

ВИДМАР Милан, проф.

ТРАНСФОРМАТОР В ЭКСПЛУАТАЦИИ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНО-НАУЧНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ

НТБ
ДНУЗТ

Государственное Техническое Издательство.

Москва, Центр, Ильинка, Юшков пер., д. 4. Тел. 4-32-90.

ПРОДАЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ КНИГИ:

Электротехническая промышленность.

Ветцель И., инж. Разработка проекта по электрическому освещению. Перевод с франц. инж. С. Г. Розенбаума. М. 1929 г. Изд. 2-е. 40 стр. 38 рис. Ц. 60 к.

Гирш-Вилкинг. Справочник по электротехнике. Для инженеров, техников и учащихся высших и средних техн. учебн. заведений. Пер. с нем. под ред. проф. В. А. Александрова. М. 1927 г. 232 стр. 56 рис. Ц. 2 р. 90 к. в папке.

Грун К., инж. Электрические измерительные приборы. Пер. с нем. инж.-электр. И. Б. Мандельштама. М. 1927 г. 172 стр. 341 рис. Ц. 2 р. 10 к., в папке 2 р. 40 к.

Грюневальд, д-р, инж. Экономический расчет гидравл. силов. установок. М. 1929 г. 76 стр. 27 рис. Ц. 1 р. 10 к.

Жане П., проф. Общий курс электротехники. Том I. Общие основы. Прямой ток. Перев. с франц. под редакц. проф. Я. Н. Шпильрейна. М. 1928 г. 204 стр. 183 рис. Ц. 3 р. 40 к., в папке 3 р. 80 к.

Жане П., проф. Общий курс электротехники. Том II. Переменный ток. Перевод с франц. под ред. проф. Я. Н. Шпильрейна. М. 1929 г. 260 стр. 202 рис. Ц. 3 р. 60 к., в папке 4 р. 05 к., в коленк. перепл. 4 р. 35 к.

Каппер Ф., проф. Электропередача. Сооружение воздушных линий. Руководство по расчету, проектированию и монтажу. Пер. с нем. под ред. проф. Н. И. Сушкина. М. 1927 г. 176 стр. 230 рис. Ц. 2 р. 60 к.

Козак Э., инж. Схемы включений электрических установок постоянного и переменного токов с описанием их действия. Пер. с нем. под ред. и в обраб. проф. В. А. Александрова. М. 1927 г. 100 стр. 226 рис. Ц. 1 р. 70 к.

Кроль М., проф. Учебник электротехники для технических школ и практиков. Под ред. проф. Б. И. Угримова. М. 1926 г. Изд. 5-е, дополн. 320 стр. 577 рис. Ц. 4 р. 50 к., в папке 5 р.

Луговской Б. И., инж.-электр. Электрификация фабрично-заводских предприятий и жел.-дор. мастерских. Силовые установки и освещение. Руководство для инженеров и техников. М. 1926 г. 44 стр. 101 рис. Ц. 2 р. 40 к.

Саллингер Ф., проф. Задачник по технике сильных токов. Руководство для ВТУЗ'ов. Пер. с нем. инж.-эл. И. Б. Мандельштама. М. 1927 г. 104 стр. 113 рис. Ц. 1 р. 45 к.

Стилл А., проф. Линии передачи электрической энергии. Теория и расчет. Руководство для инженеров, техников и студентов ВТУЗ'ов. Под ред. проф. А. А. Горева. М. 1925 г. 220 стр. 126 рис. Ц. 3 р.

Тирбах Б., инж. Электро-тепловое хозяйство. Пер. с нем. инж. К. Н. Астафьева. М. 1929 г. 80 стр. 150 рис. Ц. 1 р. 30 к.

Трюмен Г. Ф., проф. Электрификация железных дорог. Пособие при расчете и проектировании. Для инженеров, техников и студентов. Под ред. проф. Л. Н. Бернацкого. М. 1927 г. 108 стр. 98 рис. Ц. 1 р. 60 к.

Фивегер Г., проф. Задачи по технике постоянного и переменного токов и решения к ним. Пособие для ВТУЗ'ов и техникумов, а также и для самообучения. Пер. с нем. М. 1927 г. 200 стр. 208 рис. и 2 табл. диаграмм. Ц. 2 р. 40 к.

Фонтен Ф., инж. Расчет распределительных сетей и линий передачи электрической энергии. Пер. с франц. инж. М. Я. Бриллианта. Под ред. проф. Б. И. Угримова. М. 1927 г. 60 стр. 47 рис. Ц. 90 к.

Фролов Р. Н., инж. Курс электротехники. Ч. I. Магнетизм и электричество с кратким отделом физики. М. 1929 г. Изд. 6-е, перераб. и допол. 216 стр. 383 рис. Ц. 3 р. 50 к. в папке 3 р. 95 к., в коленк. перепл. 4 р. 25 к.

Хрущов В. М., проф. Электротехника. Курс лекций. Госуд. Учен. Сов. книга допущена в качестве пособия для ВТУЗ'ов. М. 1928 г. 200 стр. 382 рис. Ц. 3 р. 40 к.

Шенхер В., инж. Электрические подъемники. Пассажирские и грузовые с рычажным и кнопочным управлением для постоянного и переменного (одно- и трехфазного) токов. Доступное руководство для монтажников при установке и ремонте. Пер. с нем. и обраб. под ред. проф. В. А. Александрова. М. 1927 г. Изд. 2-е. 120 стр. 110 рис. Ц. 1 р. 50 к.

Шимпке П., проф. и **Горн Г.**, инж. Электрическая сварка. Пер. с нем. инж. Т. Л. Гинзбурга. М. 1927 г. 160 стр. 255 рис. Ц. 2 р. 70 к.

Шрейбер А., инж. Районная электрическая станция на низкосортном угле. Здания. Оборудование. Углеснабжение. Сжигание угля. Золоудаление. Водяное хозяйство. Электрическое хозяйство. Пер. с нем. и ред. инж. В. Л. Гордон. М. 1929 г. 128 стр. 141 рис. Ц. 2 р.

Шулейкин В. В., проф. Электричество и магнетизм. Научно-Технической Секцией допущено в качестве пособия для ВТУЗ'ов. М. 1926 г. 204 стр. 150 рис. Ц. 3 р. 20 к.

Ян Георг, инж. Испытания электрических машин. Пер. с нем. под ред. проф. В. А. Александрова. М. 1928 г. 320 стр. 407 рис. Ц. 4 р. 50 к., в папке 4 р. 90 к.

НТБ
ДНУЗТ

Строительное дело.

Анисимов Н. И., инж. Плотины. Ч. I. Водоудержательные плотины. М. 1928 г. Изд. 2-е, дополн. 176 стр. 252 рис. Ц. 2 р. 50 к.

Анисимов Н. И., инж. Плотины. Ч. II. Водоподъемные плотины. М. 1924 г. 176 стр. 12 рис. в тексте и атлас с 430 черт. Ц. 3 р.

Анисимов Н. И., инж. Производство работ по устройству плотин на реках. М. 1927 г. 128 стр. 128 рис. Ц. 1 р. 90 к.

Бах Г. Очистка сточных вод. Пер. с нем. М. 1929 г. 92 стр. 60 рис. Ц. 1 р. 35 к.

Бетоно-строительный справочник для инженеров, техников и студентов (по Beton-Kalender) 1926 г. Пер. с нем. инж. Н. Н. Бернацкого, Л. И. Будневича, С. Г. Рабиновича и С. Е. Фрида. Под ред. инж. А. И. Дыховичного. М. 1927 г. 676 стр. 623 рис. Ц. 7 р. в переплете.

Бриллинг С. Р., инж. Расчет железных частей зданий в примерах из практики. Пособие при расчете инженерных конструкций для ВУЗ'ов, инженеров и техников. М. 1929 г. 104 стр. 75 рис. Ц. 1 р. 50 к.

Бринкгауз П., инж. Городская водопроводная сеть труб. Руководство для инженеров, техников и студентов при проектировании, сооружении и эксплуатации. Перевод с немецк. в обраб., с дополн. и под редакц. инж. А. Н. Будникова. М. 1928 г. 240 стр. 183 рис., 12 табл. и 4 диагр. Ц. 3 р. 40 к., в папке 3 р. 80 к.

Бриске Р., инж. Сейсмостойкость сооружений. Пер. с нем. инж. М. Д. Зворыкина. Под ред. проф. Н. К. Лахтина. М. 1928 г. 60 стр. 71 рис. Ц. 1 р. 25 к.

Будников А. Н., инж. Водопроводный канализационный справочник. М. 1928 г. 520 стр. 122 рис. Ц. в папке 5 р. 85 к., в кол. перепл. 6 р.

Будников А. Н., инж. Канализация городов и селений и очистка сточных вод. М. 1929 г. 125 рис. Ц. 2 р. 75 к.

Будников А. Н., инж. и **Бромлей Е. Э.**, инж. Насосные станции городских и заводских водопроводов. Пособие при проектировании, расчете, постройке и оборудовании. М. 1927 г. 112 стр. 31 рис. Ц. 1 р. 50 к.

Будников А. Н., инж. и **Экман Ф. И.**, инж. Местное и центральное снабжение горячей водой жилых строений, промышлен. предприятий, бань, прачечных, купален, душевых устройств, больниц и проч. Руков. для инжен., техников и студентов при проектир., расчете и устройстве. М. 1929 г. 168 стр. 129 рис. и 100 таблиц. Ц. 2 р. 50 к.

Вагнер М., инж. Американская строительная промышленность. Пер. с нем. инж. С. И. Оршанского. Под ред. и с предисл. Н. Богданова. М. 1928 г. 56 стр. 39 рис. Ц. 75 к.

Воронин Л. Н., инж. Рациональное устройство жилищ, поселков и городов. Пособие для инженеров, техников, студентов, работников коммунального хозяйства и жилищ. товариществ. М. 1926 г. 88 стр. 105 рис. Ц. 1 р. 20 к.

Гайэ И., инж. Литой бетон и его применение в строительстве. Перев. с нем. инж. С. Е. Фрида и С. М. Суриса. М. 1928 г. 172 стр. 149 рис. Ц. 2 р. 60 к.

Герольский С. М., проф., гражд. инж. Гражданская архитектура. Конструкции отдельных частей зданий. Ч. I. М. 1929 г. Изд. 2-е. 176 стр. 674 рис. Ц. 2 р. 70 к.

Декабрун М. Н., инж. Организация и производство строительных работ по материалам построек. М. 1929 г. 136 стр. 292 рис. Ц. 2 р. 40 к.

Дингман Ч. Ф., арх. Современные методы ведения хозяйства и учета на строительных предприятиях. По данным американской практики. Пер. с англ. и обраб. инж. Н. Сорокина. М. 1926 г. 56 стр. Ц. 65 к.

Ельчуков В. М., инж. Таблицы и нормы для подбора сечений железных и деревянных конструкций. Пособие для студентов, техников и инженеров. М. 1929 г. 236 стр. 93 рис. Ц. 1 р. 90 к.

Казанцев А. П., инж. Справочная книга по отоплению и вентиляции. М. 1928 г. 594 стр. 202 рис. Ц. в папке 5 р. 90 к.

Калленберг О., инж. Домовые водопровод, канализация и газовые установки. Проектирование и расчеты. Материалы, приборы и производство работ. Технические условия, нормы, правила. Стоимость и методы ее определения. Пер. с нем. под ред. и с дополн. инж. А. Н. Будникова. М. 1927 г. 232 стр. 264 рис. Ц. 3 р., в папке 3 р. 30 к.

Канн Ф., **Давид Л.** и **Перль Г.**, инж.-ры. Расчет железобетонных конструкций. Таблицы и примеры расчета. Пер. с нем. инж. С. М. Суриса. М. 1928 г. 160 стр. 59 рис. Ц. 1 р. 25 к., в папке 1 р. 55 к.

Лахтин Н. К., проф. и **Кашкаров Н. А.**, проф. Железобетон. Пособие в 3-х частях для студентов, инженеров и техников по проектированию и выполнению железобетонных сооружений. Ч. I. Общие сведения о железобетоне. Составные части железобетона. Механич. свойства железобетона. Нормы и технические условия для железобетонных сооружений. Производство работ. М. 1927 г. Изд. 2-е. 160 стр. 135 рис. Ц. 2 р. 50 к.

Лахтин Н. К., проф. и **Кашкаров Н. А.**, проф. Железобетон. Ч. II. Расчет элементов железобетонных конструкций. Осевое сжатие и растяжение. Изгиб. Внецентренное сжатие и растяжение. Скручивание. М. 1926 г. Изд. 2-е. 120 стр. 84 рис. Ц. 2 р. 30 к. Госуд. Учен. Сов. допущено в качестве пособия для ВУЗ'ов.

НТБ
ДНУЗТ

Лахтин Н. К., проф. и Кашкаров Н. А., проф. Железобетон. Ч. III. Основания расчета железобетонных сооружений. Железобетонные плиты с перекрестной арматурой. Безбалочные покрытия. Неразрезные балки. Рамные конструкции. Железобетонные своды. Действия внешних сил на плиты и балки. Резервуары, водонапорные башни и силоса. Дымовые трубы. Железобетонное судостроение. Примеры расчета. М. 1926 г. Изд. 2-е. 132 стр. 99 рис. Ц. 2 р. Госуд. Учен. Сов. допущено в качестве пособия для ВТУЗ'ов.

Падлер Г., инж. Расчеты по железобетону. Практическое руководство. С 45 подробно разраб. примерами расчета, 41 табл. и 79 черт. Пер. с нем. инж. С. М. Сурис и С. Е. Фрид, М. 1927 г. 184 стр. Ц. 2 р. 85 к.

Передерий Г. П., проф. Курс железобетонных мостов. М. 1925 г. Изд. 3-е. 520 стр. 625 рис. Ц. 6 р. 50 к.

Подольский И. С., проф. Расчет железобетонных конструкций. Сборник примеров расчета и таблиц. М. 1928 г. 144 стр. 62 рис. Ц. 2 р. 20 к., в папке 2 р. 60 к.

Потоцкий М. И., инж. Сельское водоснабжение. Пособие для инженеров, техников, агрономов, студентов и врачей. М. 1925 г. Изд. 2-е. 40 стр. 19 рис. Ц. 65 к.

Спецлер Р. О., инж. и Меле Г., архит. Контроль над возведением сооружений из литого бетона. Карманный справочник для строителей. Пер. с нем. под ред. проф. В. М. Келдыша. М. 1929 г. 64 стр. 32 рис. Ц. 45 к.

Стрелецкий Н. С., проф. Разводные мосты. Основы проектировки и расчета. М. 1924 г. 312 стр. 201 рис. и атлас на 14 листах. Ц. 5 р. 50 к.

Шахнер Р., проф. Санитарная техника в жилищном строительстве. Вентиляция и отопление. Водоснабжение. Канализация. Электрическое и газовое оборудование. Снабжение горячей водой. Предохранение зданий от сырости. Тепловая и звуковая изоляция. Пособие для строителей и учащихся. Пер. с нем. инж. И. П. Шепелева. М. 1929 г. 276 стр. 207 рис. Ц. 3 р. 20 к.

Щекин П. А., инж. Практическое иллюстрированное урочное положение. Пособие-справочник при составлении и проверке смет и исполнении работ по постройке каменных, деревянных и смешанных зданий и ремонту их. М. 1925 г. 408 стр. 445 рис. Ц. в папке 7 р. 50 к.

Эйгель Е. М., инж. п. е. Теория движения речных потоков Креутера и ее применение в технике. Пособие для инженеров, техников и студентов при проектировании гидротехнических сооружений. Под ред. проф. Ф. Е. Максимова. М. 1926 г. 76 стр. 36 рис. Ц. 1 р. 50 к.

Металлическая промышленность.

Барт Фр., инж. Детали машин. Пер. с нем. М. 1928 г. 184 стр. 111 рис. Ц. 70 к.

Беер Г., инж. и Гольке М., инж. Шариковые и роликовые подшипники. Пер. с нем. инж. Д. Овчининского и В. Коновалова. М. 1929 г. 136 стр. 250 рис. Ц. 2 р.

Берлов М. Н., проф. Детали машин. Сокращенное руководство по расчету и проектированию. Для технич. учебн. завед., техников и механиков. Расчеты с пояснительными примерами, с 283 рис. в тексте и 30 табл. конструкт. чертежей в отдельн. атласе. Ч. I—Текст. Ч. II.—Атлас. М. 1929 г. Изд. 2-е. 352 стр. Ц. с атласом 5 р. 50 к.

Берлов М. Н., проф. Детали машин. Вып. II. Клепка балок и колонн. М. 1922 г. 69 стр. 71 рис. Ц. 2 р. 50 к. Атлас на 15 табл. Ц. 1 р.

Берлов М. Н., проф. Детали машин. Вып. III. Клепка и сварка резервуаров и котлов. Руководство по расчету и проектированию деталей машин. Расчеты с пояснительными примерами и 20 табл. конструктивн. чертежей, исполн. в красках в отд. атласе. Для студентов ВТУЗ'ов, слушателей техникумов, техников, механиков и инженеров. М. 1928 г. 80 стр. Ц. с атласом 3 р. 65 к. в папке 4 р. 05 к.

Берлов М. Н., проф. Детали машин. Вып. IX. Подъемники. Руководство по расчету и проектированию деталей машин. Для студентов, техников, механиков и инженеров. Расчеты с пояснительными примерами, многочислен. фигур. и таблиц. конструктивных черт., в отдельн. атласе 24 табл. М. 1929 г. 208 стр., 304 рис. Ц. с атласом 7 р. 50 к.

Бурдаков А. А., проф. Из практики с центробежными насосами. М. 1923 г. 110 стр. 103 рис. 12 табл. Ц. 1 р. 70 к.

Бурдаков А. А., проф. Поршневые компрессора. Руководство при проектировании и изучении компрессоров для студентов, инженеров и техников. М. 1928 г. 60 стр. 67 рис. 10 табл. черт. Ц. 1 р. 50 к.

Гавриленко А. П., проф. Механическая технология металлов. Ч. IV. Обработка металлов резанием на станках: токарных, строгальных, сверлильных, фрезовых, шлифовальных; приготовление инструментов. Вып. I. О резании металлов. Мерительные и проверочные инструменты. В обработке проф. Н. Ф. Чарновского и под ред. Н. А. Мартынова. М. 1925 г. Изд. 2-е. 80 стр. 105 рис. Ц. 1 р. 20 к.

Гавриленко А. П., проф. Механическая технология металлов. Ч. IV. Вып. II. Работа на токарных станках и самоточках. В обработке проф. Н. Ф. Чарновского и под ред. Н. А. Мартынова. М. 1925 г. Изд. 2-е. 96 стр. 209 рис. Ц. 1 р. 60 к.

Гавриленко А. П., проф. Механическая технология металлов. Ч. IV. Вып. III. Работа на станках: токарных, строгальных, сверлильных, фрезовых и шлифовальных; приготовление инструментов, добавление. В обработке проф. Н. Ф. Чарновского и под ред. Н. А. Мартынова. М. 1926 г. Изд. 2-е. 440 стр. 548 рис. Ц. 5 р. 70 к.

НТБ
ДНУЗТ

ВИДМАР МИЛАН, проф.

(Milan Vidmar).

19-31/11 - Зор. Крашчи
в боротьби за удобство



ТРАНСФОРМАТОР В ЭКСПЛОАТАЦИИ.

