. 86 – 93

- 112.

Roddy Dennis

The use of impulse radar for fracture detection in rocks

IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat. Arlington, 23-25 Aug. 1983. – Symp. Res. – New York: N.Y., 1983

- 113.

Roos G

[Accelerometer touts small footprint](#)

2007

- 114.

Lynn N. P, Rosenthal R.D.

Investigation of Non-Invasive Measurement of Blood Glucose

Int. Diabet Fed. Congress. – Washington, 1991

- 115.

Ruby R. C

Thin Film Bulk Wave Acoustic Resonators (FBAR) for Wireless Applications

IEEE International Ultrasonic Symposium. – Atlanta. USA, 2001.
– C. 8

- 116.

Fredrickson L. et al, Mc Culloch K., Sabbah H.

Detailed Data from a Continuous Glucose Monitoring System (CGMS) Facilitates Comprehensive Diabetes Management Recommendations

Diabetes. – 2000. – 49 (Suppl 1) . – P. 718

- 117.

Sachse H.B

Semiconducting Temperature Sensors and their Applications

New York: Wiley-Interscience, 1975

- 118.

Berry J. A, Shreiber V.

Heat-induced changes of chlorophyll fluorescence in intact leaves correlated with damage of the photosynthetic apparatus

Planta. – 1977. – 136. – P. 233 – 238

- 119.

[Sick представляет интеллектуальный магнитный датчик MZ2Q для пневматических цилиндров](#)

28 июня, 05

- 120.

Skyler J. S

The economic burden of diabetes and the benefits of improved glycemic control: the potential role of a continuous glucose monitoring system

Diabetes Technol Ther. – 2000. – 2 (Suppl 1) . – P. 7 – 12

- 121.

all, Homola J. et, Slavik R.

Novel spectral fiber optic sensor based on surface plasmon resonance

Sensors and Actuators. B . – 2001. – 74. – P. 106 – 111

- 122.

Hetherington S. E, Smillie R. M.

Stress tolerance and stress-induced in crop plants measured by chlorophyll fluorescence in vivo: chilling, freering, ice cover, heat and high light

Plant physiol. – 1983. – 72. – P. 1043 – 1050

- 123.

Nott R. M, Smillie R. M.

Salt tolerance in crop plants monitored by chlorophyll fluorescence in vivo

Planta. – 1982. – 70. – P. 1049

- 124.

Spieler H

Radiation Detectors and Signal Processing

Univ. Heidelberg. – 2001. – Okt. 8-12

- 125.

[Spreeta Highlights](#)

2007

- 126.

Artyukh A. S., Pirogova L. V., Starodub N. F., Starodub V. N

Biospecific interactions on the optical transducer surface the base of infection diagnostics

Proc. of NATO ARW “Frontiers of Multifunctional Nanosystems.
– Kluwer Academic Publ., 2002. – 57. – P. 369 – 376

- 127.

Katzev A. M. et al, Starodub N. F., Starodub V. M.

Optical and electrochemical biosensors for express environmental monitoring

Proceeding of NATO ASI “Molecular electronics: Bio-sensors and Bio-computers”. – Kluwer Academic Publ., 2003. – P. 355 – 372

- 128.

Hunt W. D, Lee S.-H., Stubbs D. D.

Vapor Phase Detection of Narcotic Using Surface Acoustic Wave Immunoassay Sensors

IEEE Sensors Journal. – 2005. – 5, N 3. – P. 335 – 339

- 129.

Sturland I

Development and commercialization of silicon MEMS gyroscopes

The IEEE Seminar and Exhibition on MEMS Sensor Technologies, 2005

- 130.

Irudayaraj J., Ryan T, Subramanian A.

Mono and dithiol surfaces on surface plasmon resonance biosensors for detection of *Staphylococcus aureus*

Sensors and Actuators B: Chemical. – 2006. – 114, Issue 1. – P. 192 – 198

- 131.

Sundby H. et al

Temperature-dependent changes in antenna size of photosystem II:
reversible conversion of photosystem II? to photosystem II?

Biochem. et biophys. Acta. – 1986. – 851. – P.475 – 483

- 132.

Aso S, Ozawa F., Sugimoto W., Suzuki M.

Miniaturization of SPR Immunosensors

Analytical Sciences. – 2001. – 17. – P. 1265

- 133.

Terrence W. Barrett

History of Ultra-WideBand (UWB) Radar & Communications:
Pioneers and Innovators

Progress in Electromagnetics Symposium (PIERS 2000). –
Кембридж, Массачусетс, 2000, July

- 134.

Tuivonen P., Vidaver W. Variable chlorophyll

A fluorescence and CO₂ uptake in water-stressed white spruce
seedlings

Plant. physiol. – 1988. – 86. – P. 744

- 135.

Ulrich K. Kalt

aber feinfühlig

Physik Journal. – 2004. – 3, N 10. – P. 60 – 61

- 136.

Barton J. K. et all, Chan E. K., Vargas G.

Use of an agent to reduce scattering in skin

Lasers in Surgery and Medicine. – 1999. – 24. – P. 133 – 141

- 137.

Steven L. Jacques H. J. C. M. et all, Van Gemert M. J. C.

Skin Optics

IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 1989. – 36, N 12.
– P. 1146 – 1154

- 138.

McCrae D., Paliwal S., Simonian A, Viveros L., Wild J.

A fluorescence-based biosensor for the detection of organophosphate pesticides and chemical warfare agents

Sensors and Actuators B: Chemical. – 2005. – 115, Issue 1. – P. 150 – 157

- 139.