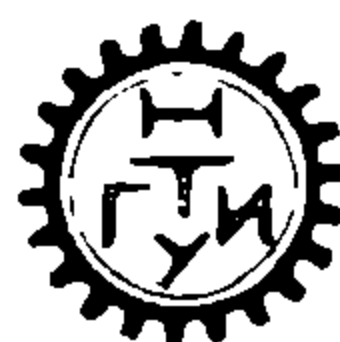
(Der Transformator im Betrieb).

Перевод с немецкого инж. Я. М. БРИЛЬ,
под редакцией инж. Е. В. НИТУСОВА.

с 126 ФИГУРАМИ В ТЕКСТЕ.

865808

НАЧ. ПИЛ. Т. Е.



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО.

Москва.

НТБ
ДНУЗТ

Просьба присылать Ваш отзыв
об этой книге по адресу: Москва,
Центр, Ильинка, Юшков пер., 4,
Гостехиздат (отзыв).



ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ.

Курс эксплуатации трансформаторов, изложенный в настоящей книге талантливым электротехником Запада Миланом Видмар имеет большое значение также для русской электропромышленности и для электрификации нашей страны. Существует, однако, ряд вопросов, которые остаются без надлежащего рассмотрения в существующих электротехнических руководствах, так как в них главным образом излагаются в отдельности или теория и построение трансформатора как такового, или расчет и устройство электрических сетей и линий передач, или, наконец, построение электрических станций—сами по себе очень обширные области электротехники.

Такое положение вещей весьма часто создает между техническими представителями электропромышленности и электростроительства стену взаимного непонимания и недоверия. Выход находится обыкновенно каким-либо формальным путем.

Поэтому, приняв на себя редакцию перевода, я полагаю, что автор этим трудом положил важное начало и что подобные курсы будут в недалеком будущем созданы и для других элементов электротехнических устройств.

К сожалению ни мне, ни переводчику не представилось возможности обратиться к автору с просьбой дополнить свою книгу для русских читателей рассмотрением немногих незатронутых в ней эксплуатационных вопросов, как, например, приготовление масла и заполнение им бака трансформатора.

Инж. *Е. Нитусов.*

ВВЕДЕНИЕ.

1. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПРОБЛЕМА. ОБЗОР ГЛАВНОЙ ПРОБЛЕМЫ УЧЕНИЯ ОБ ЭКСПЛУАТАЦИИ.

В настоящее время трансформаторостроение является весьма обширной областью, тонкости которой привлекают внимание специалистов-конструкторов. Не представляется возможным, да и нет большой необходимости в том, чтобы эксплуатационный инженер имел полное представление о конструкции трансформаторов, даже и в том случае, если он с ним постоянно сталкивается в эксплуатации. Но имеется ряд эксплуатационных проблем трансформаторостроения, которыми эксплуатационный инженер безусловно должен заняться. Для него трансформатор не является чем-то заранее заданным, со свойствами и особенностями чего ему необходимо примириться; он может и должен высказывать пожелания, выдвигать требования, которые безусловно должны быть учтены.

В действительности, для каждого конкретного случая в эксплуатации выбор трансформатора не так прост. Часто нелегко бывает выбрать нужный трансформатор даже при наличии многих предложений от заводов. Правильное обращение с трансформатором в эксплуатации также труднее, чем это может казаться.

В последние годы экономические соображения способствовали усилению влияния эксплуатационного инженера на развитие трансформаторостроения.

Все чаще и чаще конструктору трансформаторов приходится совещаться с эксплуатационным инженером, но все же между ними не всегда наблюдается взаимное понимание трудностей и вынужденных отступлений, при этом весьма часто необоснованно уступает конструктор в ущерб электрическому хозяйству.

Если эксплуатационный инженер действительно знаком с трансформатором и изучает физические явления, встречающиеся в эксплуатации, то следует думать, что он будет стремиться к правильному пути развития трансформаторостроения и что он лучше кого бы то ни было понимает экономически-конструктивную проблему трансформатора.

Нельзя легкомысленно отделаться требованием наименьших расходов при наилучшей конструкции. Наиболее дешевый трансформатор, даже при безукоризненной конструкции, причиняет в эксплуатации немало расходов. Конструкция с лучшим коэффициентом полезного действия отнюдь не является наилучшей. Здесь вещи представляются не в такой простой зависимости.

НТБ
ДНУЗТ

Конечно, эксплуатационный инженер, которому предстоит покупка трансформатора, стремится к более дешевой конструкции. Но он должен давать себе отчет в своих действиях. Он должен иметь представление о том, каким образом можно идти вообще к удешевлению конструкции. Каждое достижение требует жертв, и эти жертвы следует изучить.

Эксплуатационный инженер стремится также к малым потерям, в особенности к малым потерям холостого хода. Он хотя и имеет приблизительное представление о необходимых при этом жертвах, но в точности их не знает. Правильно ли он их оценивает? Всегда ли он знает, какие требования он предъявляет конструктору?

Мы видим, что подобных вопросов много. Поставленные эксплуатацией, они разрешаются на конструкторском столе. Они затрагивают область трансформаторостроения и не должны оставлять равнодушным к ним эксплуатационного инженера. Они требуют от последнего полного внимания и углубленного изучения.

В сущности, следует удивляться тому факту, что в настоящее время, после десятков лет основательной, полной успеха деятельности в области трансформаторостроения, именно эксплуатационная проблема недостаточно разрешена. Конструктор давно уже имеет дело с тонкостями, борется за незначительные проценты, тогда как эксплуатационный инженер и по сию пору не перестает расточать крупные ценности. Какая польза в маленьких экономиях при изготовлении, если при установке трансформатора бесполезно расходуются материал и энергия? В чем смысл экономии при закупке трансформатора, если тип недостаточно тщательно выбран?

Здесь должно помочь эксплуатационное изучение трансформатора. Задачи этого изучения ясно предначертаны, и его подразделения легко установимы. Оно должно в первую очередь охватить проблему покупной цены и коэффициента полезного действия трансформатора, оно должно в первую очередь показать зависимость между ценой и электрическими качествами трансформатора. Оно должно внимательнее присмотреться к стоимости трансформации. Покупная цена не является единственной тяжестью; должны быть учтены и потери энергии в трансформаторе. При этом потери при холостом ходе и потери в меди должны быть экономически оценены по разному.

Проблема потерь холостого хода, пожалуй, самая существенная, самая трудная в эксплуатационном учении о трансформаторостроении. Эта проблема должна занять определенное место в рамках нашего изучения вопроса. Как конструктора, так и эксплуатационного инженера она интересует в одинаковой мере.

Из упомянутой проблемы вытекает проблема осветительного трансформатора. Вместе с этим выплывают существенные вопросы об отведении тепла; кроме того, при рассмотрении осветительного трансформатора должен быть затронут ряд вопросов (разумеется, частично давно решенных), так как они весьма существенны для эксплуатационного инженера.

Проблема о напряжении и перенапряжении образует следующую главу учения о трансформаторостроении, из чисто электрических глав, пожалуй, самую существенную. Эти главы частично выпадают из рамок учения о трансформаторостроении. Однако они должны быть включены в учение об эксплуатации.

Большая проблема об отведении тепла не является исключительно частью учения о трансформаторостроении; она принадлежит также и к учению об эксплуатации. Главными виновниками того, что эксплуатационный инженер занят вопросами отведения тепла, являются мощные трансформаторы. Ему предоставлен выбор между естественным и искусственным охлаждением. Он должен самым точным образом взвесить преимущества и недостатки различных конструкций. Малые трансформаторы в эксплуатации также имеют свою проблему отведения тепла. Правильные размеры трансформаторного помещения являются важной эксплуатационной проблемой.

Если, наконец, в качестве эксплуатационной проблемы будет разрешен вопрос о возможных электрических измерениях при эксплуатации, чем эксплуатационному инженеру будет облегчена возможность постоянного наблюдения за работающим трансформатором, то этим самым эксплуатационное учение о трансформаторостроении можно считать законченным. Нет, конечно, сомнения в том, что эта проблема до конца этим не исчерпывается.

1. Цена и коэффициент полезного действия трансформатора.

2. ЦЕНА ТРАНСФОРМАТОРА.

Мы непрестанно изыскиваем пути и средства к удешевлению трансформации электрической энергии. Эта существенная проблема эксплуатационного инженера переносится частично и в область деятельности конструктора трансформаторов. Амортизация и проценты на затраченный при построении трансформатора капитал не составляют незначительную часть общих расходов по трансформации. Поэтому конструктор должен заботиться об удешевлении своей конструкции.

Если проблема цены трансформатора образует ту существенную связь, которая объединяет эксплуатационного инженера и конструктора, то трансформаторостроение от этого только выигрывает.

Проблема цены является подгоняющей, никогда не ослабевающей силой, неисчерпаемой проблемой, вновь оживающей после каждого достигнутого решения ее.

Сравнение цен, без которого немислима правильная работа, должно, естественно, базироваться на прочном фундаменте. Здесь-то и начинается расхождение между эксплуатационным инженером и конструктором. Эксплуатационного инженера интересуют покупные цены, отнесенные к одному киловатту мощности трансформатора, и если это зависело бы от него, эта мера сравнения и была бы положена в основу. Но эта мера не предусматривает величину машины, сосредоточение мощности, и рассматривает преобразование большего или меньшего количества энергии одним трансформатором как конструктивное правило, случайно приводящее к понижению первоначальной стоимости.

Конструктор должен настаивать на сравнении трансформаторов только одинаковых мощностей. Он может и должен доказать, что цена, отнесенная к единице мощности, что покупная цена за каждый киловатт мощности трансформатора зависит от самой мощности.

Учение об эксплуатации должно шагнуть еще дальше. Оно должно установить, как будет меняться цена трансформатора на каждый киловатт своей мощности, если эта мощность растет. Тогда только, собственно, и мыслимо сравнение трансформаторов различных мощностей. Кроме того, тогда только разрешается практически важная проблема, возникающая в каждой трансформаторной установке, а именно, проблема о том, сосредоточить ли необходимую мощность в одном трансформаторе или распределить ее между несколькими меньшими.

За установку одного трансформатора потребной мощности говорит в первую очередь вопрос места. Часто этот вопрос является решающим. Очень часто имеется в наличии место, едва достаточное для одного трансформатора, а пристройка нового трансформаторного помещения невозможна.

Против установки одного трансформатора говорит много эксплуатационных соображений. Стремление к бесперебойной работе требует, если не полное, то хотя бы наличие половинного резерва трансформаторов. Меняющаяся нагрузка требует дробления большой мощности для того, чтобы имелись налицо лишь самые неизбежные потери холостого хода. Большей частью бывает необходимо в смешанных производствах переключить световую нагрузку на отдельный осветительный трансформатор.

Вопрос об эксплуатационных резервах имел глубочайшее влияние на трансформаторостроение. Он повел к тому, что американское трансформаторостроение стало предпочитать однофазные типы.

Нелишне несколько остановиться на этом факте.

Существуют трансформаторные станции, к которым предъявляются требования безусловно надежной работы. Длинные линии, питающие города, заканчиваются подстанциями, снабженными полными резервами трансформаторов. Здесь вопрос о полных резервах ничего общего не имеет с выдвинутым выше вопросом о разделении (дроблении) мощности. Если к большому трансформатору, преобразующему полную мощность, передаваемую длинной линией, присоединим такой же трансформатор, то этим самым мы отнюдь не разрешаем проблемы разделения мощности. Здесь налицо лишь обманчивое сходство.

Американское трансформаторостроение считает, что из трех однофазных трансформаторов один может быть почему-либо поврежден. Соответственно этому к трем однофазным трансформаторам устанавливается четвертый в качестве резервного. В Европе в качестве резерва устанавливают второй трехфазный трансформатор, рассчитанный на полную мощность. Что дешевле? Вопрос о том, следует ли полную мощность разделить на три однофазные мощности для получения более легкого резерва, несомненно является вопросом о разделении мощности.

Во многих случаях довольствуются половинным резервом и легко достигают это установкой двух трансформаторов с половинной мощностью каждый вместо одного трансформатора на полную мощность. Мысль о том, что в одном случае при аварии приостановится все производство, а в другом лишь половина — побуждает к дроблению мощности.

Понятно также, что на разделении мощности придется остановиться и в том случае, когда потребление энергии снабжаемого района возрастает все больше и больше, и лишь по прошествии известного числа лет предвидится полное использование предусмотренной максимальной мощности. В этом случае трансформаторные будки станции заполняются постепенно трансформаторами. В результате мы имеем перед собою паглядную картину установки с разделенной мощностью.

Для освещения должны быть установлены отдельные трансформаторы из различных соображений. Осветительный ток дорог. Кроме того, желательно охранить осветительную сеть от непосредственных толчков силовой нагрузки. Наконец, совершенно нецелесообразно нагружать мощный фабричный трансформатор по окончании работы лишь несколькими лампами.

Проблема о том, следует ли разделить потребную мощность, нужно ли установить один или несколько трансформаторов, этим не исчерпывается. Необходим подсчет. Необходимо установить, во что обойдется это разделение мощности.

3. ЗАВИСИМОСТЬ ЦЕНЫ ОТ МОЩНОСТИ. ЗАКОНЫ РОСТА.

Вообще говоря мощный трансформатор является решением вопроса о цене. Целесообразность мощного трансформатора как попытки все более сосредоточить мощность — может быть представлена весьма простым подсчетом.

Исходя из какого-либо данного трансформатора и увеличивая все его размеры в одинаковом отношении (при условии сохранения неизменными электрических и магнитных нагрузок, т.-е. плотности тока в меди и индукции в железе), мы можем достигнуть все более и более высоких мощностей. Произведение обоих «токов», электрического и магнитного, которому пропорционально напряжение трансформатора, дает, как известно, меру для преобразованной мощности. Эти оба «тока» со своей стороны равны порознь произведению поперечного сечения проводника или керна соответственно на плотность тока или индукцию. В ряде конструкций, полученных вышеуказанным образом, т.-е. при неизменности плотности тока и магнитной индукции, «тока» будут возрастать пропорционально квадрату линейных измерений трансформатора, мощность же — пропорционально их четвертой степени.

Не с такой быстротой возрастают веса. Они возрастают лишь пропорционально третьей степени линейных измерений, таким образом, вес, отнесенный к единице мощности, становится все меньше и меньше по мере повышения величины самой мощности. Он падает пропорционально корню четвертой степени из мощности.

Известно, что доля заработной платы в полной стоимости изготовления трансформатора относительно мала. Это происходит с одной стороны оттого, что в трансформаторе отсутствуют движущиеся друг относительно друга части, обычно удорожающие в машиностроении килограмм готового изделия, а с другой стороны из за высоких цен на обрабатываемый материал: на медь и листы легированного железа. Таким образом, мы сделаем относительно небольшую ошибку, если допустим пропорциональность между ценой трансформатора и его весом.

Это упрощающее представление с учетом вышеупомянутых соображений приводит нас к выводу, что цена трансформатора растет пропорционально третьей степени линейных размеров его, что вместе с этим цена, отнесенная к единице мощности, т. е. цена одного киловатта становится тем меньше, чем мощнее трансформатор. Она падает пропорционально корню четвертой степени от мощности.

Сосредоточение мощности как решение проблемы цены знакомо нам и из других отраслей машиностроения. Построение мощных машин, крупных агрегатов является той областью техники, в которой предъявляются большие требования к творческим силам конструктора. Неправильно думать, будто установление факта, что мощный трансформатор, отнесенный к единице мощности, дешевле малого — исчерпывает целиком проблему. Наоборот, это дает нам только указание и является лишь одним решением эксплуатационной проблемы. Мощный трансформатор, в действительности, приносит с собой новые технические вопросы, растущие одновременно с его мощностью и создаю-

щие новые затруднения. Мы часто строим, не учитывая многих обстоятельств, и затем лишь с трудом справляемся с нашими же конструкциями.

Особенно существен вопрос об отведении тепла, так как он нарушает вышеупомянутые законы роста. Наружная поверхность трансформатора, отводящая рабочую теплоту, растет очевидно пропорционально второй степени линейных размеров, потери же в железе и в меди, также как и веса — третьей степени. Отдаваемое количество теплоты становится, следовательно, все больше с возрастающей мощностью, что вынуждает нас менять конструкцию и переходить от воздушного охлаждения к масляному, от масляного к водяному. На установленные выше законы роста можно положиться только в том случае, если не изменялась охлаждающая среда. Увеличение охлаждения ведет, большей частью, к возможности повышения электромагнитных нагрузок.

Закон стоимости трансформатора после всего сказанного можно свести к очень простой и легко используемой форме. Он гласит:

В ряде трансформаторов одного и того же типа с одним и тем же способом охлаждения, цена одного киловатта обратно пропорциональна корню четвертой степени из мощности.

На числовом примере мы можем легко исследовать результаты, получаемые от объединения больших мощностей.

Пусть например 100 kW трансформатор с естественным охлаждением стоит 20 м/kW, тогда стоимость киловатта у трансформатора в 10 000 kW с таким же охлаждением будут приблизительно

$$\sqrt[4]{\frac{20}{\frac{10\,000}{100}}} = 6,3 \text{ м/kW.}$$

Это безусловно колоссальное удешевление трансформации.

Числовой пример бросает яркий свет на проблему цены и показывает одновременно и большие преимущества подобного метода подсчета. Целесообразно, следовательно, убедиться в том, насколько этот метод надежен и единственно ли вопрос об отведении тепла определяет типовые ряды трансформаторов.

Мощный трансформатор не может быть создан простым увеличением размеров (даже оставляя в стороне вопрос о трудностях охлаждения). В типовом ряде, как мы в этом сможем убедиться неоднократно в процессе наших исследований, непрерывно нарушается равновесие между главными свойствами трансформатора. Например 100 kW-й трансформатор, увеличенный в три раза, был бы неправильной конструкцией. Но необходимые внутренние преобразования не затрагивают существа намеченного закона; они являются внутренними правилами. Безразлично, например, на много ли или на мало частей разделено медное кольцо, окружающее железный сердечник, требуется лишь, чтобы оно в нужном пространстве уместилось. На вес меди это не имеет никакого влияния, также как и на цену, хотя напряжение между витками при этом может измениться. Таким образом законы роста, и в первую очередь закон цен, мы можем рассматривать как опорные точки для нашего учения об эксплуатации трансформатора. Они являются чрезвычайно существенным расчетным инструментом для дальнейших исследований.

НТБ
ДНУЗТ

4. ЧИСЛОВЫЕ ПРИМЕРЫ.

Применим полученные законы на некоторых числовых примерах. В первую очередь, безусловно важно практически выяснить, как может эксплуатационный инженер подойти к вопросу в том случае, если ему известна цена трансформатора для какой-либо определенной мощности и он желает подсчитать цену трансформатора такой же конструкции, но другой мощности.

Трансформатор с масляным охлаждением мощностью в 100 kW, 10 000 V со стороны высокого напряжения и 50 периодов стоит 2 000 марок. Какова цена трансформатора на 400 kW, 10 000 V, 50 периодов?

Мощность растет пропорционально четвертой степени линейных измерений, веса — третьей степени, также как и цена. Следовательно, цена должна возрастать пропорционально $\frac{3}{4}$ -й степени от мощности. Значит трансформатор в 400 kW будет стоить

$$2\,000 \cdot \left(\frac{400}{100}\right)^{3/4} = 5\,640 \text{ марок}$$

и будет в

$$\left(\frac{400}{100}\right)^{3/4} = 2,82 \text{ раза}$$

тяжелее 100 kW трансформатора.

Устранением одного ядра и соответствующей части ярма в трехфазном трансформаторе можно превратить его в однофазный, дающий две трети мощности и стоящий на одну треть дешевле трехфазного трансформатора, из которого он образован. Таким образом, однофазный трансформатор будет стоить в

$$\frac{2}{3} \left(\frac{3}{2}\right)^{3/4} = \left(\frac{2}{3}\right)^{1/4} \text{ раз}$$

больше трехфазного трансформатора. Действительно, известно, что при одинаковой мощности однофазные типы дешевле трехфазных.

Можно сравнить теперь американские резервы трансформаторов с европейскими. С одной стороны имеются 4 однофазных трансформатора по одной трети от полной мощности каждый, с другой стороны — 2 трехфазных трансформатора на полную мощность каждый.

Отношение покупных цен здесь следующее:

$$\frac{4 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{1/4}}{2 \cdot 3^{3/4}} = 0,8.$$

Американский резерв значительно дешевле, но европейский имеет большой запас. В этой разнице в цене скрывается и различие двух мировоззрений.

Сколько стоит половина резерва? Два трансформатора, каждый на половинную мощность в

$$2 \left(\frac{1}{2}\right)^{3/4} = 1 = 2^{1/4} = 1,19 \text{ раз,}$$

т.-е. около 20% дороже трансформатора на полную мощность. Дополнительные расходы сказываются, конечно, и в оборудовании трансформаторной станции и строительных расходах по устройству трансформаторной будки.

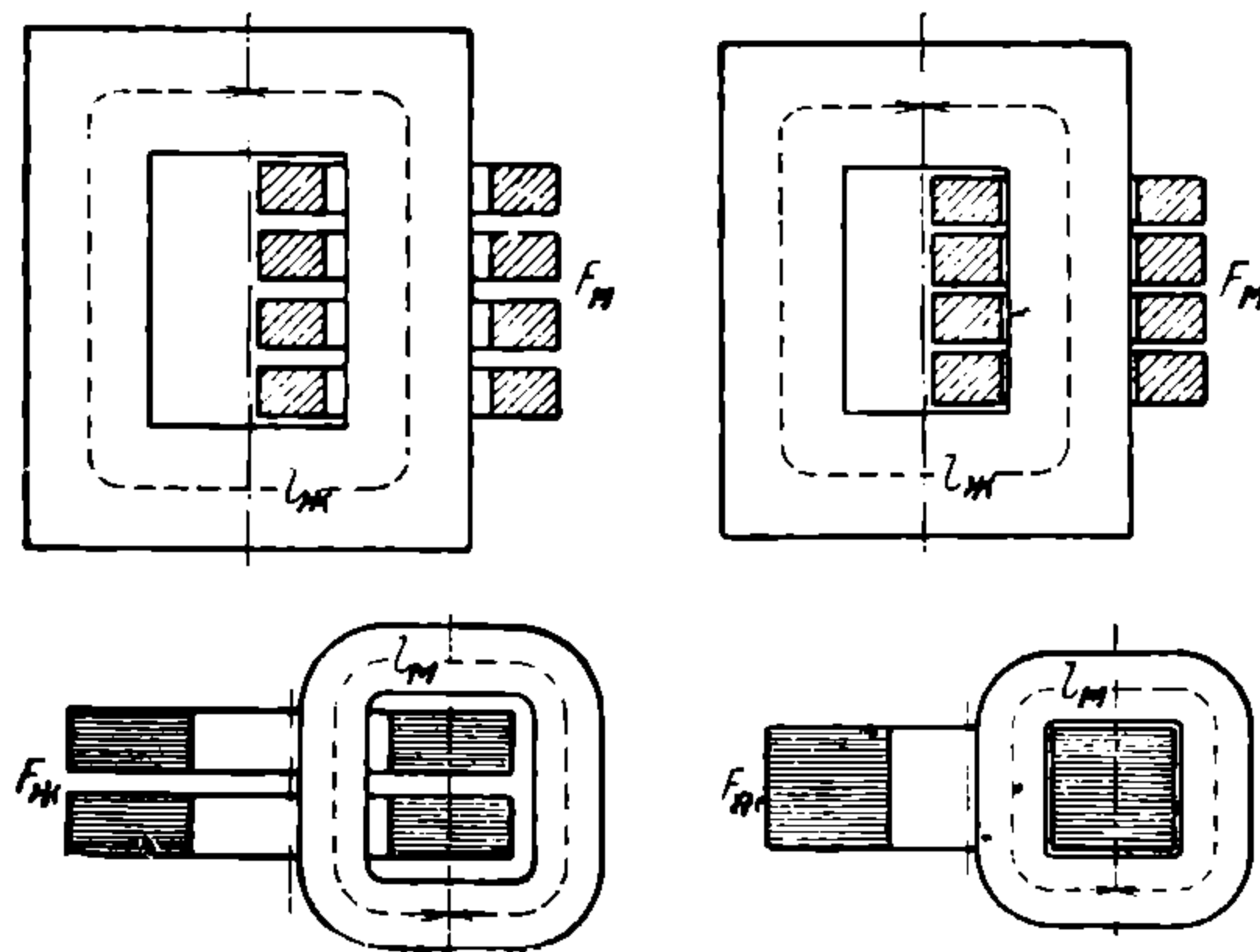
НТБ
ДНУЗТ

5. ЗАВИСИМОСТЬ ЦЕНЫ ОТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЖЕЛЕЗЕ И МЕДИ.

Мощный трансформатор, несмотря на свои преимущества, является лишь условным решением вопроса, пригодным только в случаях, допускающих большое сконцентрирование энергии. Но в то же время он не является решением особой существенной проблемы об удешевлении трансформатора данной мощности, так как он сам является объектом этой проблемы. Мы вынуждены поэтому искать другие способы, ведущие к общим всегда пригодным решениям.

Очевидно и здесь отсутствует абсолютный ответ на вопрос о цене. Каждая новая, сколь угодно дешевая конструкция требует от нас еще большего удешевления. И здесь имеются пути, которые могут быть рассматриваемы как правильное решение вопроса. Эти пути мы попытаемся найти.

Как мы уже успели убедиться, трансформатор данной мощности дешевле других, если у него находится под нагрузкой меньшее количество рабочего материала, меди и железа. Так как заработная плата



Фиг. 1.

не может быть значительно снижена, а неактивная часть конструкции трансформатора сказывается весьма незначительно, то главная экономия будет сказываться на снижении расходов на рабочий материал. И действительно, главным устремлением новейшего трансформаторостроения является использование возможно меньших количеств меди и железа.

Вес потребляемого рабочего материала зависит от многих факторов. В первую очередь, нетрудно убедиться в том, что громадную роль играет расположение железных и медных масс. Объемы обоих друг друга взаимно облегчающих металлических колец, пропорциональные весам, определяются как произведение поперечного сечения $F_{ж}$ или $F_{м}$ на соответствующие длины $l_{ж}$ или $l_{м}$ (фиг. 1). В интересующей нас сумме

$$F_{м} l_{м} + F_{ж} l_{ж}$$

известны лишь поперечные сечения, если даны плотность тока (и индукция), а также правильное отношение количества потребляемой меди к количеству потребляемого железа. Длины же $l_{ж}$ и $l_{м}$ зависят от геометрических форм установки. Ясно, что длины будут тем меньше, чем меньше периметр поперечного сечения кольца, чем компактнее расположен материал.

АНТБ
ДНУЗТ

Отсюда следует, что первым и простейшим принципом экономии является чисто геометрический принцип. Он всегда применим там, где отпадает необходимость в свободном, раздельном расположении материала. Но в новейших конструкциях большей частью замечается тенденция к устройству в меди и железе возможно большего числа охлаждающих каналов, т.е. тенденция обратная экономии в геометрических размерах. Попытки уменьшения веса рабочего материала мы вынуждены поэтому направить, за отсутствием другой возможности, в сторону уменьшения сечений потоков $F_{ж}$ и $F_{м}$.

Это отныне установленное правило ведет нас к тому, чтобы установить зависимость весов рабочего материала — меди и железа — от электромагнитных нагрузок

i — плотности тока (A/mm^2)

и B — магнитной индукции (инд. лин/ cm^2).

Уменьшение сечения меди $F_{м}$ требует увеличения плотности тока i , также как и уменьшение поперечного сечения железа $F_{ж}$ ведет к увеличению магнитной индукции B , в том случае, если мы хотим оставить неизменной величину мощности, или, иначе говоря, произведения обоих потоков $F_{м} \cdot i$ и $F_{ж} B$. С точки зрения чисто геометрической экономии это повышение не обязательно, так как поперечные сечения потоков не меняются.

Обе установленные возможности ограничения в расходовании дорого стоящих материалов — возможности с которыми эксплуатационный инженер должен быть знаком — не являются равноценными. Ясно, без сомнения, что наиболее выгодное геометрическое расположение устанавливает абсолютную границу, по ту сторону которой дальнейшая «геометрическая экономия» немислима. Удешевление трансформатора путем повышения его нагрузок не имеет ни теоретических, ни практических границ. Находчивость конструктора способствует все большему увеличению плотностей тока и, следовательно, понижению цены трансформатора. Корень проблемы — в изнашивании материала.

Величина электромагнитных нагрузок железа и меди, влияющая, как мы успели в этом убедиться, существенно на цену трансформатора, имеет, с другой стороны, значение и для потери энергии в рабочем материале и тем самым влияет на коэффициент полезного действия трансформатора. Таким образом, проблема цены и коэффициента полезного действия приобретают внутреннюю взаимную связь и совместное рассмотрение их становится неизбежным.

Известно, что потери в меди $V_{м}$ пропорциональны весу $G_{м}$ (kg) меди и квадрату плотности тока i . С учетом нагревания и добавочных потерь можно для практических подсчетов принять формулу

$$V_{м} = 2,5 G_{м} \cdot i^2 W \quad (1)$$

Эта формула будет менее точна для расчета потерь в железе в случае, если проведем, простоты ради, аналогию и будем считать потери в железе $V_{ж}$ пропорциональными произведению его веса $G_{ж}$ на квадрат индукции B . Но, принимая во внимание, что новейшее трансформаторостроение имеет дело с большими индукциями, увеличивающими потери на вихревые токи и что, кроме того, намечаемый закон охватывает лишь ограниченную область магнитных индукций, можно написать формулу

$$V_{ж} = 1,8 G_{ж} \left(\frac{B}{10^4} \right)^2 W \quad (2)$$

Эту формулу можно считать вполне применимой для высоколегированного железного листа при 50 периодах. Она учитывает также и добавочные вихревые токи, возникающие вследствие обработки железа.

Короче говоря, можно принять потерю энергии в трансформаторе пропорциональной весу и квадрату его нагрузки.

Прибегая к помощи этого единственного, дающего большие преимущества, правила и повышая соответственно плотность тока или магнитную индукцию в целях удешевления конструкции, конструктор этим самым изменяет и потери энергии.

Поперечное сечение железа при данном магнитном потоке обратно пропорционально магнитной индукции, также как и поперечное сечение медного кольца обратно пропорционально плотности тока в том случае, если в соответствии с заданной мощностью задан и суммарный ток в обмотках. Если не удастся, как это почти всегда и бывает, одновременно соответственно уменьшить сечения и длины обоих металлических колец, то потери энергии растут.

Нельзя не отметить ухудшения в новейших трансформаторах с точки зрения электрической экономичности. Мы делаем для этого все возможное. Мы строим трансформаторы возможно хуже и единственным удерживающим нас в известных рамках является проблема нагревания.

Необходимая связь между электрическим ухудшением и падением цены трансформатора обеспечивается проблемой коэффициента полезного действия. Не всякое удешевление трансформатора оправдывается в эксплуатации, ибо выгода от малой покупной цены может легко раствориться в расходах на большие потери энергии. Проблема коэффициента полезного действия является не только контролем для деятельности конструктора. Она является чисто эксплуатационной проблемой, дающей возможность эксплуатационному инженеру решать вопросы о вновь возникающих конструкциях и иметь правильное суждение о поступающих предложениях.

6. НЕЕСТЕСТВЕННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ.

Обе расчетные формулы для потерь в железе и меди вместе с уже найденным законом роста должны расширить кругозор эксплуатационного инженера при рассмотрении типового ряда трансформаторов. В действительности, и для потерь нетрудно установить весьма простые законы роста.

Если в типовом ряде веса, как мы уже видели, растут пропорционально $\frac{3}{4}$ степени от мощности, при чем электромагнитные нагрузки остаются неизменными, то и потери будут расти пропорционально $\frac{3}{4}$ степени от мощности. Потери, отнесенные к единице мощности, будут падать пропорционально корню четвертой степени от мощности.

Вернемся к примеру из параграфа 3 и примем, что 100 kW-й трансформатор дает потери в 3,1%, тогда для 10 000 kW-го типа имеем

$$3,1 \sqrt[4]{\frac{100}{10\,000}} = 1\% \text{ потерь.}$$

Трансформатор большой мощности является шагом вперед, следовательно, он выгоден при покупке его, он выгоден также и в эксплоа-

тации, в обоих случаях в одинаковой мере. Действительность вполне подтверждает это.

Числовые примеры параграфа 4 можно расширить учетом потерь. Нетрудно убедиться, что каждой разнице в цене противостоит относительно равная разница в потерях. Подсчитанная сумма разниц в ценах приобретает более общий характер, так как она учитывает и издержки в эксплуатации, поскольку последние возникают вследствие потерь энергии.

Небезинтересной попутной проблемой для эксплуатационного инженера является вопрос о зависимости цены трансформатора данной конструкции от коэффициента полезного действия, т.-е. случай неестественного коэффициента полезного действия. Нередки случаи, когда эксплуатационный инженер задает коэффициент полезного действия и, конечно, более высокий, чем предлагаемый им продавцом. Более низкого достигнуть, конечно, нельзя, не сменив способа охлаждения.

Рассмотрим здесь сначала только вопрос о желательном понижении суммарных потерь. Этот вопрос особенно существен для силовых трансформаторов. Вопрос о понижении одних только потерь холостого хода может быть разрешен позже.

Конструктор, не желая менять свой установленный типовой ряд, но, с другой стороны, стремясь к выполнению требования покупателя, прибегнет к единственному выходу. Он, просто говоря, выполнит конструкцию для большей мощности, т.-е. понизит электромагнитные нагрузки.

При помощи закона роста можно легко показать во что обойдется этот лучший неестественный коэффициент полезного действия. В ряде трансформаторов растут, как мы видели, веса и потери пропорционально $\frac{3}{4}$ степени мощности. Потери, выраженные в процентах, отнесенные к мощности, падают пропорционально корню четвертой степени от мощности, и неестественный коэффициент полезного действия устанавливается при мощности, находящейся в обратном отношении к предписанной, как четвертые степени нормальных и желательных потерь.

Если мы желаем иметь этот высокий коэффициент полезного действия при том же распределении потерь, главным образом при малой предписанной мощности, то необходимо взять больший трансформатор, имеющий этот коэффициент полезного действия при нормальной работе (конечно, при мощности, установленной выше). Если электромагнитные нагрузки понижают в такой мере, что большой трансформатор дает лишь предписанную мощность, то этим самым его коэффициент полезного действия не меняется, так как пропорционально уменьшились потери одновременно с уменьшением мощности.

Высокая цена трансформатора, конечно, осталась неизменной. Так как отношение цен двух трансформаторов одного типового ряда, как мы убедились, равно отношению $\frac{3}{4}$ степеней их мощностей, мощности же в данном случае находятся в обратной зависимости от четвертых степеней потерь, то трансформатор с неестественно высоким коэффициентом будет во столько раз дороже, во сколько третья степень нормальных потерь больше третьей степени потерь желательных.

Для ясности возьмем числовой пример. Пусть нормальный 100 kW-й трансформатор имеет коэффициент полезного действия = 97% и стоит 2 000 марок. Если окажется желательным допустить лишь

НТБ
ДНУЗТ

2% потерь вместо 3, то (поскольку окажется невозможным перейти к другой конструкции) придется израсходовать при тех же распределениях потерь.

$$2\,000 \left(\frac{3}{2}\right)^3 = 6\,750 \text{ марок.}$$

Отсюда следует, что неестественный коэффициент полезного действия обходится весьма дорого. Никому безусловно не вздумается выполнить указанное в нашем примере. Большая разница в цене требует издержек на амортизацию и уплату процентов по капиталу больших, чем стоимость сэкономленного киловатта. Этот пример вызывает еще целый ряд дальнейших размышлений. Почему ухудшение коэффициента полезного действия не связано в такой же мере с выгодами в цене, как улучшение его — с невыгодами? При желании получить неестественный коэффициент полезного действия нельзя ли попросту идти обратным, связанным с меньшей разницей в цене, путем, т.-е. вернуться к старой конструкции?

Ответ на эти два вопроса нетруден. Каждое усовершенствование, дающее возможность повысить потери, имеет своей предпосылкой какое-либо новое решение проблемы нагревания, какое-либо изобретение. Работа как техническая, так и умственная, концентрированная в каждом килограмме нового трансформатора, увеличилась. В технике в целом наблюдается явление сопутствующее усовершенствованиям, а именно, удорожание весовой единицы, частично вновь понижаемое новыми экономиями материала. Поэтому повышение потерь и увеличенное изнашивание материала не может дать те же разницы в ценах, что и расточительное расходование материала.

Возврат к старой, отмененной конструкции, дающей желательный коэффициент полезного действия дешевле, чем насильно к этому приспособленные нормальные типы, возврат этот, хотя и является лишь путем обратным прогрессу техники, тоже немислим. Он должен быть немислим потому, что каждый прогресс является безвозвратно пройденным путем, и всякая конструкция, от которой можно было бы с выгодой вернуться к старой, была бы неминуемо осуждена.

7. ЦЕНЫ ТРАНСФОРМАЦИИ. СУЖДЕНИЕ О ПРЕДЛОЖЕНИЯХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

Исследования предыдущих параграфов ясно показывают, что под давлением эксплуатационного инженера, желающего иметь дешевый трансформатор, под давлением бросающейся в глаза конкурентной борьбы между строителями трансформаторов коэффициент полезного действия трансформации непрерывно падает. Единовременный расход по изготовлению трансформатора становится все меньше и меньше, длительные же расходы по потреблению энергии растут.

Этот путь развития не только естественен, он неизбежен, он прекратится тогда, когда трансформаторостроение конструктивно и технологически полностью созреет. Но этот путь требует зоркого внимания, он не должен брать больше того, что дает; он таит в себе опасности, которые должны быть исследованы. Учение об эксплуатации должно им детально заняться; эксплуатационный инженер начинает отныне искать не просто дешевый, хороший трансформатор, а хорошую, дешевую трансформацию.

Экономическая картина очень проста и ясна. Трансформаторная станция стоит известную сумму. Здесь принимается во внимание только покупная цена трансформатора P марок. При регулярной эксплуатации следует отчислять амортизацию и уплату процентов на вложенный капитал. Если через μ обозначим амортизацию и уплату процентов на капитал в процентах, то купленный трансформатор ежегодно вызывает неизменные расходы

$$\frac{\mu \cdot P}{100} \text{ марок.}$$

Это еще не все издержки, вызываемые трансформатором. В эксплуатации он постоянно требует для себя энергию, которая должна быть как-то добыта и которая при известных обстоятельствах могла бы быть проданной. Эта энергия во многих случаях оплачивается точно так же, как и с действительной пользой израсходованная энергия.

При силовых трансформаторах, которыми мы сначала займемся, картина особенно ясна. Фабричное производство, напр., оборудованное силовым трансформатором, оплачивает полную потерю энергии нагруженного трансформатора.