Voiculescu I

Electrostatically actuated resonant microcantilever beam in CMOS technology for the detection of chemical weapons

IEEE Sensors Journal. – Aug. 2005. – 5, Issue 4. – P. 641 – 647

- 140.

Buschmann J., Falkowski R. et al, Vonach R.

Application of mid-infrared transmission spectrometry to the direct determination of glucose in whole blood

Applied Spectroscopy. – 1998. – 52. – P. 820 – 822

- 141.

[Wachendorff Elektronik: Датчики приближения, магнитные](#)

2006

- 142.

Anderson R. R. and Parrish J. A, Wan S.

Analytical modelling for the optical properties of the skin with in vitro and in vivo applications

Photochem. Photobiol. – 1981. – 34. – P. 493 – 499

- 143.

McCarthy S. L, Weber W. H.

Surface-plasmon resonance as a sensitive optical probe of metal-film properties

Physical Review B. – 1975. – 12, N 12. – P. 5643 – 5650

- 144.

Weigel H. J

The effect of high temperatures on leaf cells of valerianella

Planta. – 1983. – 159. – P. 398 – 403

- 145.

Hastings J.W, Wilson T.

Bioluminescence

Annu. Rev. Cell. Dev. Biol. – 1998. – v. 14. – p. 197-230

- 146.

Turner A. P. F, Wilson R.

Glucose oxidase: an ideal enzyme

Biosensors Bioelectron. – 1992. – N 7

- 147.

Wydrzynski E. A

Effects of sodium and magnesium cations on the “dark” and light-induced chlorophyll A phluorescence yields in sucrosewashed spinach chloroplast

Biochem. et Biophys. Acta. - 1975, v.376.- P.151-157

- 148.

Xiong B

A novel bulk micromachined gyroscope with slots structure working at atmosphere

Sensors and Actuators A: Physical. – 2003. – 107, Issue 1. – P. 137 – 145

- 149.

Chen J. C, Wu C. H., Yang H.-C.

Characteristics of integrated high-Tc superconducting quantum interference device magnetometer and gradiometer with serial array

Journal of Applied Physics. – 2007. – 102, 15 July

- 150.

Yang M, Yao Z.

A fast response resistance-type humidity sensor based on organic silicon containing cross-linked copolymer

Sensors and Actuators B: Chemical. – 2006. – 115, Issue 3

- 151.

Ayazi F., Najafi K, Yazdi N.

Micromashined Inertial Sensors

Proc. of the IEEE. – 1998. – 86, N 8. – P. 115 – 122

- 152.

Manfield I. W., Stockley P. G. and Van Vranken D. L, Yoburn J. C.

A biaryl peptide crosslink in a MetJ peptide model confers cooperative nonspecific binding to DNA that ablates both repressor binding and in vitro transcription

Bioorganic & Medicinal Chemistry. – 2003. – 11(6) . – P. 811 – 816

- 153.

Clifford M, Young J.

Using the sensing triple axis reference board (STAR)

Freescale Semiconductor Application Note. – 2006. – N 10, Rev. 1. – AN3112

- 154.

Menzi H. and Ullrich L, Zeisel D.

A precise and robust quartz sensor based on tuning fork technology for (SF₆)-gas density control

Sensors and Actuators A: Physical. – March 2000. – 80, Issue 3. – P. 233 – 236

- 155.

Zhou W

Simulation and design of piezoelectric microcantilever chemical sensors

Sensors and Actuators A: Physical. – October 2005. – 125, Issue 1. – P. 69 – 75

- 156.

Barnicol W. K. R, Potzschke H., Zirk K.

A Miniaturisable High Sensitive Polarimeter as Detector of an Implantable Glucose Probe

Biomedizinische Technik. – 2001. – 46. – N 6, N 10

- 157.

Александров К. С

Пьезоэлектрические кристаллы для акустоэлектроники, пьезотехники и сенсоров

Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 20 л

- 158.

Ализар А

Миллионы сенсоров объединяются в сети

Вебпланета: Международная конференция «Диалог 2006», 08.09.05

- 159.

Алмазов К

Рыбопоисковые эхолоты: эволюция или революция?

Спортивное рыболовство. – 2003. – № 1 – 6

- 160.

Анцев Г.В., Сарычев В.А

[Управление объектами транспорта и интеллектуальные технологии](#)

2009, январь

- 161.

Апаев Б.А

Фазовый магнитный анализ сплавов

М.: Металлургия, 1976. – 280 с

- 162.

Зотов В. Д

А. с. 1739402 СССР. Полупроводниковая структура и способ управления проводимостью полупроводниковой структуры

Опубл. 1992

- 163.

Аристархов В. М., Балаховский И. С

Влияние глюкозы на инфракрасный спектр воды (к вопросу о бескровном определении глюкозы в крови методом фотометрии тканей)

Клиническая лабораторная диагностика. – 1998. – № 4.– С. 18 – 22

- 164.

Архипова В. М., Бережецкий А. Л., Дзядевич С. В. та ін

Дослідження та оптимізація кондуктометричних перетворювачів на основі планарної технології

Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2005. – № 2. – С. 48 – 54

- 165.

Сельська Г. В. та ін, Архипова В. М., Дзядевич С. В.

Електрохімічні біосенсори на основі іммобілізованих холінестераз

Дослідження у галузі сенсорних систем та технологій: Збірник наукових праць з комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України. Київ, 2006. – С. 13 – 26

- 166.

Ачильдиев В. М., Дрофа В. Н

Комбинированный микромеханический вибрационный гироскоп-акселерометр для инерциальных измерительных систем

Космонавтика и ракетостроение. – 1996. – № 5

- 167.

Багдасарян А. С

Импедансные ПАВ фильтры для сотовых систем связи

Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. М., 1998, вып. 1

- 168.

Багдасарян А. С., Бурди А. И., Громов С. С

Технические средства идентификации автомобилей на основе акустоэлектронных устройств

Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2000. – Вып. 1

- 169.

Багдасарян А. С., Карапетьян Г. Я

Импедансные фильтры на ПАВ

М.: Международная программа образования, 1998

- 170.

Бардзокас Д. И., Зобнин А. И., Сеник Н. А., Фильштинский М. Л

Математическое моделирование в задачах механики связанных полей. Статические и динамические задачи электроупругости для составных многосвязных тел

М., 2005. – 376 с

- 171.

Барсуков В. С

Микросистемная спецтехника: интеграция и миниатюризация в одном флаконе

Специальная техника. – 2003. – № 4

- 172.

Басина Н

«Интеллект» на поток

СЮ. – 2005. – № 12

- 173.

Бедненко Т., Клочан П, Корсунский В.

Портативный хронофлуорометр для экспресс-диагностики фотосинтеза

Электронные компоненты и системы. – 2003. – № 12. – С. 23 – 25.

- 174.

Бенилова И. В., Солдаткин О. П., Ушенин Ю. В. и др

Дослідження ефективності іммобілізації нюхових рецепторів людини на сенсорному чипі за допомогою спектрометра ППР «PLASMON SPR-4M»

Дослідження у галузі сенсорних систем та технологій: Збірник наукових праць з комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України. – Київ, 2006. – С. 41 – 50

- 175.

Бочаров Л. Ю., Мальцев П. П

Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом

Микросистемная техника. – 1999. – № 1. – С. 41 – 46

- 176.

Брайон О. В., Китаєв О. І, Корнеєв Д. Ю., Снігур О. О.

Інструментальне вивчення фотосинтетичного апарату за допомогою індукції флуоресценції хлорофілу: Методичні вказівки для студентів біологічного фак-ту К.: ВПЦ “Київський університет”, 2000. – 15 с

К.: ВПЦ “Київський університет”, 2000. – 15 с

- 177.

Бугайова М. Е., Коваль В. М., Лазаренко В. Й. та ін

Газові сенсори на основі оксиду цинку (огляд)

Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2005. – № 3. – С.34 – 42

- 178.

Будадин О. Н., Троицкий-Марков Т. Е

Технология комплексного теплового неразрушающего контроля зданий и строительных сооружений

Контроль. Диагностика. – 2005. – № 3

- 179.

Будяк В. Н., Гончарук Г.С., Корсунский В. М., Снегур А. А. и др

Метод и прибор с микропроцессорной обработкой информации для неинвазивного определения гемоглобина в тканях человека

Український журнал медичної техніки і технології. – 1998. – № 4. – С. 50 – 56

- 180.

Бурдик В

Анализ гидроакустических систем

Л., 1988

- 181.

Варакин Л.Е

Теория систем сигналов

М.: Сов. радио, 1978. – 304 с

- 182.

Варфоломеев С. Д

Биосенсоры

Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 1. – С. 45 – 49

- 183.

Варфоломеев С. Д., Евдокимов Ю. М., Островский М. А

Сенсорная биология, сенсорные технологии и создание новых органов чувств человека

Вестник Российской академии наук. – 2000. – 70, № 2. – С. 99 – 108

- 184.

Васильев В. П

Аналитическая химия (в 2 книгах). Книга 2: Физико-химические методы анализа

М.: Дрофа, 2004. – 383 с

- 185.

Вибрационная диагностика

М.: Диамех-2000, 2004-2007

- 186.

Владимиров Ю. А., Потапенко А. Д

Физико-химические основы фотобиологических процессов

М.: Высш. школа, 1983

- 187.

Владов М. Л., Старовойтов А. В

Введение в георадиолокацию: Учебное пособие

М.: Изд-во МГУ, 2004. - 153 с

- 188.

Войтович И. Д., Корсунский В. М., Мержвинский А. А. и др

Особливості створення оптоелектронних вимірювальних каналів портативних приладів для неінвазійного визначення характеристик крові

Дослідження в галузі сенсорних систем та технологій: Збірник наукових праць НАН України. – 2006. – С. 97 – 111

- 189.

Войтович И. Д., Корсунский В. М

Интеллектуальные сенсоры

Киев: НАН Украины, Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова, 2007. – 514 с

- 190.

Войтович И. Д., Корсунский В. М

На пути к созданию портативной автоматической системы регулирования глюкозы в крови

Sensor Electronics and Microsystems Technologies. – 2006. – № 1. – С. 47 – 63

- 191.

Войтович И. Д., Корсунский В. М., Стародуб Н. Ф. и др

Перспективы создания портативных биосенсоров на основе поверхностного плазмонного резонанса

Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2005. – № 3. – С. 56 – 65

- 192.

Войтович И. Д., Яворський І. О

Процеси в імерсійній рідині ППР сенсора при зміні біотипів

Сенсорна електроніка та мікропроцесорні технології. – 2007. – № 3

- 193.

Волкова Е. В

Поляризационные измерения

М: Изд-во стандартов, 1974

- 194.

Габуня Р. И., Колесникова Е. К

Компьютерная томография в клинической диагностике

М.: Медицина, 1995

- 195.

Галайдин П. А., Замятин А. И., Иванов В. А

Основы магниторезонансной томографии: Учеб. пособие

СПб.: Изд-во СПбГИТМО (ТУ), 1998

- 196.