Пусть трансформатор теряет V kW и пусть цена киловатт-года b марок, тогда ежегодно по вине трансформатора будем иметь издержки на трансформацию

$$b \cdot V \text{ марок.}$$

Суммарные издержки трансформатора обходятся ежегодно в

$$U = \frac{\mu \cdot P}{100} + bV \text{ марок.}$$

Пример. Небольшое фабричное производство требует 100 kW, по 8 часов ежедневно, и покупает энергию по 10 пфенниг за kW час. Установленный трансформатор дает 3% потерь и стоит 2 000 марок.

Если амортизация и проценты на капитал составляют 12,5%, а производство работает 300 дней в году, то имеем

$$\mu = 12,5\%$$

$$b = 8 \cdot 300 \cdot 0,1 = 240 \text{ марок/kW год.}$$

Согласно этому, трансформатор вызывает издержки ежегодно суммарно

$$U = \frac{12,5 \cdot 2\,000}{100} + 240 \cdot 3 = 250 + 720 = 970 \text{ марок.}$$

Числа примера, вообще говоря, не невозможные, подобраны так, что наглядно показывают насколько велики значения потерь в сравнении с покупной ценой. Они обращают наше сугубое внимание на то, что было бы более чем легкомысленно судить о трансформаторе только по его покупной цене.

Проведенный расчет показывает больше того. Он дает полную возможность эксплуатационному инженеру правильно выбрать трансформатор (правда, пока только силовой трансформатор). Какой смысл в исследовании того, какой из предложенных трансформаторов тяжелее? Что пользы в том, что в одной из конструкций окажется больше меди? Это даст через 15 лет больше медного лома, и в продолжение 15 лет будет вызывать большие расходы на большие потери.

НТБ
ДНУЗТ

Пример. Эксплуатационный инженер, получивший задание закупить трансформатор для вышеупомянутого фабричного производства, имеет перед собой два предложения. Первое включает в себе один 100-кВ трансформатор с 3% потерь по цене 2 000 марок, второе — трансформатор той же мощности с 3,2% потерь по цене 1 800 марок. Следует ли без рассуждений остановиться на более «дешевом»?

Имеем

$$\begin{aligned} P_1 &= 2\,000 \text{ марок} & V_1 &= 3 \text{ kW} \\ P_2 &= 1\,800 \text{ марок} & V_2 &= 3,2 \text{ kW} \end{aligned}$$

Следовательно,

$$U_1 = \frac{12,5 \cdot 2\,000}{100} + 240 \cdot 3 = 250 + 270 = 970 \text{ марок,}$$

$$U_2 = \frac{12,5 \cdot 1\,800}{100} + 240 \cdot 3,2 = 225 + 768 = 993 \text{ марок.}$$

«Дешевый» оказывается значительно дороже.

В предыдущих примерах существенность потерь трансформатора сильно подчеркнута, что безусловно способствует уяснению сути рассматриваемой эксплуатационной проблемы. В действительности положение вещей несколько иное. И силовой трансформатор очень часто нагружен не полностью, так как он взят несколько большей мощности, чем необходимо. Но в этом случае он длительно слабее нагружен, а потому нетрудно определить действительные длительные потери. Это обстоятельство ничего не меняет в подсчете суммарных издержек производства.

Имеются, как известно, производства, сами вырабатывающие для себя энергию.

Эти производства имеют полную возможность измерить величину израсходованной в трансформаторе энергии. Они часто считают трансформатор потребителем и как таковому приписывают себестоимость тока. В этих случаях потребность в дешевом трансформаторе особенно велика.

Возможность, более того — частота подобных случаев должны были эксплуатационного инженера навести на размышления. Гораздо большей, чем разница между теплосиловой и гидросиловой установками, является разница между полноценными и бесценными потерями в трансформаторах при рассмотрении двух конструкций, дешевой в точном смысле этого слова с одной стороны и экономичной — с другой.

За существование двух конструкций будут особенно покупатели, вынужденные дешево купить, покупающие трансформатор только за наличные. Для них дешевый трансформатор является вопросом жизни, так как они не имеют кредита, и для них неизмеримо растет доля по оплате процентов на капитал. Они вынуждены взять на себя перерасходы по потере энергии, если желают развивать дело.

Для всех этих различных возможностей вышеуказанное решение остается полностью применимо. Каждый покупатель знает какие амортизации и проценты на капитал ему приходится учитывать и, сообразно с этим, выбрать наилучшую для него потерю энергии. Главным является с точки зрения эксплуатационного инженера правильный подсчет, дабы поверхностными суждениями о поступающих предложениях трансформаторов не затуманить вопроса об экономической целесообразности.

8. ПРОГРЕСС В ТРАНСФОРМАТОРОСТРОЕНИИ. ПРЯМАЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЙ.

Уяснив себе все эти принципы, эксплуатационный инженер будет с интересом следить за развитием трансформаторостроения. Расчеты предыдущего параграфа могут быть выведены из рамок отдельных случаев закупки трансформаторов и применены к общим экономическим решениям вопросов трансформаторостроения. Эти расчеты пригодны в одинаковой мере как для эксплуатационного инженера, так и для конструктора.

Конструктор установил такую конструкцию, которая, допустим, при мощности в L kW стоит P марок и вызывает V kW потерь при длительной полной нагрузке. Рассматриваем, как и в предыдущий раз, сначала случай с силовым трансформатором.

Борьба за существование ведет к прогрессу, вынуждает к выработке новой конструкции с меньшей ценой и (так как иначе невозможно) с другими потерями. Поиски подобных новых конструкций не прекращаются. Эти поиски возложены на конструктора, постоянно подталкиваемого инженером-продавцом.

Эксплуатационный инженер, само собой разумеется, не может вмешиваться в конструктивную работу. Он испытывает лишь результат. Он оценивает удешевление и сравнивает его с электрическим ухудшением. Это сравнение возможно и совершенно необходимо для учения об эксплуатации.

Удешевление конструкции на dP марок уменьшает расходы на амортизацию и уплаты процентов по капиталу на

$$\frac{a}{100} dP = adP \text{ марок.}$$

Одновременное, к сожалению, неизбежное повышение потерь на dV kW вызывает повышение расходов по подаче тока на bdV марок.

Новая конструкция дает преимущество только в том случае, если

$$adP > bdV$$

С этим результатом трудно непосредственно что-либо предпринять. Совершенно невозможно выразить зависимость цены P от потерь V , представив ее в математической форме

$$P = f(V).$$

Удачные мысли, изобретательность и конструкторская ловкость не поддаются математическому выражению.

Одно лишь можно с определенностью сказать и практически оценить — это границу усовершенствования, то удешевление, которое аннулируется одновременным электрическим ухудшением, т.-е. случай

$$-a \cdot dP = b \cdot dV \quad (3)$$

Он с ясностью и точностью указывает направление пути в будущем, но с меньшей точностью — самый путь.

Он указывает направление не только для какого-либо определенного трансформатора. Этот дифференциал может служить для типового ряда, если его привести к виду

$$-a \frac{dP}{L^{3/4}} = b \frac{dV}{L^{3/4}}.$$

В типовом ряде, как мы уже знаем, цена растет пропорционально $\frac{3}{4}$ степени мощности, как и потери.

Вводя, таким образом, типовую цену

$$p' = \frac{P}{L^{3/4}}$$

и типовые потери

$$v' = \frac{V}{L^{3/4}},$$

приходим к выражению

$$-adp' = bdV'$$

Практически удобнее взять числа, отнесенные к одному киловатту: для цены имеем

$$p = \frac{P}{L} \text{ марок}/kW,$$

а для потерь

$$v = 100 \frac{V}{L} \%$$

и получить выражение

$$-\mu dp = b dv \quad (4)$$

Мало наглядное уравнение (4) становится понятным, если графически изобразить зависимость между безусловно необходимым удешевлением отнесенной цены dp и повышением потерь в процентах.

Приводя уравнение (4) к виду

$$\frac{dp}{dv} = -\frac{b}{\mu},$$

получаем на диаграмме прямую.

«Прямая усовершенствований» дает при каждом значении потерь энергии в процентах ту удельную цену, по которой в данный момент они окупаются. Если для какой-либо проверенной конструкции найдем соответствующую точку в наших координатах, то посредством угла наклон α , образуемого прямой с положительным направлением оси абсцисс v , и тангенс которого равен

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{b}{\mu}$$

можем охватить все мыслимое усовершенствование.

Прямая усовершенствований является пределом мыслимой кривой усовершенствований, лежащей, очевидно, под прямой (фиг. 2). В остром углу, образуемом осью абсцисс — v с прямой усовершенствований, лежит полностью вся будущность трансформатора. Вряд ли можно усомниться в том, что здесь мы упираемся в тупик и что при каждом шаге вперед мы сами себя связываем.

Вершина угла, как в этом легко убедиться, недостижима. Она соответствует ничему не стоящему, не содержащему в себе материала трансформатору, короче, представляющему собою ничто. Однако, являясь идеалом, эта недостижимая точка дает нам реальную величину, а именно, максимальные потери, мыслимые в нашем трансфор-

ИТЬ
ДНУЗТ

маторе. Их можно легко определить для каждого трансформатора в случае, если известна пара значений

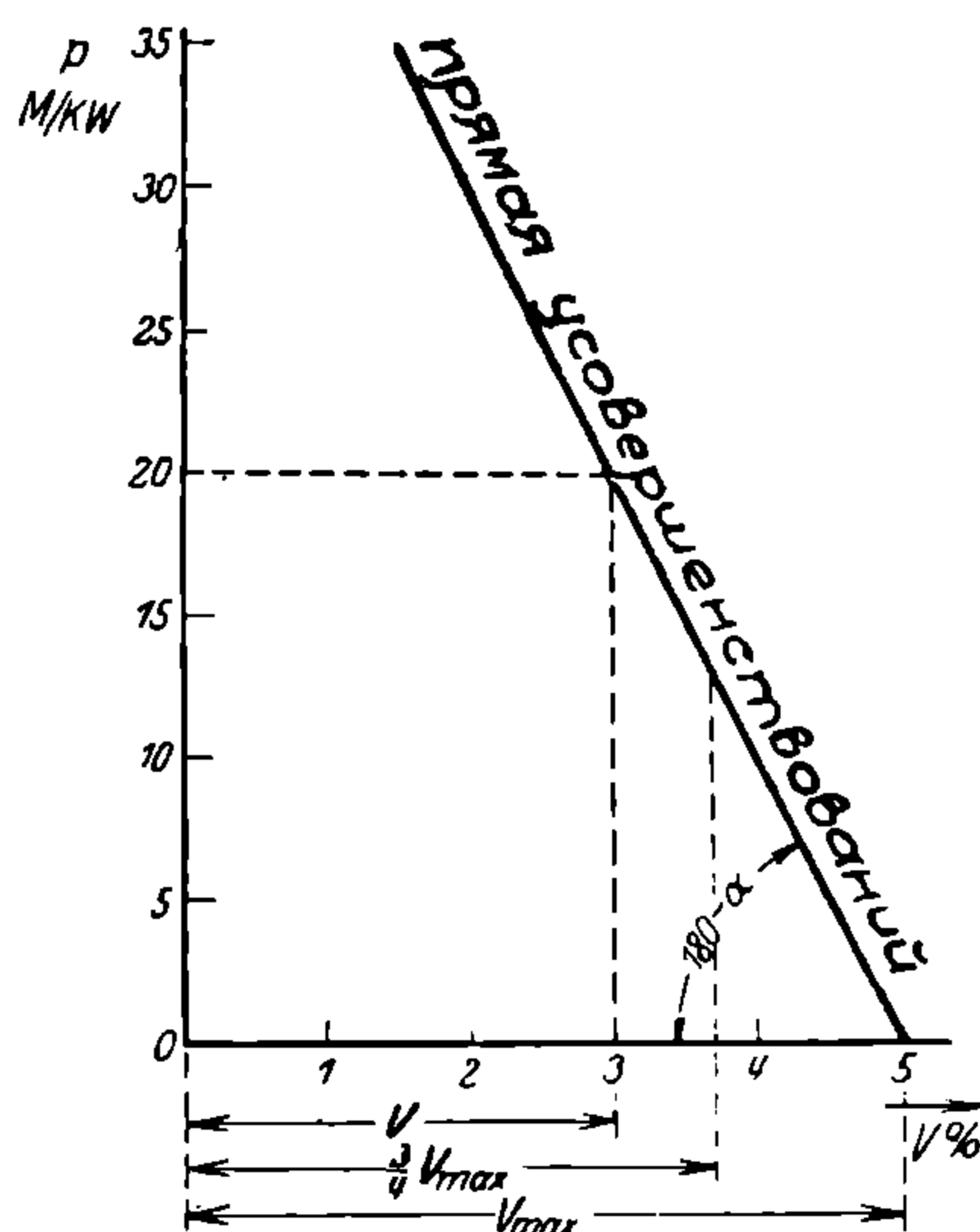
$$p = p_0,$$

$$v = v_0.$$

Они соответствуют отношению

$$v_{\max} = \frac{p_0 + \frac{b}{\mu} v_0}{\frac{b}{\mu}} = \frac{\mu p_0 + b v_0}{b} \quad (5)$$

Все зависит от обеих величин: от μ — доли амортизации и уплаты процентов на капитал и от b — цены одного киловатт-года потерь.



Фиг. 2.

Обе величины сильно колеблются в практике. Доля амортизации и уплаты процентов на капитал зависит от очень многих факторов. Послевоенные годы это чрезвычайно четко выявили. Она зависит также, как это было уже упомянуто, от материальных возможностей покупателя трансформатора.

Величина киловатт-года колеблется еще значительней. Большей частью гидросиловые установки устанавливают свои цены на энергию по ценам теплосиловых установок, но решающим является то себестоимость энергии, то ее продажная цена. Будущее трансформатора ограничено гораздо меньше, чем это может показаться при поверхностном рассмотрении. Прямая усовершенствований наклонена сильно, а затем слабо к оси абсцисс — v . Каждый эксплуатационный инженер должен наметить свою собственную прямую усовершенствований. В основу фиг. 2 положен в качестве исходной точки трансформатор мощностью в 100 kW, стоимостью в 2 000 марок и 3% потерь. Доля амортизации и уплаты процентов на капитал принята в 12,5% и для потерь киловатт-год оценен в 125 марок.

ИТБ
ДНУЗТ

Наивысшие потери, которые, таким образом, будут когда-либо достигнуты трансформатором, определяются из уравнения (5)

$$v_{\max} = \frac{12,5 \cdot 20 + 125 \cdot 3}{12,5} = 5\%, \quad (5)$$

так как

$$p_0 = \frac{2000}{100} = 20 \text{ марок}/kW$$

и

$$v_0 = 100 \cdot \frac{3}{100} = 3\%.$$

Коэффициент полезного действия, следовательно, не может быть меньше 95%.

9. ТРУДНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ.

Решение вопроса о коэффициенте полезного действия силового трансформатора, данное в предыдущем параграфе, облегчает нам и обзор трудностей усовершенствования, которые нам в настоящее время предстоит преодолеть, а также и тех, которые нас ожидают в будущем. Теоретическая возможность усовершенствования мыслима лишь при знании и изучении препятствий, в противном случае перспективы станут весьма призрачными.

Трудность усовершенствования в трансформаторостроении лучше всего может быть выявлена отношением необходимого удешевления, приносимого новой конструкцией, к увеличению потерь, ею вызываемому. Относительное удешевление соответствует, согласно наших обозначений, частному

$$\frac{dp}{p},$$

относительное повышение потерь — дроби

$$\frac{dv}{v}.$$

Отношение обеих величин

$$k = \frac{v dp}{p dv}$$

явилось бы мерилем трудности.

Не трудно наметить способ определения величины k . Согласно уравнения (4) имеем

$$k = \frac{b}{\mu} \cdot \frac{v}{p} \quad (6)$$

так что для пары значений v и p тотчас же может быть подсчитан и коэффициент трудности k . Вернувшись к численному примеру, представленному на фиг. 2, имеем

$$k = \frac{125}{12,5} \cdot \frac{3}{20} = 1,5,$$

т.-е. каждое увеличение потерь на $n\%$ должно вызвать понижение цены трансформатора на $1,5 n\%$. Трудность, как видим, значительна. Она зависит от состояния развития в каждый данный момент, развития, которое и может быть определено величинами p и v .

ИТЬ
ДНУЗТ

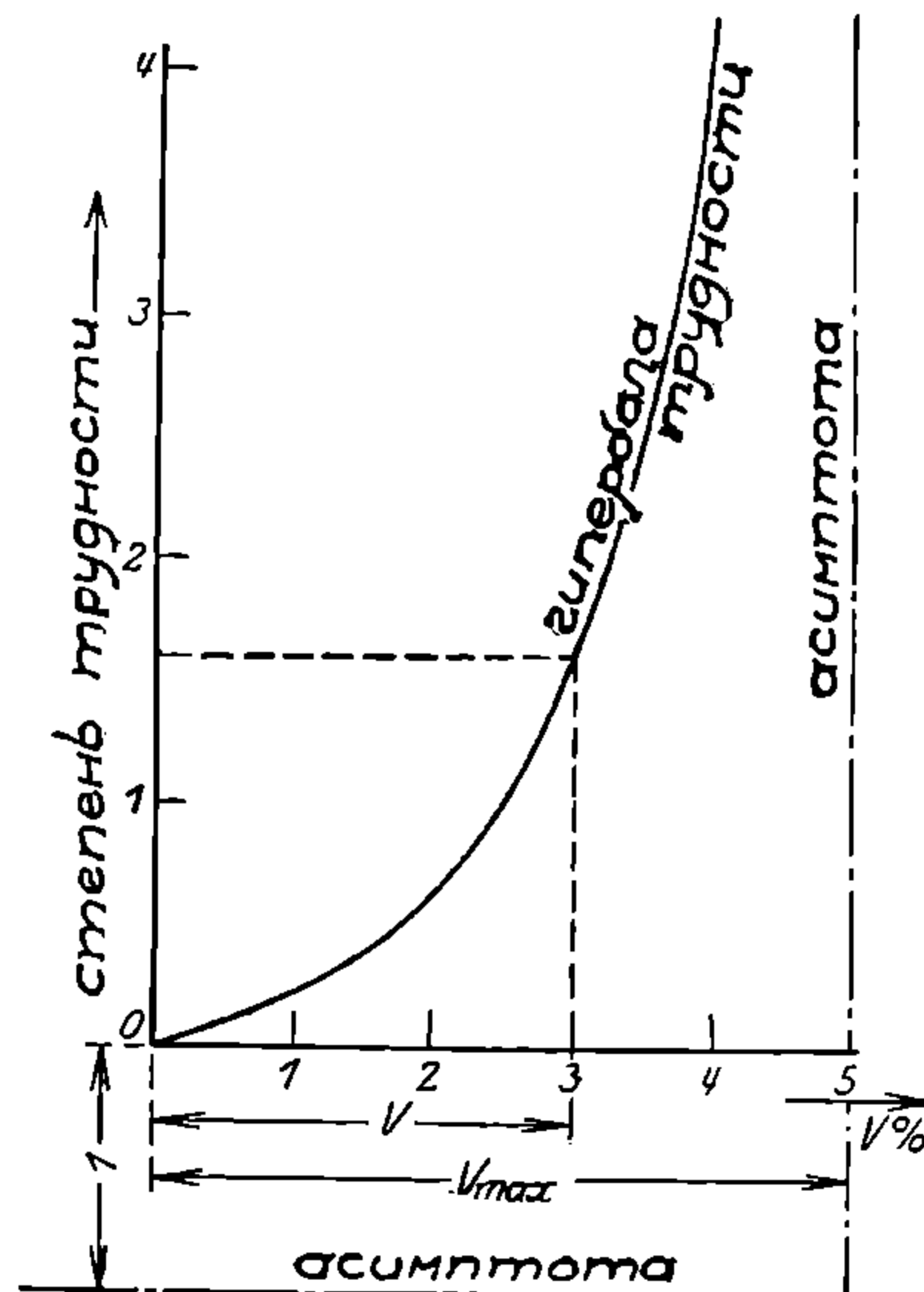
Можно величину k поставить в зависимость только от потерь в процентах и дать картину будущего, вводя максимально возможные потери. При помощи фиг. 2 можно легко определить, что

$$p = (v_{\max} - v) \frac{b}{\mu}$$

и мы получаем новое выражение

$$k = \frac{v}{V_{\max} - v} \quad (6a)$$

Отсюда снова вытекает для нас возможность представить геометрическую картину зависимости коэффициента трудности k от v , так как уравнение (6a) выражает гиперболу, прямоугольными коорди-



Фиг. 3.