Ганьжа Д

Сеть кабельного телевидения как среда для высокоскоростного доступа в Internet

LAN – Журнал сетевых решений. –2000. – май

- 197.

[Георадар "ОКО-2"](#)

МС Радиоскоп. – 2007

- 198.

Глебович Г. В

Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов

М.: Радио и связь, 1984

- 199.

Гликман А. Г

Проблемы экологической безопасности, рожденные недрами земли

Жизнь и безопасность. – 1997. – N 1. – С. 198 – 199

- 200.

Гликман А.Г

Спектральная сейсморазведка – истоки и следствия

СПб., 2004

- 201.

Гликман А. Г

Физика и практика спектральной сейсморазведки

СПб., 2003

- 202.

Гликман А. Г., Стародубцев А. А

Еще раз о разрушении инженерных сооружений

Жизнь и безопасность. – 1999. – N 1 – 2. – С. 109 – 115

- 203.

Гликман А. Г., Стародубцев А. А

О роли геофизических методов при решении инженерно-геологических задач

Жизнь и безопасность. – 1998. – N 2 – 3. – С. 518 – 524

- 204.

Гуткин Л. С

Теория оптимальных методов радиоприёма при флуктуационных помехах

М.: Сов. радио, 1972. – 448 с

- 205.

Дейнежа В. С., Сергиенко И. В

Модели и методы решения задач в неоднородных средах

Киев: Наукова думка, 2001. – 605 с

- 206.

Дзядевич С. В

Амперометрические биосенсоры. Современные технологии и коммерческие варианты анализаторов

Биополимеры и клетка. – 2002. – 18, № 5. – С. 363 – 376

- 207.

Дзядевич С. В

Биосенсоры на основе ион-селективных полевых транзисторов: теория, технология, практика

Биополимеры и клетка. – 2004. – 20, № 1 – 2. – С. 7 – 16

- 208.

Дзядевич С. В

Кондуктометричні ферментні біосенсори: теорія, технологія, застосування

Біополімери і клітина. – 2005. – 21, № 2. – С. 91 – 106

- 209.

Дзядевич С. В., Солдаткін О. П

Наукові та технологічні засади створення мініатюрних електрохімічних біосенсорів

Київ: Наукова думка. – 2006. – 255 с

- 210.

Дзядевич С. В., Солдаткін О. П

Кондуктометричний метод у ферментативному аналізі

Укр. біохім. журн. – 1994. – 66, № 4. – С. 30 – 42

- 211.

Дмитренко И. М

Высокочастотные свойства слабосвязанных сверхпроводников

М.: Наука, 1991

- 212.

Доенин В.В

Интеллектуальные транспортные потоки

М.: Изд-во «Компания Спутник». – 2007. – 308 с

- 213.

Дружинін А. О., Кутраков О. П., Мар'ямова І. Й., Павловський І. В

Мікрокристали кремнію з високим п'єзоопором при криогенних температурах для застосування в сенсорах

Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2004. – №1. – С. 69; – 2005. – № 3. – С. 74

- 214.

Евстратов В

[Судовые радиолокаторы](#)

2006

- 215.

Зайцев В

[Безопасность на кончиках пальцев](#)

2006

- 216.

Гурская Т. В., Захаров И. С., Пожаров А. В., Финогенов А. Д

Биосенсорные системы в медицине и экологии: Уч. пособие

М: Медицина, 2001

- 217.

Зими́на Т. М., Лучинин В. В

От сенсоров к микроаналитическим системам / Дополнение к кн. Эггинс Б. Химические и биологические сенсоры

М.: Техносфера, 2005

- 218.

Голев И.М., Держнев Д.А., Золотухин И.В., Калинин Ю.Е., Ситников А.В

Термоэдс углеродных наноструктур

Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 6(38). – С. 37

- 219.

Зотов В. Д

Полупроводниковые многофункциональные сенсоры широкого применения (Z-сенсоры)

Chip News. – 1998. – № 4. – С. 22 – 23

- 220.

Зотов В. Д

Z-термисторы – новый класс температурных сенсоров

Chip News. – 1999. – № 1. – С. 37 – 38

- 221.
Зотов В. Д., Кравченко А. М., Миронова П. В
Z-термисторы в режиме генератора импульсов
Chip News. – 2001. – № 1. – С. 42 – 43
- 222.
Зюко А. Г., Кловский Д. Д., Коржик В. И., Назаров М. В
Теория электрической связи: Учебник для ВУЗов
М.: Радио и связь, 1998. – 433 с
- 223.
Иванов В. А., Полонский Ю. З., Суворов А. С., Трофимова Т. Н
Методы лучевой диагностики и информационные технологии
в клинической практике
Компьютерная томография и информационные технологии:
Учеб. пособие. – СПб.: МАПО, 2001, – 250 с
- 224.
Игумнов Д.В., Костюнина Г.П
Основы полупроводниковой электроники. Учебное пособие
для вузов
М.: Изд-во: Горячая линия-Телеком.– 2005. –392 с
- 225.

Иммореев И. Я

Сверхширокополосные радары: новые возможности, необычные проблемы, системные особенности

Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. – 1998. – № 4

- 226.

[Индуктивные датчики приближения. Задачи, принцип действия, профиль требований](#)

Klaschka Elektronik + Automation. – 2006

- 227.

[Индуктивные датчики производства Pepperl+Fuchs GmbH](#)

2006

- 228.

Ищенко А. А

Аналитическая химия

М.: Академия, 2006. – 317 с

- 229.

Кайно Г

Акустоэлектроника

М.: Мир, 1990

- 230.

Бухов Н. Г, Карапетян Н. В.