натами которой являются k и v . Положение этой гиперболы трудности легко определить. Согласно уравнения (6a), для

$$v = v_{\max} \quad (7)$$

коэффициент k бесконечно велик. Уравнение (7) определяет собой асимптоту. Очевидно также, что гиперболы в начале координат имеет

$$v = 0 \quad k = 0.$$

Если, наконец, напишем уравнение (6a) в виде

$$v = v_{\max} \frac{k}{k + 1},$$

то получим также и вторую асимптоту

$$k = -1.$$

Фиг. 3 показывает нам путь с непрерывно возрастающими трудностями, который предстоит преодолеть трансформаторостроению. Мы знаем, что в настоящее время он не так уж легкий. Остались уже не-

КАК ПЛОТЕН

НТБ
ДНУЗТ

большие возможности, осталось лишь кропотливое накапливание долей процента. Правда, иногда удастся и более крупный прыжок, но лишь в случае помощи конструктору со стороны изобретателя. Таков повсюду путь техники.

Прямая усовершенствований и гипербола трудности дают нам ясное решение проблемы коэффициента полезного действия силового трансформатора, они делают возможным экономический контроль над ним, они оберегают от неправильных конструктивных уклонов и дают направление развитию силового трансформаторостроения. Трансформатор для освещения несколько запутывает вопрос, как мы это увидим в следующей главе.

Кроме того, необходимо коснуться еще некоторых побочных вопросов, мимо которых нельзя пройти, так как они затрагивают частично внутреннюю сущность трансформатора, а также и потому, что эксплуатационный инженер рано или поздно должен столкнуться с ними.

10. ЧРЕЗМЕРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛА.

Проблема неестественного коэффициента полезного действия, исследованная в параграфе 6, может снова возникнуть в процессе развития трансформаторостроения. По исследованиям последнего параграфа мы довольно точно осведомлены о предстоящем развитии. Мы видим, что экономичность трансформации потребует относительно все больших удешевлений, тогда как конструкции будут электрически все ухудшаться. Вполне вероятно, что конструктор не преодолеет возрастающих трудностей и в конечном счете уклонится от правильного пути.

Контролирующий орган для постоянного наблюдения за кривой усовершенствований, разумеется, отсутствует. Уклоны вполне вероятны. Учение об эксплуатации должно поэтому дать возможность суждения об экономической состоятельности данного типового ряда, независимо от предыдущих, оно должно быть в состоянии судить об отдельных точках кривой усовершенствований.

Проблема имеет и другую, практическую сторону. Каждое производство имеет свои собственные соображения относительно экономичности трансформации. Для какого-либо производства типовой ряд с искусственным, усиленным охлаждением, допускающим большие потери, может оказаться экономически непригодным. Мощные трансформаторы строятся с естественным масляным охлаждением, обычно они снабжаются водяным охлаждением. При малых мощностях, кроме трансформаторов с масляным охлаждением, строятся и сухие.

Если же в типовом ряде из экономических соображений принят неестественный коэффициент полезного действия, то ясно, что использование рабочего материала зашло слишком далеко, и что искусственное охлаждение не уместно.

Ответ на вопрос о том, не указаны ли для типового ряда лучшие коэффициенты полезного действия, может быть дан легко только для силовых трансформаторов. Этот ответ должен содержать в себе связь между ценой трансформатора и его потерями энергии, лучше всего характеризующими данный типовой ряд; этот ответ, наконец, должен дать возможность глубоко вникнуть в устройство трансформатора.

НТБ
ДНУЗТ

Мы уже знаем, что достаточно исследования одного из элементов типового ряда для того, чтобы иметь суждение обо всем ряде в целом. Берем поэтому наугад трансформатор, у которого, например, цена одного киловатта — p марок/ kW , а потери $v\%$. Уменьшение потерь на

$$\frac{v}{x} \%$$

вызвало бы, как это известно из параграфа 6, повышение цены на $p x^3$ марок/ kW .

В предельном случае, когда типовой ряд начал бы становиться экономически невыгодным, выигрыш на электрической работе превысил бы повышенную амортизацию и уплату процентов, что дает

$$\mu p(x^3 - 1) = b\left(v - \frac{v}{x}\right)$$

Если написать это выражение в виде

$$\frac{b}{\mu} \frac{v}{p} = x^3 + x^2 + x,$$

то немедленно обнаруживается, что невыгодность типового ряда начинается с того момента, когда x становится больше единицы, т.-е. когда

$$\frac{b}{\mu} \frac{v}{p} \geq 3 \quad (8)$$

Факт теоретически весьма ценный. Решение проблемы коэффициента полезного действия для силовых трансформаторов с помощью прямой усовершенствований дало, в качестве недостижимого конца развития, пару значений

$$v = v_{\max} \quad p = 0.$$

Этот случай находится уже по ту сторону границы, отмеченной уравнением (8). Мы имеем, таким образом, еще дальнейшее ограничение наших перспектив. В практической форме мы его получим, если, согласно фиг. 2,

$$p = \frac{b}{\mu} (v_{\max} - v).$$

Уравнение (8) превратится тогда в

$$v = \frac{3}{4} v_{\max} \quad (9)$$

Это — действительный конец, ибо он практически достижим; он соответствует цене за один киловатт, равной

$$p = \frac{b}{4\mu} v_{\max} \quad (10)$$

Мы к нему ближе, чем нам кажется, хотя на пути еще много препятствий. Чтобы убедиться в этом, стоит лишь вернуться к числовому примеру параграфа 8.

Согласно обоим уравнениям (9) и (5), потери 100 kW -го трансформатора не вырастут больше, чем

$$\frac{3}{4} \cdot 5 = 3,75\%.$$

Мы же к настоящему времени достигли 3% и легко можем получить цену киловатта в 20 марок/ kW

Уравнение (8) практически также имеет крупное значение. В первую очередь, считавшаяся раньше чрезмерной нагрузка материала в настоящий момент облегчается водяным охлаждением, сильно понижающим цену и повышающим потери. Трансформатор с водяным охлаждением может стать неэкономичным.

Если, например, мощный трансформатор в 20 000 kW с водяным охлаждением стоит 60 000 марок и дает 1,5% потерь, то

$$p = \frac{60\,000}{20\,000} = 3 \text{ марки}/kW.$$

и

$$v = 1,5\%,$$

Согласно уравнения (8), он работает экономично только в производстве, в котором

$$\frac{b}{\mu} = 3 \cdot \frac{3}{1,5} = 6.$$

Если доля амортизации и процентов на капитал равна

$$\mu = 12,5\%,$$

то киловатт-год производства обойдется в

$$12,5 \cdot 6 = 75 \text{ марок},$$

что при 8-часовой полной нагрузке даст цену энергии в

$$\frac{75}{2\,400} = 0,031 \text{ марок}/kW.$$

При таких условиях выйдут из затруднения лишь те установки, которые начисляют на свои трансформаторы себестоимость добываемой энергии. После всего сказанного разумеется, что мощные трансформаторы с водяным охлаждением большей частью не используются до пределов нагревания. Поэтому в предложениях со стороны фирмы на ряду с нормальной длительной мощностью дается еще и другая, часто более высокая допустимая длительная мощность трансформатора, достижимая лишь при полном использовании охлаждающего аппарата.

11. ТИПЫ.

В качестве непосредственно воспринимаемого признака типового ряда мы приняли систему охлаждения. Вся шкала мощностей от наименьших до наибольших выполняется из нескольких типовых рядов. Весьма малые мощности удовлетворяются воздушным охлаждением. «Сухой» трансформатор может быть выполнен до 100 kW . Здесь одним ударом масляное охлаждение устраняет возросшие вместе с мощностью трудности от нагревания. При больших мощностях масляное охлаждение становится недостаточным и в свои права вступает водяное охлаждение.

Этими 3 типовыми рядами исчерпывается полностью шкала мощностей. Собственно говоря, стремления новейшего трансформаторостроения заходят еще дальше. Трансформатор с масляным охлаждением стремится захватить как нижние, так и верхние области. Он,

НТБ
ДНУЗТ

с одной стороны, пытается все более и более вытеснить сухой трансформатор, с другой же стороны, он все выше и выше проникает в область мощного трансформатора.

Возрастающие напряжения в эксплуатации весьма оправдывают вытеснение сухого трансформатора. Масло является не только хорошо охлаждающей, но также и хорошо изолирующей средой. Безопасность является не без основания все более и более решающим фактором в производстве. Гарантированием безопасности объясняется и предпочтение, часто отдаваемое масляному охлаждению перед водным при больших мощностях. Но это ведет иногда к нежелательным преувеличениям.

Все три типовых ряда с воздушным, масляным и водяным охлаждением перекрывают друг друга на значительных отрезках шкалы мощностей. Обследованием этих «отрезков» должно заняться учение об эксплуатации со своей проблемой цены и коэффициента полезного действия.

При переходе от обыкновенного воздушного охлаждения к масляному скачкообразно возрастает цена трансформатора. Масло дорого, да и масляный кожух весьма чувствительно удорожает конструкцию. Масло и кожух должны быть компенсированы медью и железным листом. Действительно, нагрузка меди, не превосходящая при сухом трансформаторе 2 A/mm^2 , без труда доходит до 3 A/mm^2 , если поместить обмотку в масло. Да и индукция может быть повышена в масляной ванне, хотя для нее главным мериллом остается не охлаждение железа, а ток холостого хода.

Но, если подобный трансформатор с масляным охлаждением должен быть не дороже сухого трансформатора, то у него, несомненно, должны быть большие потери.

Подсчет экономичности трансформации очень часто решает вопрос в пользу сухого трансформатора.

То обстоятельство, что трансформатор с масляным охлаждением, вследствие большего использования меди, а также и более компактной конструкции, при сравнительно высоких потерях в меди будет иметь меньше потери в железе, чем при сухом трансформаторе той же мощности — это обстоятельство при силовых трансформаторах имеет малое значение. При длительной полной нагрузке только суммарные потери являются мериллом экономичности трансформации.

При переходе от естественного масляного охлаждения к водяному зависимость аналогична предыдущей. Водяное охлаждение вводит новые расходы на охлаждающий змеевик, на насос и на их оборудование. Во всяком случае, при больших мощностях следует учесть одно, часто игнорируемое обстоятельство. Мощный трансформатор с естественным масляным охлаждением вызывает значительные строительные расходы, он заполняет собою весьма крупных размеров будку. Развиваемые им большие количества тепла должны быть удалены. Воздух, который должен протекать через трансформаторную будку, находится под сильным «тепловым давлением». Мало задумываются над размерами воздушного потока, возникающего при естественном масляном охлаждении при мощности в несколько тысяч киловатт. Этот воздушный поток для нормального своего продвижения требует мощных сечений проводящих воздух каналов.

Строительные расходы по устройству трансформаторной будки затрудняют обыкновенному трансформатору с масляным охлаждением

путь к высоким мощностям. Да и его кожух для масла значительно дороже гладкого кожуха трансформатора с водяным охлаждением.

В настоящее время трансформатор с масляным охлаждением несомненно зашел слишком далеко в обе стороны шкалы мощностей. Он безусловно не выдержит экономического экзамена как со стороны очень малых мощностей, так и со стороны очень больших. В обоих случаях за него продолжает говорить лишь его безопасность.

Преувеличения, однако, неизбежны. Вообще, если при малых мощностях даны высокие напряжения или, если маломощный трансформатор непосредственно прикреплен к линейной мачте, в этих случаях иного выхода нет. Нет другого выхода и в том случае, если должна быть установлена далеко отстоящая трансформаторная станция, а устройство водяного охлаждения почему-либо невозможно. Но эти случаи выходят из рамок рассмотренного и они должны быть разрешены на основе опыта самого эксплуатационного инженера. Выбор при этом у него не трудный.

12. ПРОБЛЕМА ЦЕНЫ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

При совокупном рассмотрении проблемы цены и коэффициента полезного действия силового трансформатора можно обнаружить ряд нездоровых явлений в отношениях между эксплуатационным инженером и конструктором. Они и по сей день не понимают друг друга, отчего страдает, главным образом, конструктор.

Часто при продаже трансформаторов даже и для чисто силовой нагрузки покупателя спрашивают о конструктивных подробностях, совершенно не интересующих эксплуатационного инженера. Например, у него спрашивают о том, сколько меди должно быть в заказываемом трансформаторе. Покупают, так сказать, по весу. Трансформатором с малым количеством меди пренебрегают, его не заказывают.

Для чего это? Величина плотности тока в меди, о которой можно судить по весу, как известно, отнюдь не говорит о хороших качествах конструкции. Здесь дело не обстоит так, как при железных конструкциях, где напряжения в материалах могут стать опасными. Нагрузка меди влияет лишь на охлаждение, а охлаждающий аппарат всегда контролируется существующими нормами.

Трансформатор, работающий при плотности тока в 3 A/mm^2 в меди, зачастую может быть лучше охлажден, чем трансформатор — с 2 A/mm^2 . Мощные трансформаторы с водяным охлаждением, работающие при высоких плотностях тока, остаются весьма холодными. Какое значение здесь имеет вес меди?

Решающей остается лишь экономичность трансформации, о которой можно судить в любой момент без знания веса меди, как это указывается в вышеприведенном решении проблемы цены и коэффициента полезного действия. Все остальное излишне, все остальное обнаруживает лишь незнакомство с вопросом.

Еще не совсем прошли те времена, когда конструктора были вынуждены искусственно делать трансформаторы более тяжелыми. При этом увеличивался, конечно, лишь вес конструкции, ее мертвый материал. И в моторостроении конструктор часто вынужден подобным образом обманывать. Что дает производству тяжелый трансформатор? Повышенные расходы по его доставке, а в далеком будущем — немного больше медного лома.

НТБ
ДНУЗТ

Одним из ошибочных заключений является суждение о способности к перегрузкам по весу конструкций. Сохраняется та же граница нагрева для каждого типа конструкций. Способным к длительной перегрузке не является ни тяжелый, ни легкий трансформатор. Но для силового трансформатора только способность к длительным перегрузкам имеет значение. К этому следует прибавить, что кратковременные перегрузки преодолеваются не медью, а маслом. Чем больше трансформатор, тем меньшее значение имеет вес меди для кратковременных перегрузок. В мощных трансформаторах конечная температура меди перерастает температуру масла в несколько секунд.

Большей частью силовые трансформаторы заказываются более мощными, чем это требуется. Они переносят поэтому без вреда небольшие перегрузки при эксплуатации. Решение проблемы цены и коэффициента полезного действия вследствие этого не обесценивается. Конечно, во всех случаях неполно нагруженных трансформаторов при исследовании экономичности принимаются в расчет лишь действительные потери. Не труден и подсчет, так как известно, что потери в железе не зависят от нагрузки, а потери в меди падают пропорционально квадрату нагрузки.

Если принять во внимание, что силовой трансформатор на деле заказывается несколько более мощным, то легко обнаружить, что далеко небезразлично как в нем распределяются потери между медью и железом. Лучше, если на долю меди падет большая часть потерь. Пример лучше всего осветит эту зависимость.

Пример. Для производства необходимо купить 100 *kW*-й трансформатор. Предстоит выбор между двумя типами одинаковой цены. Оба дают суммарные потери в 3%, при чем в одном трансформаторе они распределяются поровну между медью и железом, т.-е. по 1,5%, в другом — на долю меди падает 2 *kW*, а железа — 1 *kW*. Расчет вести по временной длительной нагрузке в 70 *kW*.

При 70 *kW* потери в железе в обоих трансформаторах составляют в процентах от общей мощности:

для 1-го трансформатора

$$\frac{100 \cdot 1}{70} = 1,43\%,$$

для 2-го трансформатора

$$\frac{100 \cdot 1,5}{70} = 2,14\%.$$

Потери же в меди падают во 2-м трансформаторе с 2,0 *kW* до $2,0 \times 0,7^2$ *kW*, что в процентах от мощности составляет:

$$100 \cdot \frac{2,0 \cdot 0,7^2}{70} = 1,4\%,$$

а в первом трансформаторе падает с 1,5 *kW* до $1,5 \cdot 1,7^2$ *kW*, т.-е. до

$$100 \cdot \frac{1,5 \cdot 0,7^2}{70} = 1,05\%$$

Следовательно, суммарные потери 1-го трансформатора равны

$$1,43 + 1,05 = 2,48\%.$$

а второго

$$2,14 + 1,4 = 3,54\%.$$

Отсюда видим, что в этом случае следует решительно предпочесть неравномерное распределение суммарных потерь при нормальной нагрузке.

НТБ
ДНУЗТ

Этот факт связан с известным правилом электромашиностроения, доказывающим, что коэффициент полезного действия машины будет максимальным при равенстве потерь холостого хода и потерь в меди. Это правило легко вывести. Оно настолько существенно, что на нем стоит остановиться подробнее.

Потери холостого хода $V_{ж}$ (kW) у трансформатора зависят лишь от напряжения и числа периодов, они практически постоянны. Потери в меди возрастают и падают пропорционально квадрату мощности L (kW). Суммарные потери могут быть, при помощи постоянной k , представлены в виде

$$V = V_{ж} + k \cdot L^2.$$

Коэффициент полезного действия, равный отношению отдаваемой мощности к получаемой, может быть выражен

$$\eta = \frac{L}{L + V_{ж} + kL^2}$$

Он достигает максимальной величины, когда

$$V_{ж} = kL^2,$$

т.-е. при мощности

$$L = \sqrt{\frac{V_{ж}}{k}}$$

при одинаковых потерях в железе и меди.

Природа полна коварств. Трансформатор, признанный невыгодным в вышеприведенном примере, имеет все же одинаковые потери в железе и в меди. Почему же следует предпочесть второй, не подчиняющийся правилу коэффициента полезного действия? Применимо ли здесь это правило?

Правило, конечно, остается всегда верным. Всматриваясь внимательно в этот обманчивый численный пример, мы легко обнаруживаем причину несостоятельности классически сконструированного силового трансформатора. Наивысший коэффициент полезного действия у него при нормальной нагрузке, следовательно при меньшей нагрузке его коэффициент полезного действия должен упасть. Второй трансформатор имеет при номинальной мощности неравномерно распределенные потери, следовательно не максимальный коэффициент полезного действия. В действительности, при 70 kW , как показывает пример, его потери в меди стали равны потерям в железе.

Замечательно то, что развитие трансформаторостроения само выбрало, должно было выбрать путь, указываемый учением об эксплуатации. Улучшение охлаждения, как известно, допускает повышение плотности тока и индукции. Ничто не препятствует повышению плотности тока, возрастание же индукции вызывает нежелательное возрастание тока холостого хода. Естественно поэтому, что чем лучше охлаждение, тем потери в меди больше потерь в железе. Трансформатор с водяным охлаждением дает большие различия между частичными потерями.

При равных суммарных потерях у силового трансформатора эксплуатационный инженер предпочтет большие потери в меди, но он не согласится расходовать средства на неравномерное распределение потерь. Он учитывает то обстоятельство, что через не очень продолжительное время его производство все же полностью использует трансформатор. Однако, с возрастающей нагрузкой исчезает преимущество от неравномерного распределения потерь.

13

II. Экономичность осветительного трансформатора.

13 ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПРОБЛЕМА ОСВЕТИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

Эксплуатационный инженер по сей день слишком мало знает или уделяет внимания колоссальному различию между силовым и осветительным трансформатором. Очень часто выбор совершается им путем одних и тех же суждений. Он мало думает о том, что осветительная установка создает экономически и электрически отношения, отличные от силового трансформатора.

Осветительный трансформатор является существенной проблемой учения об эксплуатации. Чтобы не потерпеть экономических и электрических убытков, следует обратить внимание на то обстоятельство, что осветительная нагрузка колеблется во времени и в пространстве, что она не нагружает равномерно трансформатор как целое, так же как и не распределяется поровну между отдельными фазами трехфазной установки.

Эксплуатационная проблема осветительного трансформатора распадается на множество составных частей, частью экономического, частью электрического характера. И осветительный трансформатор имеет свою проблему цены и проблему коэффициента полезного действия. И для него действительны соображения параграфа 1. Но колебания мощности во времени запутывают вопрос об экономичности осветительной трансформации. Возникает, таким образом, своя проблема цены и коэффициента полезного действия у осветительного трансформатора.

Возможность неравномерного распределения осветительной нагрузки по отдельным фазам трансформатора ведет к электрическим проблемам, которые безусловно должны быть рассмотрены и изучены эксплуатационным инженером. Имеются, кроме того, смешанные экономически-электрические частичные проблемы, также подлежащие рассмотрению.

Ничто так не подчеркивает особенность осветительного трансформатора, как признание того факта, что табличная мощность осветительного трансформатора говорит эксплуатационному инженеру гораздо меньше, чем таковая у силового трансформатора. Номинальная мощность у силового трансформатора является весьма действительной, практической величиной. Силовой трансформатор стремится к нагрузке, соответствующей номинальной мощности. Осветительный же транс-

ДНУЗТ

форматор редко работает при номинальной мощности. Силовой трансформатор продолжительно воспринимает нагрузки, остающиеся несколько ниже номинальной мощности или же достигающие ее; осветительный трансформатор работает то значительно ниже номинальной мощности, то значительно выше ее.

Номинальная мощность для осветительного трансформатора является лишь исходной точкой. Ту же роль играет и номинальный ток. Только напряжение остается неизменным.

Еще хуже чем с мощностью обстоит дело с коэффициентом полезного действия у осветительного трансформатора. Отношение отдаваемой трансформатором энергии к получаемой сильно колеблется в осветительной установке. Потери холостого хода остаются из года в год для каждого времени года и каждого часа суток на одной и той же высоте. Осветительный трансформатор должен находиться всегда под напряжением, даже и в том невыгодном случае, если горит хотя бы одна лампа. Потери в меди колеблются в очень больших пределах, пропорционально квадрату нагрузки.

Недостаточность прежнего представления о коэффициенте полезного действия давно всеми признана. Это представление заменено другим, а именно годовым коэффициентом полезного действия, равным отношению энергии, отданной трансформатором за год, к энергии им за это время полученной. Здесь вполне правильно устраняются дневные и месячные коэффициенты полезного действия, так как отдельные дни и месяцы не равноценны.

Для учения об эксплуатации недостаточно и понятие о годовом коэффициенте полезного действия. Изучение экономичности трансформации для освещения легко нам это доказывает. Таким образом, возникает интересная технико-экономическая частичная проблема.

Известно из практики, что эксплуатационный инженер охотно выбирает слишком малый осветительный трансформатор, силовой же трансформатор он заказывает большим. Он совершенно правильно рассчитывает, что в осветительной установке максимальная нагрузка длится лишь в продолжении нескольких часов, после чего сразу спадает, при чем перед скачком нагрузки трансформатор был слабо нагружен и относительно холоден. Иначе говоря, он считается с наличием при этих обстоятельствах способности к перегрузке.

Дело все же не так просто. Эксплуатационный инженер и конструктор должны здесь сговориться, в противном случае возникнут большие опасности. Не исключена возможность, что и конструктор будет рассчитывать по способности к перегрузке. Кроме того, более чем вероятно, что эксплуатационный инженер оценивает на-глаз способность к перегрузке, что может повести к ошибочным оценкам, если при этом отсутствуют точные разъяснения конструктора.

Учение об эксплуатации должно, следовательно, установить, в каком отношении находятся в производстве номинальная мощность к максимально допустимой. Оно должно заняться вопросом о способности осветительного трансформатора к перегрузке. Этим оно затрагивает и другую, весьма существенную частичную проблему. Приведенный здесь обзор эксплуатационной проблемы осветительного трансформатора достаточен для осознания того, что перед нами далеко еще не разработанная область. Она должна быть, наконец, разработана.

НТБ
ДНУЗТ

14. ПРОБЛЕМА ЦЕНЫ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

Экономичность осветительного трансформатора, также как и экономичность силового трансформатора будет зависеть, с одной стороны, от величины затраченного на трансформатор капитала, а с другой — от величины теряемой за год энергии в трансформаторе. И покупная цена осветительного трансформатора должна вызвать длительные расходы по амортизации и оплате процентов на капитал. И годовичная потеря энергии в осветительном трансформаторе стоит денег.

Поэтому может показаться, что все рассуждения параграфа 1 должны быть соответственно перенесены и к случаю осветительного трансформатора.

Однако, к сожалению, дело обстоит далеко не так. Как уже упомянуто, годовой коэффициент полезного действия является недостаточным понятием. Проблема должна быть глубже исследована. Нельзя ни в чем упрекнуть годовой коэффициент полезного действия, пока речь идет о чисто электрической экономичности трансформации. Потери в железе и потери в меди являются так или иначе потерями энергии. Но когда речь идет о стоимости трансформации — частичные потери становятся неравноценными. Действительная экономичность осветительного трансформатора существенно отличается от электрической.

Киловаттчас, потребляемый осветительным трансформатором в железе после полуночи, имеет небольшую цену. Он в очень редких случаях может быть продан. Правильнее, причислить его к себестоимости, так как осветительный трансформатор, как правило, принадлежит владельцу источника энергии. Но даже в случае покупки, по легкомыслию, крупным потребителем осветительного тока на стороне высокого напряжения, даже в этом случае он не может за ночные часы платить ту же цену, что и за дневные.

Могут возразить, что факт принадлежности осветительного трансформатора владельцу источника тока именно и выравнивает цену потери энергии. Надо полагать, что найдутся и эксплуатационные инженеры, которые будут отстаивать эту точку зрения. Они, пожалуй, будут даже правы до тех пор, пока их производство не будет полностью нагружено, пока не началась пика нагрузки. Но во время пик каждый киловаттчас потерь стоит столько же, сколько киловаттчас, проданный по наивысшему тарифу. Всякая другая оценка была бы неправильной.

Возьмем центральную гидросиловую установку. В начале функционирования она имеет сравнительно мало потребителей, и вода течет частично неиспользованной через плотину. Потеря энергии трансформаторов ничего не стоит. Силовые трансформаторы принадлежат данному производству, и потеря энергии оплачивается так же, как и полезно израсходованная. Осветительные трансформаторы являются или собственностью предприятия, или принадлежат большим или меньшим потребителям, общинам, товариществам или частным лицам. При собственных осветительных трансформаторах гидросиловая станция совершенно не думает о потерях. В чужих руках осветительный трансформатор начинает причинять много хлопот. Его потеря энергии уже больше не бесценна.

Очень скоро предприятие приходит к выводу, что потеря энергии в осветительном трансформаторе обходится не дешево. Наступают мел-

ководные дни, калорийная энергия дорога. Частичные потери начинают расцениваться хотя бы и одинаково, годовой коэффициент полезного действия становится существенным.

Между тем потребление растет. Пика нагрузок начинает оформляться как в самом предприятии, так и у отдельных крупных потребителей — приключенных городов и селений. Появляется потребность в совместной работе с калорийным резервом. Величина отдельных потерь начинает колебаться в зависимости от дневного часа, годовой коэффициент полезного действия теряет свой смысл, а на его место вступает коэффициент экономичности.

Его нетрудно определить. К моменту нагрузочной пики цена потерь значительно больше, чем обычно. Если обозначим $V_{ж}$ — потери холостого хода в kW :

V_m — потери в меди при полной нагрузке в kW ,

S_1 — число годочасов нагрузочной пики,

S_2 — число годочасов нагрузки трансформатора, приведенной к номинальной мощности,

L — номинальная мощность,

то коэффициент экономичности будет

$$\epsilon = \frac{s_2 \cdot L_1}{s_2 L + k(8760 - s_1) V_e + (V_e + V_k) s_1},$$

если

$$k = \frac{\text{себестоимость тока}}{\text{продажной цене тока}}$$

Эта величина не совсем точна, ибо некоторая потеря энергии в меди существует и вне времени осветительной пики.

Кроме того, выражение для годового коэффициента полезного действия в форме

$$\eta_r = \frac{s_2 L}{s_2 L + 8760 V_e + s_2 V_k}$$

не точно, так как потери в меди колеблются пропорционально квадрату нагрузки.

Оба выражения имеют значение для учения об эксплуатации лишь в той мере, в какой они указывают разницу между правильной и неправильной оценкой потерь трансформатора. Они резко выявляют, кроме того, насколько понятие коэффициента полезного действия

$$\eta = \frac{L}{L + V_e + V_k}$$

далеко от действительности.

В идеальном случае, если предприятие полностью использовано и если удалось выравнять пики и нагрузить генераторы до последнего ватта, то в этом случае и коэффициент полезного действия вступил бы в свои права. Он является конечным значением, к которому стремится коэффициент экономичности. При теплосиловых установках развитие короче. У них не бывает бесценных потерь. Годовой коэффициент полезного действия является по меньшей мере начальной мерой экономичности. Конечно, и при теплосиловой установке наметится коэффициент экономичности, который постепенно будет приближаться к коэффициенту полезного действия.

НТБ
ДНУЗТ

Этим мы ограничиваем краткий обзор трудностей проблемы экономичности осветительного трансформатора. Теперь можно помышлять и о решении самой проблемы, опираясь, конечно, при этом на данные первой главы. Однако, независимо возникает побочная проблема распределения потерь в железе и меди.

15. СПОСОБНОСТЬ ОСВЕТИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА К ПЕРЕГРУЗКЕ.

СУХОЙ ТРАНСФОРМАТОР.

Все же было бы преждевременно покончить с вопросом об экономичности осветительного трансформатора, ибо суждением о часах максимума, позволяющим оценить выше потери при полной нагрузке, вопрос не исчерпывается. Необходимо предварительно определить эти потери при полной нагрузке. Полная мощность — не номинальная мощность. Если потери в железе и сообщаются в поступившем предложении или на заводской табличке, то потери в меди при полной мощности определяются лишь из отношения полной мощности к номинальной.

Осветительный трансформатор как и всякий другой способен к временной перегрузке, более того, он большей частью перегружается в часы максимума. Эксплуатационному инженеру, конечно, известны требования, предъявляемые им к осветительному трансформатору. Учение же об эксплуатации должно указать допустимую величину перегрузки, ибо экономичность в значительной мере зависит от способности к перегрузке.

Эксплуатационному инженеру безусловно необходимо основательно познакомиться с процессами нагревания своего трансформатора настолько, чтобы иметь правильное суждение о его способности к кратковременной перегрузке. Это удастся легче всего в том случае, если заранее считать известным, что осветительный трансформатор ежедневно или, точнее говоря, в самые неблагоприятные дни года, находится t_0 секунд под неизменяющейся световой нагрузкой, а в остальное время он работает в холостую.

При этом предположении железо сердечника будет длительно находиться под определенным нагревом. Обмотка же при холостом ходе остается холодной. Она начинает нагреваться лишь в начале нагрузочного периода и достигает наивысшей температуры к концу этого периода, т.-е. по истечении t_0 секунд. От трансформатора можно требовать лишь такую световую нагрузку, которая ведет к допустимой максимальной температуре.

Для подсчета лучше всего начать с простейшего случая — с сухого трансформатора. Обмотка сухого трансформатора представляет собой практически однородное тело. Изоляционный материал (имеющийся в избытке именно у типов охлаждаемых воздухом), отнесенный к единице веса, обладает теплоемкостью в 6 раз большей теплоемкости меди. Но одновременно с этим удельные веса обоих материалов находятся приблизительно в обратной зависимости. Таким образом, можно принимать во внимание только наружные размеры катушек рассматривая их как сплошной медный массив.

Обмотка сухого трансформатора представляет собою для подлежащей рассмотрению проблемы нагревания некий медный массив

НТБ
ДНУЗТ

с приведенным весом G'_m (kg), значительно большим действительного веса меди G_m . Известно нагревание этого массива под влиянием неизменяющихся тепловых потерь. В начале почти все тепло остается в массиве и повышает его температуру. Только образующаяся разница температур по отношению к окружающей среде начинает вызывать теплоотдачу. С увеличивающимся превышением температуры теплоотдача обмотки растет приблизительно пропорционально этому превышению; остаток развиваемой теплоты, задерживающейся в обмотках и повышающей их температуру, становится все меньше и меньше. Обмотки, наконец, достигают конечного превышения температуры $\Delta\tau_0$ (°C) при которой все тепловые потери передаются окружающей среде.

Обозначим через V (Ватт) — потери в меди и $C_m \left[\frac{\text{Ваттсек.}}{^\circ\text{C kg}} \right]$ — теплоемкость меди, тогда для любого промежутка времени dt (сек.) можно выразить вышеописанный процесс следующим образом.

$$V_m dt = G'_m c_m d(\Delta\tau) + V_m \cdot \frac{\Delta\tau}{\Delta\tau_0} dt$$

Т.е. для повышения температуры обмотки на 1°C следует потратить c_m ваттсекунд работы на каждый килограмм материала, а отдача тепла в окружающую среду в любой момент меньше отдачи тепла в конечный момент процесса нагревания во столько раз, во сколько превышение температуры в рассматриваемый момент $\Delta\tau$ меньше конечного превышения температуры $\Delta\tau_0$.

Решение уравнения известно ¹⁾

$$\Delta\tau = \Delta\tau_0 \left(1 - e^{-\frac{V_m t}{G'_m c_m \Delta\tau_0}} \right) \quad (11)$$

Если бы в начале периода нагрузки мы воспрепятствовали всякой отдаче тепла обмоткой, то его температура повышалась бы каждую секунду на

$$\frac{V_m}{G'_m c_m} \text{ градусов Цельсия}$$

и конечное превышение температуры $\Delta\tau_0$ было бы достигнуто в

$$T = \frac{G'_m c_m \Delta\tau_0}{V_m} \text{ секунд.}$$

T — так называемая постоянная времени. Ею очень удобно оперировать при расчетах. Уравнение (11) примет тогда форму:

$$\Delta\tau_0 = \Delta\tau \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right).$$

Из последнего уравнения следует:

$$\frac{t}{T} = \ln \frac{\Delta\tau_0}{\Delta\tau_0 - \Delta\tau} \quad (11a)$$

после чего легко определить время t_0 , в которое трансформатор может работать при максимальной мощности (пока еще неизвестной), не переходя при этом допустимой границы превышения температуры. Дли-

¹⁾ См. M. Vidmar Die Transformatoren 2 Aufl. S. 335. Berlin: Julius Springer 1925.

НТБ
ДНУЗТ

тельная максимальная мощность мыслима при конечном превышении температуры $\Delta\tau_0$. Согласно допущениям в наших расчетах, это конечное превышение температуры пропорционально квадрату максимальной мощности, ибо потери в меди растут пропорционально квадрату мощности. Трансформатор же может безопасно нагреваться лишь до такого превышения температуры, которое получается при длительной номинальной мощности. Отношение

$$\frac{t_0}{T} = \frac{\text{допустимая длительность максимальной мощности}}{\text{постоянная времени обмотки}}$$

определяется согласно уравнения (11a), отношением

$$\frac{\Delta\tau_0}{\Delta\tau} = \left[\frac{\text{допустимая максимальная мощность}}{\text{номинальная мощность}} \right]^2$$

Все зависит от постоянной времени T . Чем она больше, тем больше требований можно предъявить трансформатору. Нелишне поэтому рассмотреть ближе ее действительную величину. Ее весьма просто определить. При некоторой плотности тока в $i \frac{\text{ампер}}{\text{мм}^2}$ в обмотке с действительным весом меди G_m (kg) образуются потери

$$V_m = 2,5 i^2 G_m \text{ Watt.}$$

Так что

$$T = \frac{c_m \Delta\tau_0 G'_m}{2,5 i^2 G_m}$$

Допустим далее, что

$$c_m = 390 \frac{\text{ватт сек}}{\text{°C. kg}}$$

Кроме того у сухих трансформаторов при номинальной мощности, к которой относится превышение температуры

$$\Delta\tau_0 = 60^\circ \text{C}$$

имеем:

$$i^2 \cong 3,5.$$

Само собой разумеется, следовало бы рассматривать конечное превышение температуры при длительной максимальной мощности, а также и плотность тока ей соответствующую. Но результат был бы тот же. Конечное превышение температуры пропорционально потерям, а тем самым, и квадрату плотности тока.

Согласно всего сказанного, постоянная времени обмоток для сухих трансформаторов

$$T = \frac{390 \cdot 60}{2,5 \cdot 3,5} \cdot \frac{G'_m}{G_m} = 2700 \frac{G'_m}{G_m} \text{ сек.}$$

Она сильно зависит от количества изоляционного материала, но редко превышает 5 000 секунд. Обмотке сухого трансформатора требуется (при условии невозможности отдачи тепла в окружающую среду) немного больше одного часа для того, чтобы при номинальной мощности получить превышение температуры в 60°C .

НТБ
ДНУЗТ

При помощи уравнения (11а) легко будет убедиться в том, что допустимая максимальная мощность осветительного сухого трансформатора лишь немногим превзойдет величину номинальной мощности. При длительности ее, например, в 4 часа, что вполне приемлемо, имеем

$$\frac{\text{допустимая максимальная мощность}}{\text{номинальная мощность}} = 1,02.$$

Незначительность разницы — поразительная. Она редко предусматривается в эксплуатации и результатом этого являются тяжелые повреждения.

16. СПОСОБНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРА С МАСЛЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ К ПЕРЕГРУЗКЕ.

Эксплуатационному инженеру необходимо знать, что сухой трансформатор мало производителен в осветительном деле. Данные предыдущего исследования должны казаться поразительными. Возникают опасения, что в осветительном деле с трансформаторами не все благополучно. На первый взгляд невозможно даже оценить, в какой мере охлаждение маслом улучшает положение.

Подсчет показывает, что постоянная времени обмотки в значительной мере зависит от плотности тока в меди. Она сильно уменьшается при переходе с воздушного на масляное охлаждение, дающее возможность повышения плотности тока с 2,5 на 3 ампер/ mm^2 . К этому присоединяется и то обстоятельство, что трансформатор с масляным охлаждением требует твердого изоляционного материала меньше, чем сухой трансформатор. Все ведет к тому, что трансформатор с масляным охлаждением скорее достигнет конечного превышения температуры в обмотках.