Переменная флуоресценция хлорофилла как показатель физиологического состояния растений

Физиология растений. – 1986. – 33, вып. 5. – С. 1013 – 1026

- 231.

Васильев А. А., и др, Климов Д. М.

Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке

Микросистемная техника. – 1999. – № 1. – С. 3 – 6

- 232.

Козленко В

Интеллектуальные транспортные системы

ММ. Деньги и технологии. – 2006. – №

- 233.

Иржи Штепан, Конг Ту Фам

Системы кабельных модемов

Теле-Спутник. – 1999. – № 5(43)

- 234.

Корнев В. К

Эффект Джозефсона и его применение в сверхпроводниковой электронике

Соросовский образовательный журнал. – 2001. – № 8. – С. 83 – 90

- 235.

Корнеев Д. Ю

Информационные возможности метода индукции флуоресценции хлорофилла

К.: «Альтпрес», 2002. – 188 с.

- 236.

Короленко С. Д., Макордей Ф. В

Автоматическое регулирование концентрации кислорода в воздушной смеси с помощью сенсора и полупроводникового элемента

Сенсорная электроника и микросистемные технологии. – 2005. – № 3. – С. 49 – 55

- 237.

Ельская Г. В, Корпан Я. И.

Биохимия

1995. – 60. – С. 1988-1998

- 238.

Корсунский В.М., Фирсов Л.Ф

Электрогидравлическая аналогия и её применение для изучения микроциркуляторного русла системы кровообращения человека

Сб. "Кибернетика и вычислительная техника". – 2001. – Вып. 132. – С. 68-79

- 239.

Крошечные, вездесущие и всемогущие

Podcasts Mobile-Review. – 2006. – № 10

- 240.

Игуменов И. К, Кригер Ю. Г.

Физические принципы молекулярной электроники

Микросистемная техника. – 2001. – № 7. – С. 45 – 47

- 241.

Кузнецов И.А

Магнитный структурный анализ: Учебное пособие

Свердловск: Уральский государственный университет. 1984

- 242.

Кузьмин В. А

Тиристоры малой и средней мощности

М., 1971

- 243.

Левин А. И

Теоретические основы электрохимии

М.: Физматгиз, 1963

- 244.

Летопись Интеллектуального зодчества

М., 2000 – 2004

- 245.

Данилова Е. А., Липатова Е. К., Ольшанская Л. Н

Ионоселективные электроды для определения тяжелых металлов в водных средах

Вестник СГТУ (Саратов).– 2006. – № 3 (15). вып. 2. – С. 44

- 246.

Лихарев К. К

Введение в динамику джозефсоновских переходов

М.: Наука, 1985

- 247.

Локатор нелинейностей с анализом 2-й и 3-й гармоник "ОРИОН" (NJE-4000)

Технические средства безопасности – SET-1, 2001 г

- 248.

Лукьянов Д. П., Лучинин В. В., Скворцова В. Ю

Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах

Микросистемная техника. – 2001. – № 2. – С. 3 – 7

- 249.

Лысенко О

Промышленные энкодеры компании Sick

Электронные компоненты. – 2005. – № 4

- 250.

Мамікопян Б. М., Мамікопян Х. Б

Мікропроцесорний вимірювач з терморезистивним сенсором

Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2004. – № 2. – С. 25

- 251.

Маргелов А

Датчики компании Honeywell

ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – №2

- 252.

Маргелов А

Компоненты для магнитометрии и навигации компании Honeywell

СНІР News. – 2006. – № 1 (104) . – С. 38

- 253.

Маргелов А

Магниторезистивные датчики положения компании Honeywell

CHIP News. – 2005. – №3. – С. 60

- 254.

Мартыненко Ю. Г

Тенденции развития современной гироскопии

Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 11. – С. 120-127

- 255.

Тихонов В. И., Харисов В. Н

Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: Учеб. пособие для ВУЗов

М.: Радио и связь, 1991. – 608 с

- 256.

Тонков М.В

Фурье-спектроскопия - максимум информации за минимум времени

Соросовский Образовательный журнал. – 2001, Физика

- 257.

Сизиков В. С

Математические методы обработки результатов измерений

СПб.: Политехника, 2001

- 258.

[Спецификации стандарта Bluetooth](#)

М.: Наука и техника, 1980. – 184 с

- 259.

Пирогова Л. В, Стародуб М. Ф.

[Розробка імунного біосенсора на основі поверхневого плазмонного резонансу для експресної діагностики лейкозу великої рогатої худоби](#)

Дослідження у галузі сенсорних систем та технологій: Збірник наукових праць з комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України. – Київ, 2006. – С. 331 – 340

- 260.

Стародуб Н. Ф. Стародуб В. Н

Экспрессный контроль токсичных веществ и патогенных микроорганизмов. Иммуный анализ и иммунные сенсоры

Укр. биохим. журн. – 2002. – 74, № 4. – С. 5 – 23

- 261.

Стасенко Л

[Дактилоскопия и безопасность](#)

Резонанс. – 2006. – № 1

- 262.

Суздаев И. П

Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. (Синергетика: от прошлого к будущему.)

М.: КомКнига, 2006. – 592 с

- 263.

Тарг С.М

Краткий курс теоретической механики. Учебник для ВУЗов

М.: Высшая школа. – 2007. – 416 с

- 264.

Сизикова Ю

Кабельный модем — технологии и реалии сегодняшнего дня

Мир Internet. – 1998, № 11

- 265.

Сидоров В. А

[Основные направления в развитии портативных приборов для измерения параметров вибрации](#)

ЗАО КВК "Экспо - Сибирь", 2005. – С. 172 – 176

- 266.

Рихтер С.Г

Цифровое радиовещание

М.: "Горячая Линия - Телеком". – 2003. – 352 с

- 267.

Войтович И. Д., Корсунский В. М., Палагин А. В, Романов В. А.

Автоматизированные оптоэлектронные приборы для биосенсорных исследований

Сенсорная электроника и микросистемные технологии «СЕМСТ-1»: Труды Международной научно-технической конференции. – Одесса, 1-5 июня 2004 г. – с. 227

- 268.

Рубин А. Б

[Первичные процессы фотосинтеза](#)

Соросовский образовательный журнал. – 1997. – N 10. – С. 79 – 84

- 269.

Рудник В. А

Геоактивные зоны земной коры и их воздействие на нашу среду обитания

Жизнь и безопасность. – 1998. – N 4. – С. 236

- 270.

Рыбалкина М

[Нанотехнологии для всех](#)

М.: Техносфера, 2005. – 444 с

- 271.

Огнев А, Самардак А.

Спинтроника: от "микро" к "нано"

Компьютерра (бизнес-журнал) . – 10.02.2006 г

- 272.

Самарин А. А

Позиционно-чувствительные фотодатчики

Электронные компоненты. – 2003. – № 7. – С. 103 – 108

- 273.

Сивцов Д. А

[Датчики Холла в устройстве оптимальной загрузки дизеля](#)

Промислова власність: Офіційний бюлетень. – 1997. – № 3

- 274.

Кравченко В. М., Седуш В. Я. и др, Сидоров В. А.

Техническая диагностика механического оборудования

Донецк: Новый мир, 2003. – 125 с

- 275.

Тихонов А. Н

Регуляция световых и темновых стадий фотосинтеза

Соросовский образовательный журнал. – 1999. – N 11. – С. 8 – 15

- 276.

Точнее не бывает

Изобретатель и рационализатор. – 2003. – №10

- 277.

Тучин В. В

Оптика биотканей: основы лазерной диагностики и дозиметрии

Саратовский государственный университет, физический факультет, кафедра оптики. – 1997

- 278.

Шебалин О. Д

Физические основы механики и акустики: Учеб. пособие.

М.: Высш. школа, 1981. – 261 с

- 279.

Шелепин Н. А

Исследования и разработки микросенсоров и микросистемной техники в ГНЦ Российской Федерации НПК «Технологический центр» МИЭТ

Сенсорная электроника и микросистемные технологии. – 2005.
– № 1. – С. 41

- 280.

Шелепин Н. А

Кремниевые микросенсоры и микросистемы: от бытовой
техники до авиационных приборов

Микросистемная техника. – 2000. – № 1. – С. 41 – 43

- 281.

Кошец И. А., Христосенко Р. В, Ширшов Ю. М.

Технология химического распознавания с помощью сенсорных
массивов: фундаментальные проблемы и техническая
реализация

Сенсорная электроника и микросистемные технологии. – 2005.
– № 1. – С. 27

- 282.

Шпак Г

Окна прозрачности

Наука в Сибири. – 2002. – № 7

- 283.

Шрамко В

Аппаратно-программные средства контроля доступа

PCWeek/RE. – 2003. – № 9

- 284.

Горкунов Э. С, Щербинин В. Е.

Магнитный контроль качества металлов

Екатеринбург: УрО РАН, 1996

- 285.

Эггинс Б

Химические и биологические сенсоры

М.: Техносфера, 2005. – 336 с. (Egginс B.R. Chemical sensors and biosensors. – John Wiley & Sons Ltd., 2002)

- 286.

Шведене Н. В

Селективные электроды на органические ионы

Соросовский образовательный журнал. – 2004. – № 2

- 287.

Шведене Н. В

Ионоселективные электроды

Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 5

- 288.

Чеканов Д

[Цифровое телевидение: анализ рынка и перспектив](#)

russian@tomshardware.com. – 22.03.05

- 289.

Умный дом

Гироскопия и навигация. – 1996. – № 1. – С. 48 – 55

- 290.

Золотарев В. П, Финкельштейн М. И. Кутев В. А.

Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии

М.: Недра, 1986. – 128 с

- 291.

Финк Л. М

Теория передачи дискретных сообщений

М.: Сов. радио, 1970. – 728 с

- 292.

Флуорометр переносной ИФХ-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ИВБЦ.201113.001 ТО

Національна академія наук України, Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова, Державний науково-інженерний центр мікроелектроніки. – Київ, 1994. – 20 с

- 293.

Фрайден Дж

Современные датчики: Справочник

М.: Техносфера, 2005. – 592 с

- 294.

Кальченко В. И. и др, Кукла О. Л., Хоруженко В. Ю.

Багатоелементні аналізатори газових сумішей на основі ефектів інтерференційного забарвлення тонких плівок та поверхневого плазмонного резонансу

Дослідження у галузі сенсорних систем та технологій: Збірник наукових праць з комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України. – Київ, 2006. – С. 77 – 87

- 295.

Худяков Г. И

Транспортные информационно-управляющие радиоэлектронные системы: Учебное пособие

СПб СЗТУ, 2003. – 185 с

- 296.

Ратман О., Чегель В., Ширшов Ю. и др

Біосенсор на поверхневому плазмонному резонансі. ППР реєстрація ферментативних реакцій за участю NADH та NADPH із застосуванням імпринт-метод

Дослідження у галузі сенсорних систем та технологій: Збірник наукових праць з комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України. – Київ, 2006. – С. 180 – 195

- 297.