Оно и действительно так. Конечное превышение температуры измеряется здесь от меди к маслу. А масло, с своей стороны, получает свое конечное превышение температуры над температурой окружающего воздуха. Масло имеет значительную теплоемкость и может находиться в достаточном количестве в трансформаторе. Главную долю суммарного допустимого превышения температуры (согласно норм — $60^\circ C$) принимает на себя масло, тогда как медь нагревается в среднем на $10^\circ C$ выше температуры масла. Обмотка трансформатора с масляным охлаждением, отнесенная к масляной ванне, имеет очень малую постоянную времени, а именно, в 10 раз меньшую постоянной времени обмотки сухого трансформатора.

Отсюда непосредственно следует, что способность осветительного трансформатора с масляным охлаждением к перегрузке зависит исключительно от количества масла. Медь получает в несколько минут свое конечное превышение температуры по отношению к маслу, тогда как масло лишь медленно нагревается. Решение проблемы нагревания осветительного трансформатора переносится с обмотки на масло.

Постоянная времени масла, играющая главную роль в трансформаторах с масляным охлаждением, зависит, конечно, от суммарных потерь трансформатора. Она должна учитывать не максимальное превышение температуры масла, а среднее.

Если

G_0 — вес наличного масла, имеющего в среднем

$\Delta\tau_0 C$ — превышение температуры над воздухом и воспринимающего

НТБ
ДНУЗТ

V — ватт длительных суммарных потерь трансформатора, при чем
 $C_{\delta} \frac{\text{ватт сек}}{^{\circ}\text{C. kg}}$ — теплоемкость масла;

тогда масляная ванна, лишенная отдачи тепла, достигнет окончательного среднего превышения температуры через:

$$T_{\delta} = \frac{c_{\delta} G_{\delta} \cdot \Delta\tau_{\delta}}{V} \text{ сек.}$$

Можно считать

$$c_{\delta} = 1800 \frac{\text{ватт сек}}{^{\circ}\text{C. kg}}$$

и при номинальной мощности

$$\Delta\tau_{\delta} = 40^{\circ}\text{C},$$

тогда получим для постоянной времени масла выражение

$$T_{\delta} = 72000 \frac{G_{\delta}}{V} \text{ сек} \quad (12)$$

Уравнение (12) показывает, что было бы правильно выбирать для осветительного трансформатора количество масла, пропорциональное суммарным потерям. Тогда только можно ожидать от осветительных трансформаторов одинаковую способность к перегрузке. Это отношение веса масла к потерям при полной нагрузке зависит всецело от желательной способности к перегрузке, от отношения желательной максимальной мощности к номинальной, кроме того, конечно, и от длительности максимальной мощности.

Вернемся к уравнению (11а). Пусть в нем
 t — длительность максимальной мощности,
 T — постоянная времени масла и

$$x = \sqrt{\frac{\Delta\tau_{\delta}}{\Delta\tau}}$$

отношение максимальной мощности к номинальной, проще, способность к перегрузке. Необходимо, конечно, принять во внимание, что суммарные потери трансформатора не растут пропорционально квадрату мощности. Потери в железе, как известно, не меняются. Но при обычном распределении потерь ошибка незначительна, кроме того, она дает некоторый желательный запас. Таким образом, можно подсчитывать T_{δ} по измененному уравнению:

$$T_{\delta} = \frac{t_0}{\ln \frac{1}{1 - \frac{1}{x^2}}}$$

Фиг. 4 показывает зависимость необходимой постоянной времени для масла от коэффициента способности к перегрузке при максимальной мощности 4-часовой длительности. Эта кривая является практически прямой. Соответственно этому можно с большой выгодой применить выражение

$$T_{\delta} = 40000 (x - 0,9) \quad (13)$$

для практического определения необходимой постоянной времени для масла. Более того, здесь может быть определена и длительность макси-

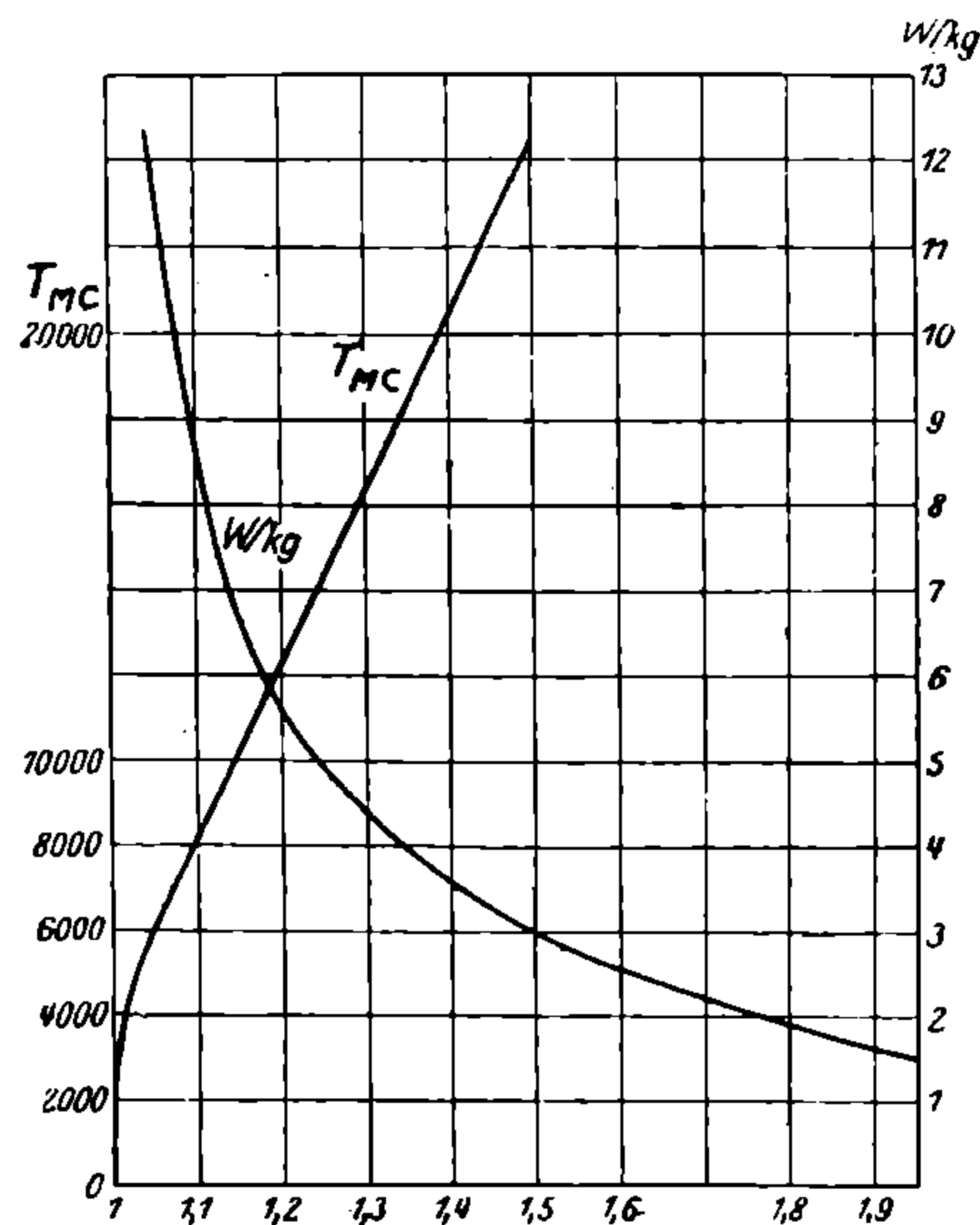
мальной мощности. Действительно, уравнение (13) справедливо для 4-часовой максимальной мощности; для h -часовой максимальной мощности необходимая постоянная времени выразится попросту

$$T_{\dot{\sigma}} = h(x - 0,9) \cdot 10^4 \text{ сек} \quad (14)$$

Данные исследования станут очень наглядными, если принять во внимание и уравнение (12). В этом случае легко определить, сколько ватт суммарных потерь на каждый kg масла может иметь трансформатор при номинальной мощности, если ему предстоит выдержать x -кратную номинальную мощность в продолжение h часов.

Имеем

$$y = \frac{V}{G_{\dot{\sigma}}} = \frac{7,2}{h(x - 0,9)} \text{ W/kg.}$$



Фиг. 4.

Пример. Пусть осветительный трансформатор имеет, при номинальной мощности равной $100 kW$, потерь в железе — $500 W$, в меди — $2500 W$, итого — суммарных потерь — $3000 W$. Его масляная ванна содержит $500 kg$ масла. Какую максимальную мощность выдержит он в продолжение 4 часов?

Имеем

$$V = 3000 \text{ W,}$$

$$G_{\dot{\sigma}} = 500 \text{ kg,}$$

$$h = 4 \text{ часа.}$$

Тогда

$$y = \frac{3000}{500} = 6 \text{ W/kg}$$

и

$$x = \frac{7,2}{4 \cdot 6} + 0,9 = 1,2.$$

Он способен к 20%-й перегрузке.

Этот подсчет не предусматривает того важного обстоятельства, что превышение температуры меди растет с нагрузкой. Но практически это обстоятельство имеет малое значение. Мы имеем всегда дело с умеренными перегрузками, кроме того, предосторожности ради, принимается в расчет более низкое, среднее превышение температуры масла. Если к тому же принять во внимание то, что потери в железе не растут пропорционально перегрузке, то легко убедиться, что выбранный метод подсчета вполне правилен.

Пример ясно показывает, что трансформатор с масляным охлаждением в осветительном деле дает мощность, сильно отличающуюся от мощности сухого трансформатора. Трансформатор с масляным охлаждением способен к большим перегрузкам, тогда как сухой трансформатор практически ограничен в рамках своей номинальной мощности. Это дает эксплуатационному инженеру решающую картину.

Дело не только в том, чтобы напомнить ему о тяжелых ошибках. Какие только требования не предъявлялись к сухому трансформатору? Перегрузки в 30, в 40%. После этого становятся понятными многие несчастные случаи в эксплуатации. Гораздо важнее сознание, что трансформатор с масляным охлаждением легко воспринимает тяжелые толчки нагрузок, что он является крепким и надежным работником. Сухой трансформатор в качестве осветительного почти отпадает.

Экономическая проблема осветительного трансформатора приобретает, таким образом, другой характер. В действительности выяснилось, что можно и должно вести подсчет не по номинальной, а по максимальной мощности. В противном случае возникнут тяжелые ошибки при решении проблемы цены и коэффициента полезного действия осветительного трансформатора.

Для эксплуатационного инженера, кроме того, имеет крупное значение — умение судить о трансформаторах с масляным охлаждением по количеству находящегося в них масла. Он не будет отныне безразлично относиться к стараниям конструктора ограничить по возможности масляную ванну. Для него слишком дорог трансформатор с малым количеством масла.

Уравнение (14) в виде

$$G_0 = 0,14 V h (x - 0,9) \text{ кг} \quad (14a)$$

может быть с успехом применено для испытания предлагаемых трансформаторов. В предложении указываются потери V при номинальной мощности, число часов h максимальной мощности известно, x — это наличная сумма денег. Масло не так дорого и оно могло бы сделать работу трансформаторов более экономичной.

Исследование этого параграфа показывает, насколько неправильно останавливать свой выбор на наиболее дешевом предложении. У осветительных трансформаторов недостаточно сравнивать потери. Исследование показывает также, что учение об эксплуатации должно заниматься вопросом о том, когда появляются конструкции с недостаточной масляной ванной. В этом случае они являются посредниками между эксплуатационным инженером и конструктором.

17. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ.

После выяснения вопроса о действительной способности осветительного трансформатора к перегрузке, можно выдвинуть вопрос о распределении потерь. При рассмотрении годового коэффициента полезного действия осветительного трансформатора обнаружилось в до-

НТБ
ДНУЗТ

статочной мере, насколько существенно распределение потерь между железом и медью. Теперь же эта проблема окончательно созрела. Речь идет о правильном распределении потерь при действительной нагрузке осветительного трансформатора, т.-е. не при номинальной, а при максимальной мощности.

Отношение потерь в меди к потерям в железе уже давно представляет существенную проблему. Тихая, но ожесточенная борьба за это отношение происходит в продолжение десятилетий между конструктором и эксплуатационным инженером. Конструктор знает, что наиболее дешевая конструкция может быть достигнута при одинаковой величине потерь в железе и в меди, эксплуатационный инженер боится потерь холостого хода и требует отношения потерь 1 : 3, 1 : 4, часто 1 : 5. Зачастую требования переходят всякие границы: потери в железе должны быть снижены во что бы то ни стало, притом без всякого учета величины потерь в меди.

Существенная проблема! Она должна быть подробнейшим образом разобрана учением об эксплуатации. Преувеличения всегда, как и в данном случае, обходятся дорого. Противоположность стремлений конструктора и эксплуатационного инженера в наиболее резкой форме сказывается в том, что конструктор стремится повысить коэффициент полезного действия при полной нагрузке, тогда как эксплуатационному инженеру желателен возможно больший годовой коэффициент полезного действия. Эти цели, конечно, далеки друг от друга. Согласно изложенному в параграфе 12, максимальный коэффициент полезного действия может быть достигнут тогда, когда железо и медь принимают на себя одинаковые нагрузки потерь. Максимальный годовой коэффициент полезного действия будет, конечно, связан с равенством электрических годовых потерь в железе и в меди. Осветительный трансформатор имеет в продолжение 8 740 часов в году потери холостого хода, полные же потери в меди, пожалуй, лишь — 800 до 1 000 часов.

Если конструктор наметит идеальное, с его точки зрения, отношение распределения потерь, а именно 1 : 1, то эксплуатационному инженеру окажется желательным отношение 1 : 10. Разница колоссальна и соглашение почти невысказуемо. Теперь становится понятным стремление электрических станций снизить во что бы то ни стало потери в железе. Распределение потерь 1 : 3 или даже 1 : 4, с большим трудом достигаемое конструктором, их все еще мало удовлетворяет.

И все же учение об эксплуатации может показать, что эта трудная проблема не так безнадежна, как это кажется. Во-первых, неправильно то, что, с точки зрения конструирования, дешевизна конструкции связана с равенством потерь в железе и меди. С другой стороны, в такой же мере неправильно и то, что потери в трансформаторе приводят к наименьшим расходам лишь тогда, когда железо и медь потребляют одинаковое число киловатт в продолжение эксплуатационного года.

Трансформаторостроению давно известно, что для наиболее экономичного конструирования трансформатора необходимо, чтобы на его железо и медь были израсходованы одинаковые суммы. Вес железа, следовательно, должен был бы относиться к весу меди, как цена единицы веса обмоточного провода к той же единице веса листового железа, т.-е. 3 : 1.

Этого, как будто, легко достигнуть. Но не следует забывать, что потери пропорциональны весам. Один килограмм железного сердеч-

ника имеет при $10\,000 \frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$ около $1,8 W$ потерь, один килограмм меди — при $1 A/\text{мм}^2$ имеет $2,5 W$ потерь. Если, согласно этому, мы пожелали бы достигнуть одинаковых расходов на медь и на железо, как и одинаковых потерь, то для этого было бы необходимо лишь выбрать совершенно определенную зависимость между электромагнитными нагрузками. Эту зависимость легко установить. Потери в меди пропорциональны квадрату плотности тока i ($A/\text{мм}^2$), потери в железе пропорциональны квадрату индукции B ($\frac{\text{индукционных линий}}{\text{см}^2}$). Из выражения:

$$3 \cdot 1,8 \left(\frac{B}{10\,000} \right)^2 = 1 \cdot 2,5 i^2$$

следует

$$i \frac{B}{10\,000} = 1,47 : 1.$$

Трансформаторостроение стремится ко все большим нагрузкам материала. Оно поднимает плотность тока и магнитную индукцию все выше и выше. Оно приносит все более и более усовершенствованные охлаждательные оборудования с целью экономии на потребляемых количествах железа и меди. Но заботой об отведении тепла вопрос не исчерпывается. Ток холостого хода в сильной мере зависит от индукции. Он намечает допустимую границу для повышения нагрузки железа, тогда как возможность повышения плотности тока остается свободной.

Малые и средние мощности не могут иметь индукций бóльших $13\,000 \frac{\text{линий}}{\text{см}^2}$. В очень больших трансформаторах индукции могут дойти до $15\,000 \frac{\text{линий}}{\text{см}^2}$. Дальнейшее изменение этих величин потребовало бы изобретения новых сортов листового железа.

Согласно этому малые и средние трансформаторы вынуждены были остановиться на плотностях тока в $1,9 A/\text{мм}^2$, а трансформаторы-великаны — на $2,2 A/\text{мм}^2$. Сухие трансформаторы не доходят до величин больше указанных, но малый трансформатор с масляным охлаждением может гораздо лучше использовать свою медь. Мощные трансформаторы имеют мощность тока в $5 A/\text{мм}^2$ и выше.

Конструктор должен задаться или равенством расходов, или равенством потерь. Он мог бы при этом пойти навстречу интересам эксплуатационного инженера. Легко достигнув при охлаждении маслом плотности тока в $2,5 A/\text{мм}^2$, он тут же может получить отношение для распределения потерь равное $1 : 1,7$.

Дело с минимумами расходов и потерь, как вообще с минимумами или максимумами в конструкторском деле, обстоит очень затруднительно. Это могло бы способствовать соглашению с эксплуатационным инженером. Но более точные исследования показывают, что благоразумнее допустить ряд малых отклонений от многих идеальных законов, чем одно большое — от одного закона. Сообразно с этим, конструктор сначала задается лишь наполовину равенством расходов и наполовину — равенством потерь. Таким путем он мог бы притти, и не принимая во внимание интересов эксплуатационного инженера, к отношению потерь $1 : 2$.

Нелишне отметить, что и в данном случае сухой трансформатор оказывается плохой конструкцией. У него слабый охлаждающий

аппарат и он вынужден довольствоваться малыми плотностями тока. Он может быть построен с отношением потерь 1 : 1. Этим самым вопрос о применении его в осветительном деле отпадает.

И эксплуатационный инженер отбросит свой годовой коэффициент полезного действия в область устаревшей теории. После некоторого размышления он придет к выводу, что потери в железе и потери в меди не равноценны. Уже в 14-м параграфе годовой коэффициент полезного действия вынужден был уступить свое место коэффициенту экономичности.

На сцену выступает также разница между дневным и ночным током. Вряд ли найдется электрическая станция, которая не обратила бы внимания на нагрузочную пику. Даже самый неподатливый эксплуатационный инженер под давлением фактов понизит отношение потерь до 1 : 6, если он и обладает теплосиловой установкой. Он убедится в том, что более резкое отношение неизбежно поведет к экономическим невыгодам.

Немало, однако, предприятий, устанавливающих свои осветительные трансформаторы и, таким образом, несущих сами расходы по потерям при трансформации. Если они работают с помощью воды, то потери холостого хода для них почти безразличны, если же работа производится с помощью горючего материала, то нет никакой разницы между дневной и ночной работой. Лишь нагрузочная пика напоминает о слишком больших потерях в меди.

Однако на одно обстоятельство следует обратить внимание. Неправильно подсчитывать отношение потерь при номинальной мощности, при чем безразлично, будет ли или не будет киловатт потерь стоить тех же денег. Для эксплуатационного инженера имеет действительное значение лишь распределение потерь при действительной максимальной мощности, принятой в продолжение осветительного периода за неизменяющуюся.

Исследования предыдущего параграфа показывают, что максимальная мощность осветительного трансформатора с масляным охлаждением по меньшей мере на 20% выше его номинальной мощности. Действительные потери в меди, соответственно этому, на 44% выше указываемых фирмой. Таким образом будет правильным, если городские электрические станции, работающие на угле, умерят свои максимальные требования отношением потерь 1 : 6 при номинальной мощности.