Янус Р. И

Магнитная дефектоскопия

М.-Л.: Металлургия, 1947

- 298.

Набел П

Физиология растительной клетки (физико-химический подход)

М.: Мир, 1973. – 287 с

- 299.

Кабернюк А. А. та ін, Коржов Є. М., Олійник О. С.

Створення імуносенсора для експрес-діагностики туберкульозу великої рогатої худоби

Дослідження у галузі сенсорних систем та технологій: Збірник наукових праць з комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України. – Київ, 2006. – С. 112 – 124

- 300.

Осокина Т

[Нанокантилеверы для создания детекторов](#)

2006

- 301.

Павлов Б. А

Синхронный приём

М.: Энергия, 1977. – 80 с

- 302.

Павлов Е

[Выбираем эхолот](#)

август 2007

- 303.

Брайко Ю. О., Палагин А. В., Талемока И. Б. и др

Структурна організація віртуальної лабораторії для проектування засобів обчислювальної техніки

Комп'ютерні засоби, мережі та системи: Зб. Наукових праць. – Ін-т кібернетики НАН України. – 2005. – № 4. – С. 47 – 56

- 304.

Патент 5617852 США. Способ и устройство для неинвазивного определения состава крови

Электронные компоненты. – 2003. – № 7. – С. 103 – 108

- 305.

А. А. Снегур, А. М. Сычок, В. М. Корсунский

[Патент 14937А Украины. Способ измерения общего гемоглобина крови](#)

Промислова власність: Офіційний бюлетень. – 1997. – № 3

- 306.

А. А. Снегур, А. М. Сычок, В. М. Корсунский

Патент 22876А Украины. Устройство для измерения общего гемоглобина крови

Промислова власність: Офіційний бюлетень. – 1998. – № 3

- 307.

Войтович І. Д., Лебедева Т. С. та ін, Озеров М. В.

Розрахунок впливу параметрів плазмонепідтримуючої системи на характеристики ППР сенсора та розробка пристрою для ППР досліджень

Дослідження у галузі сенсорних систем та технологій: Збірник наукових праць з комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України. – Київ, 2006. – С. 173 – 179

- 308.

[НПП Эконикс. Перечень приборов и оборудования](#)

2006

- 309.

Нолтинг Б

Новейшие методы исследования биосистем

М.: Техносфера, 2005. – 256 с

- 310.

В. С. Федак, В. Я. Масловский, П. С. Клочан, Я. И. Мовчан

Патент 54849 Украины. Способ исследования растительных объектов

Опубл. 2005

- 311.

Гончаренко С. А., Матюк В. Ф., Райхельт Х, Хартманн Х.

Современное состояние неразрушающего контроля механических свойств и штампуемости листового проката сталей в технологическом потоке производства

Дефектоскопия. – 2003. – № 5. – С. 19 – 60

- 312.

Мельгуй М. А

Магнитный контроль механических свойств сталей

М.: Наука и техника, 1980. – 184 с

- 313.

Корсунский В. М, Мержвинский А. А., Мержвинский П. А.

[Экспериментальное изучение светового потока, обратно рассеянного от человеческого тела, с целью оптимизации приборов биомедицинского назначения](#)

Электроника и информатика-2005/ Материалы 5-й Международной научно-технической конференции, ч.2, Зеленоград, 23-25 ноября 2005 г.– Москва, 2005. – С. 132 – 134

- 314.

Микросхемы с низким потреблением

Информационный бюллетень фирмы Analog Devices // Электронные компоненты и системы. – 2003. – № 6 (70). – С. 19 – 23

- 315.

Младковская А

[Home sapiens – новый уровень комфорта](#)

Укр. биохим. журн. – 2002. – 74, № 4. – С. 5 – 23

- 316.

Каневский В. А. и др, Мовчан Я. И.

[Фитоиндикация в дистанционных исследованиях](#)

К.: Наукова думка, 1993. – 310 с

- 317.

Морган Д

Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах

М.: Радио и связь, 1990. – 415 с

- 318.

Мошкевич В. С

Фотоплетизмография

М.: Медицина, 1970

- 319.

В. М. Корсунский, И. Д. Войтович

Патент 78817 Украины. Способ неинвазивного определения концентрации глюкозы в крови человека и устройство для его реализации

Опубл. 25.04.2007, Бюл. № 5

- 320.

Войтович И. Д., Корсунский В. М., Стародуб М. Ф., Яворский И.А. и др

Патент 78998 Украины. Сенсорное устройство

Опубл. 2007

- 321.

Пешехонов В. Г

[Ключевые задачи современной автономной навигации](#)

Гироскопия и навигация. – 1996. – № 1. – С. 48 – 55

- 322.

Вольф П, Платцман Ф.

Волны и взаимодействия в плазме твердого тела

М.: Мир, 1975. – С. 101 – 102

- 323.

Плэмбек Дж

Электрохимические методы анализа. Основы теории и применения

М.: Мир, 1985

- 324.

Боюн В. П., Корсунский В. М., Остапченко Б. К. и др

Положительное решение на заявку 2002021460 на патент Украины. Способ неинвазивного измерения кровенаполнения участков тела и устройство для его реализации

Принято 21.02.02

- 325.

Приказчикова А

Bluetooth в лицах

lmf@computery.ru . – 2006

- 326.

Прокис Дж

Цифровая связь

М.: Радио и связь, 2000. – 800 с

- 327.

Оуэнс Ф, Пул Ч.

Нанотехнологии

М.: Техносфера, 2005. – 336 с

- 328.

Ратнер Д, Ратнер М.

Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи

М.: Вильямс, 2004. - 240 с

- 329.

Перевертайло В. Л

[Разработка и характеристики кремниевых координатно-чувствительных детекторов для физики высоких энергий и ядерной физики](#)

russian@tomshardware.com. – 22.03.05

- 330.

Перевертайло В.Л

Характеристики і технологія виготовлення кремнієвих планарних р-і-п фотодіодів для сцинтиелектронних детекторів

Электроника и связь. Тем. выпуск "Проблемы электроники", Часть 1, 2007. – с.15-23

- 331.

Пацковський С. В., Фролов О. В., Шульга О. А. та ін

Дослідження напівпровідникових структур для розробки рН-чутливих польових транзисторів

Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2005. – № 3. – С. 66

- 332.

Войтович И. Д., Китаев О. И., Клочан П. С. и др

Патент 12382 Украины на полезную модель. Устройство для определения состояния нативного хлорофилла

Опубл. 15.02.2006, Бюл. № 2

- 333.

Войтович И. Д., Китаев О. И., Клочан П. С. и др

Патент 13481 Украины на полезную модель. Оптоэлектронный сенсор

Опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4

- 334.

Войтович И. Д., Китаев О. И., Клочан П. С. и др

Патент 13485 Украины на полезную модель. Оптоэлектронный сенсор

Опубл. 17.04.06, Бюл. № 4

- 335.

Патент 19629342 А1 ФРГ. Способ и устройство для неинвазивного транскутанного определения концентрации веществ в тканях тела

Сенсорная электроника и микросистемные технологии. – 2005.
– № 1. – С. 27

- 336.

Keizaburo M., Sadayori H, Toshio A.

Патентная заявка 20020123677 США. Spectrophotometric blood glucose determination apparatus and determination method thereof

Опубл. 2002

- 337.

Патенты: США №№ 4169676, 4350163, 4427889, 4586513, 4655225, 4498774, 5398681, 5448992, 6188477, 6438397; патенты РФ №№ 2088896, 2112937; международная патентная заявка (РСТ) WO 89/11825 и др

PCWeek/RE. – 2003. – № 9

- 338.

Патенты: США №№ 4169676, 4655255, 4975581, 5028787, 5077476, 5086229, 5009230, 5115133, 5178142, 5179951, 5209231, 5267152, 5313941, 5361758, 5424545, 5433197, 5636633, 5655530, 5703364, 5710630, 5743262, 5750994, 5782755, 5830112, 5974337, 6016435, 6026

Екатеринбург: УрО РАН, 1996

- 339.

Пахомов С

Отпечаток пальца вместо пароля

КомпьютерПресс. – 2004. – № 4

- 340.

Рембеза С. И

Нужен ли человечеству искусственный нос?

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акидзи С. Тактильный датчик. Патент Японии № 47—12983, 1972 (на японском языке).
2. Анда С. Визуально-тактильная симбиотическая система для распознавания трехмерных образов.— Сб. «Интегральные роботы», под ред. Г. Е. Позднякова. М., «Мир», 1973.
3. Киносита Г. Распознавание образов при помощи искусственного тактильного чувства. «Кэйсоку дзидо сэйгё гаккай ромбунсю», т. 7, № 1, Токио, 1971 (на японском языке).
4. Киносита Г. Распознавание образов при помощи осязания. «Кикапно кэнкю», т. 23, № 1, Токио, 1972 (на японском языке).
5. Киносита Г. Метод определения расстояния между тактильными датчиками на рецептивном поле искусственного тактильного сенсора. «Кэйсоку дзидо сэйгё гаккай ромбунсю», т. 8, № 5, Токио, 1972 (на японском языке).
6. Киносита Г. Модель упругого кожного покрова и некоторые особенности обработки информации методом переменного порога в искусственном тактильном сенсоре. «Кэйсоку дзидо сэйгё гаккай ромбунсю», т. 8, № 4, Токио, 1972 (на японском языке).
7. Огия Т. Применение собственных значений графических образов «Дзё-хо сёри», т. 12, № 1, Токио, 1971 (на японском языке).
8. Окада Т. Распознавание пространственных образов искусственной рукой. «Дэнси гидзюцу сого кэнкюсё ихо», т. 35, № 3, Токио, 1971 (на японском языке).
9. Окамото Н. Преобразователи для роботов. «Дэнси дзайрё», № 4, Токио, 1972 (на японском языке).
10. Сато Т. Ультразвуковая система визуализации изображения объекта при помощи сжатия оптических импульсов. «Кэйсоку дзидо сэйгё гаккай ромбунсю», т. 8, № 5, Токио, 1972.
- П.Хасэгава К. Восприятие роботов. «Дэнси дзайрё», № 4, Токио, 1972 (на японском языке).
12. Цудзи С. Роботы и датчики информации. «Кэйсоку то сэйгё», т. 12, № 1, Токио, 1973 (на японском языке).
13. Aid as. A pattern classification by the time varying threshold method. „International Joint Conference an Artificial Intelligence", 1969.

14. Ueda M. Tactile sensors for an industrial robot to detect a slip. „2-nd International Symposium on industrial robots", 1972.
15. Winget C. L. Hand tools and mechanical accessories for a deep submersible. „Remotely Manned Systems", ed. E. Heer, 1973.
16. Loewenstein W. R. Mechanical transmission in a Pacipian corpuscle, an analysis and theory.— „Journal Physiology", N 182, 1966.
17. Forsythe G. E. Finite difference methods for Partial difference equations. John Willey and Sons, 1967.
18. Talbot J. E. Programmable industrial robot.— „ISA Journal", N 9, 1966.