Учению об эксплуатации предстоит еще преодолеть колоссальную разницу между отношениями 1 : 2 и 1 : 6. Конечно, дело не должно сводиться к насильственному выравниванию. Лишь экономические соображения должны явиться решающими факторами. В действительности же, мыслимо и дальнейшее сближение обоих отношений, каждое из которых было вначале выведено односторонне. Для этого необходимо, чтобы конструктор осознал интересы эксплуатации а эксплуатационный инженер изучил невыгодность неестественных конструкций.

В начале конструктор охотно согласится с тем, что малые и средние трансформаторы выгодно строить с несколько более мощным ярмом. Ток холостого хода при этом уменьшится. Охлаждение железного сердечника значительно усиливается. Лучше, конечно, больше использовать железо в том месте, где оно окружено обмоткой, так как длина витка этим укорачивается. Уменьшение потерь в железе путем увеличения сечения ярма не на много удорожит конструкцию.

Конструктор, кроме того, согласится с тем, что в его распоряжении имеется еще ряд средств, могущих изменить распределение потерь, не вызывая при этом значительных расходов, например выбор сердечников с прямоугольным сечением.

Наконец при проектировании осветительного трансформатора можно все же легче соблюдать равенство расходов на железо и медь, чем равенство потерь в них.

С совсем небольшими жертвами, при использовании всех упомянутых возможностей, можно достигнуть отношения потерь 1:3.

При дальнейшем изменении отношения конструкция быстро вздорожает. Как ни затруднительно обстоит дело с увеличением выгоды оборудования, как ни гибки законы проектирования, все же большие отклонения от размеров идеальной конструкции поведут к нежелательным результатам. Эксплуатационный инженер должен твердо помнить, что он в общем начинает терять, если переходит границы отношения 1:4. Он выиграет в коэффициенте экономичности, он выиграет, если угодно, в годовом коэффициенте полезного действия, но он больше теряет на покупной цене и на суммарных потерях.

Вопрос о распределении потерь при номинальной мощности, таким образом, решен в общих чертах. Его решение дает первое основание для заключения о проблеме экономичности осветительного трансформатора.

18. ЭКОНОМИЧНОСТЬ ОСВЕТИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

Весьма затруднительно определить экономическое значение осветительного трансформатора, однако предложенные осветительные трансформаторы требуют, без сомнения, более подробного анализа, чем силовые трансформаторы. Предыдущие исследования дают эксплуатационному инженеру возможность полностью охватить этот вопрос. Необходимо объединить данные этого исследования.

Амортизация и оплата процентов по затраченному на осветительный трансформатор капиталу устанавливаются, конечно, по тем же законам, что и для силового трансформатора. Цена остается главной величиной в проблеме экономичности. Осложнения возникают при оценке потерь энергии.

Сначала следует определить отношение x допустимой максимальной мощности к номинальной. Оно устанавливается, согласно уравнения (14а) по суммарным потерям V (ватт при номинальной мощности и по весу масла G (kg), если дана длительность h (часов) предположенной максимальной мощности. Имеем

$$x = 7,2 \frac{G_0}{V \cdot h} + 0,9.$$

Теперь только могут быть определены действительно ожидаемые потери, состоящие из потерь в железе $V_{ж}$ (ватт) и из потерь в меди $V_{м}$ (ватт) при номинальной мощности. Они равны в железе V ваттам, а в меди $V_{м} \cdot x^2$ (ватт).

После того, как все вспомогательные значения для второй части экономического расчета определены, остается лишь правильно оценить потери энергии. Предыдущий параграф дает необходимые для этого исходные пункты.

НТБ
ДНУЗТ

Нелишне, пожалуй, отметить, что каждое предложение, дающее необходимые величины для экономического расчета, содержит одну из них, а именно, потери в меди при номинальной мощности в скрытой форме.

В предложениях обычно имеется падение напряжения при номинальной мощности и $\cos \varphi = 1$, вместо потерь в меди.

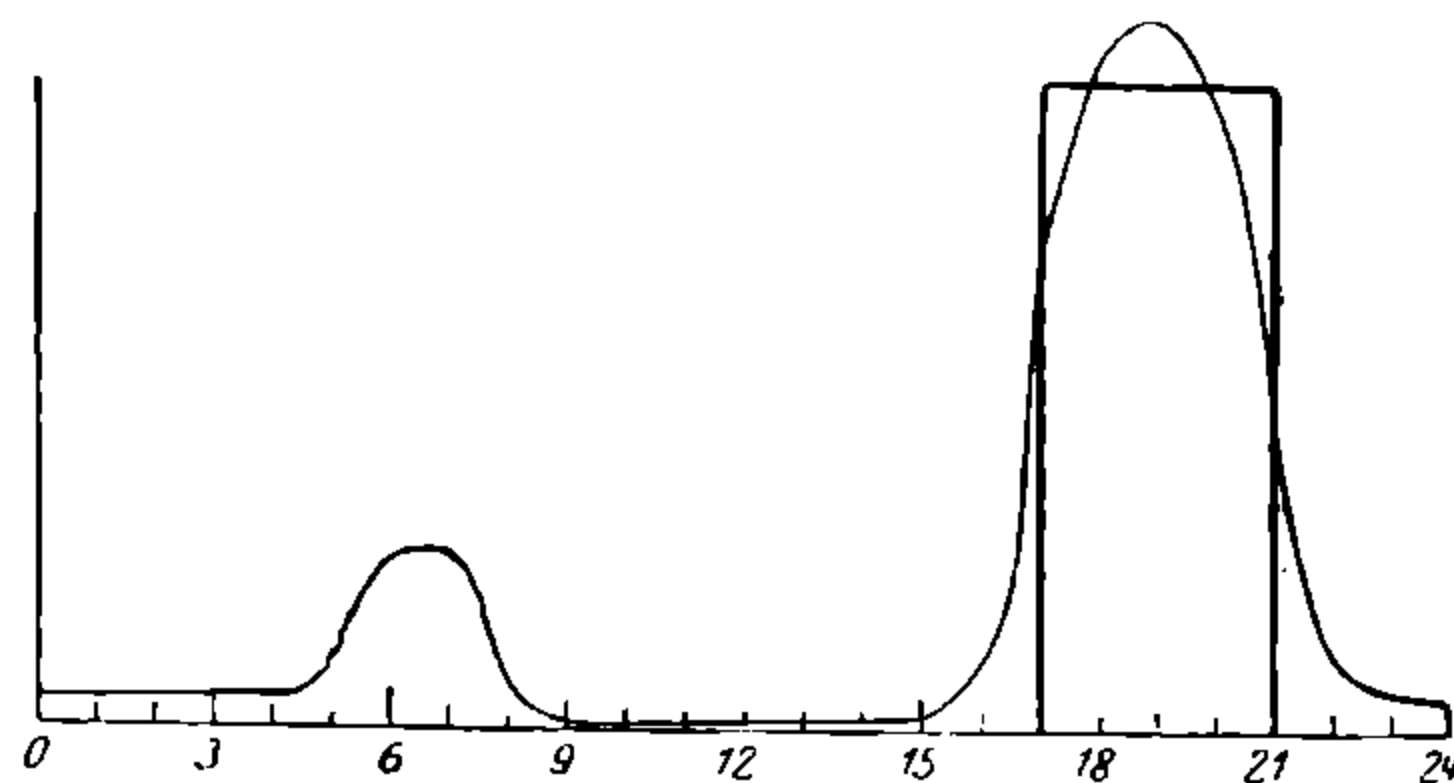
Омическое же падение напряжения при номинальной мощности равно произведению номинального тока I (амп.) на омическое сопротивление r (омов) обмотки.

$$\Delta E_r = I \cdot r.$$

В процентах от номинальной мощности мы будем иметь

$$\Delta E_r = 100 \frac{I \cdot r}{E}.$$

Умножив числителя и знаменателя правой части уравнения на I , получим наверху потери в меди, а внизу — мощность трансформатора. Падение напряжения при номинальной мощности и при $\cos \varphi = 1$ содержит, следовательно, столько процентов от номинального напряжения, сколько потерь в меди при номинальной мощности.



Фиг. 5.

Совершенно точно следует здесь сказать, что для суждения об осветительном трансформаторе никакие другие данные кроме вышеприведенных не нужны. Не имеет смысла запрашивать, например, как это часто бывает, о весе меди. Эти сведения ничего не дадут, кроме знания количества медного лома. Но медный лом трансформатора — величина настолько неточная, что она вряд ли может быть измерена весом меди.

Данный здесь подсчет экономичности проще всего изображается на диаграмме нагрузки фиг. 5. Его точность будет, конечно, в значительной мере зависеть от надежности этой диаграммы. Необходимо этот подсчет исследовать.

Нетрудно обнаружить, что длительность в часах h максимальной мощности будет сильно колебаться в зависимости от времени года. Но при оценке этой существенной величины не следует предаваться чрезмерной осторожности. Существует сильно влияющий выравнивающий фактор — температура воздуха.

Зимой, во время длительных осветительных периодов, воздух холоден. Предписанное превышение температуры трансформатора относится к случаю, когда воздух на расстоянии 1 м имеет 35°C . Летом, в жаркие дни приходится принимать во внимание эту температуру, зимой же мы имеем большой запас. Результаты заметны уже при разнице в 10°C . Если осветительный трансформатор развивает при ма-

ДНУЗТ

ксимальной мощности x^2 V ватт потерь и содержит G_0 kg масла, то ему потребуется больше

$$10 \frac{1800 \cdot G_0}{x^2 \cdot V} \text{ секунд,}$$

чтобы увеличить свой нагрев на 10° С. Таким образом, легко получается один час.

Не следует забывать далее, что действительная диаграмма (конечно не так резко поднимающаяся и падающая, как вышеприведенная, положенная в основание расчета) — обманчива. Действительными ординатами являются не мощности, а квадраты мощностей. К этому присоединяется еще и тот небольшой запас, который вытекает из предположения, что потери в железе растут также пропорционально квадрату перегрузки.

Наконец отметим, что опасность проходит в начальный момент затухания нагрузочного периода. Падающая мощность уже не принимается в расчет. Замедляется лишь охлаждение трансформатора при слишком медленном падении световой нагрузки.

Остается один лишь немаловажный вопрос, имеет ли трансформатор достаточно времени до ближайшего нагрузочного периода для того, чтобы охладиться. Здесь обнаруживаем, что постоянную времени масляной ванны не следует сильно увеличивать.

Известно, что в период охлаждения превышение температуры падает, согласно уравнению

$$\Delta\tau = \Delta\tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}}.$$

Оно достигает одного процента максимального превышения температуры Δt_0 в $4,6 T$ секунд.

Не рекомендуется увеличивать постоянную времени масляной ванны осветительного трансформатора выше 15 000 секунд. При этом предельном значении и 4 часах максимальной нагрузки максимальная мощность была бы все же на 25% выше номинальной.

Нельзя недооценить и того улучшения, которое обеспечивается низкой ночной температурой. Она энергично способствует охлаждению.

Из приведенных здесь рассуждений и из уравнения (14а) следуют весьма ценные выводы для правильного суждения об осветительном трансформаторе. Хорошая конструкция при номинальной мощности имеет приблизительно 1 kg масла на каждые 5 ватт потерь. Тогда трансформатор может легко выдержать 25% перегрузки в продолжение 4 часов и будет удовлетворительно охлаждаться. Больше количество масла не может быть использовано, меньше же количество — угрожает обмотке. Нелишним будет в качестве заключения к исследованию экономичности осветительного трансформатора привести числовой пример.

Пример.

Требуется определить расходы по трансформации для осветительного трансформатора по нижеприведенным данным, если длительность максимальной мощности составляет 4 часа, дневной ток оплачивается в 0,10 марок, ночной ток — 0,04 мар. за киловаттчас

номинальная мощность = 100 kVA

потери в железе = 500 W

падение напряжения при $\cos \varphi = 1 = 2,5\%$.

Вес масла = 500 kg .

Покупная цена = 2 000 марок.

Амортизация и процентное отчисление = 12,5%.

Расходов на капитал

$$2\,000 \cdot 0,125 = 250 \text{ марок в год.}$$

Потери в меди составляют при номинальной мощности

$$2,5 \frac{100\,000}{100} = 2\,500 \text{ W.}$$

Суммарные потери

$$500 + 2\,500 = 3\,000 \text{ W}$$

Согласно расчетов, приведенных в параграфе 16, при 4-часовой максимальной мощности, при определенных потерях и при заданном количестве масла будем иметь допустимую максимальную мощность при перегрузке в 20%. Таким образом, полностью использованный трансформатор имеет мощность 120 kW.

При этой максимальной мощности потери в железе продолжают составлять неизменно 500 W: Потери в меди, конечно, возрастают

$$2\,500 \left(\frac{120}{100}\right)^2 = 3\,600 \text{ W.}$$

Зимой во время интенсивной осветительной нагрузки трансформатор поглощает в продолжение 20 часов мощность в полкиловатта, в продолжение 4 часов — 4,1 kW ежедневно.

Принимая, однако, для всего года 760 часов полной нагрузки и 8 000 часов холостой работы, получим

$$8\,000 \cdot 0,5 = 4\,000$$

дешевых и

$$760 \cdot 41 = 3\,116$$

дорогих киловаттчасов потерь.

Они обойдутся в

$$4\,000 \cdot 0,04 + 3\,116 \cdot 0,1 = 427,6 \text{ марок.}$$

Суммарные расходы по трансформации достигнут, таким образом, величины

$$250 + 427,6 = 677,6 \text{ марок,}$$

или

$$\frac{677,6}{760 \cdot 120} = 0,0074 \frac{\text{марок}}{\text{kW час}}$$

отданной полезной мощности.

Пример показывает, что распределение потерь при принятой расценке тока — неблагоприятно. Потери в меди чрезмерно велики. Поэтому расходы на потери энергии значительно превышают расходы на обслуживание капитала.

Пример, кроме того, показывает, что трансформатор в осветительном деле сильно удорожает энергию.

Вообще экономический расчет дает хорошую картину особенностей осветительного трансформатора и облегчает правильный выбор эксплуатационному инженеру.

НТБ
ДНУЗТ

III. Ток холостого хода.

19. ЗНАЧЕНИЕ ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА.

В предложениях на трансформаторы редко можно найти какие-либо данные о токе, потребляемом работающим вхолостую трансформатором. Конструктор дает их неохотно. Этот ток трудно поддается подсчету, сильно зависит от случайностей и может быть указан лишь с малым приближением.

Эксплуатационный инженер рассматривает ток холостого хода трансформатора как неизбежное зло. Он понимает, что без намагничивающего тока немислима трансформация, но он знает и то, что этот ток холостого хода является безваттным током, ухудшающим сдвиг фаз в рабочей сети и генераторах.

Долгое время мало обращали внимания как в силовом, так и в осветительном деле на ток холостого хода трансформатора. Да он и действительно мал в сравнении с током холостого хода моторов. Вот почему силовые установки, покупающие электрическую энергию, получают в широких пределах безваттную мощность бесплатно. Однако, они должны удерживать определенный угол сдвига фаз и достигают это целесообразным использованием моторов. Улучшение трансформатора немногим может помочь, если потребляющая установка требует значительных безваттных мощностей. Поэтому при покупке трансформатора для подобной установки конструктору не приходится предъявлять тяжелых требований.

Конструктор постепенно доводил нагрузку железа до все более и более значительных величин. Намагничивающий ток возрастал с нецелесообразной быстротой. Дошло до того, что и эксплуатационный инженер обратил на это внимание. Таким путем возникла проблема тока холостого хода в качестве новой эксплуатационной проблемы.

Большая электрическая станция, обладающая большим количеством малых трансформаторов, может при известных обстоятельствах сама накопить громадную безваттную мощность для трансформации. Не следует упускать из виду, что редко дело обходится лишь однократной трансформацией. С центральной станции полная мощность передается сначала на линию передачи; при этом мощные трансформаторы трансформируют один раз с низкого на высокое напряжение. На конце линии передачи зачастую имеется сеть среднего напряжения, обеспечивающая дальнейшее распределение энергии. Местные сети являются следующей ступенью, работающей еще на высоком напряжении. Таким образом, дело часто сводится к двухкратной, нередко и четырехкратной трансформации.

Если каждый трансформатор потребляет лишь 10% тока холостого хода, то этим он вызывает 20%, часто 40% общей безваттной

мощности. Это становится вредным. Эксплуатационный инженер начинает замечать плохо использованные сети, плохо нагруженные генераторы. Ему становится ясным, что он должен предъявлять определенные требования конструктору, но став на этот путь, он впадает в другую крайность.

За последние годы часто выдвигались жесткие требования. Они могли быть выполнены лишь при повышенных расходах. Эксплуатационный инженер охотно брал на себя эти расходы, но конструктор все же выполнить требований не мог.

Здесь необходима разъяснительная работа учения об эксплуатации. Необходимо соглашение между эксплуатационным инженером и конструктором.

Трансформаторостроение давно уже не стремится к увеличению тока холостого хода. Насыщения в настоящее время колеблются между 13 000 и 15 000 $\frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$. Намагничивающий ток, как бы незначителен он ни был, может причинить конструктору много хлопот явлениями, возникающими вследствие этого тока. У малых трансформаторов с масляным охлаждением появлялись значительные добавочные потери при холостом ходе, возникавшие при сильном насыщении железа. Поэтому остановились на величине около 13 000 $\frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$ повышая ее лишь при более мощных конструкциях. Для этого не потребовалось никаких объяснений с эксплуатационным инженером.

В то же время трансформаторостроение стремится к увеличению плотностей тока в меди. Это действует на величину тока холостого хода в обратную сторону. Если при неизменившейся конструкции ток полной нагрузки повышается, то этим самым оставшийся неизменным ток холостого хода относительно уменьшается. Если при уменьшении поперечного сечения меди объем обмоток уменьшается, то и железный сердечник уменьшается, и силовые линии укорачиваются. Ток холостого хода падает.

Уже с давних пор, независимо от требований эксплуатации, величина тока холостого хода понижалась. Возникает вопрос, следует ли предъявлять еще какие-либо требования конструктору. Более того — какие требования, вообще, можно предъявить. Нельзя требовать физически невозможного.

Невозможно, конечно, ответить на все эти вопросы без подробного исследования. Ясно и то, что мелкие вопросы, разрешимые усилиями самого конструктора, здесь рассматриваться не будут.

20. ТОК ХОЛОСТОГО ХОДА И РАБОЧЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ.

Часто эксплуатационный инженер несправедлив к конструктору. Он обнаруживает, что трансформаторы в эксплуатации расходуют большие токи холостого хода, замечает ухудшение угла сдвига фаз и немедленно устраняет эти конструкции от работы. Он, не задумываясь, готов приписать им какой-либо конструктивный недостаток.

Обычно проверочные испытания показывают, что все в порядке. Ток холостого хода, оказывается, не так опасен. Трансформатор остался тем же, что и при приемке.

Что произошло? Если недостаток не обнаружен в трансформаторе, то, очевидно, он должен где-то скрываться в эксплуатации. Здесь-то и обнаруживается, что рабочее напряжение нередко достигает

величин значительно больших, чем номинальное, например, вместо 6 000 V оказывается 6 600.

Рабочее напряжение оказывается выше, конечно, не по вине обслуживающего персонала. Для этого имеются основательные причины. В отдаленных концах сети лампы плохо горят, моторы работают неудовлетворительно. Возникает необходимость поднять напряжение на центральной станции. Ясно, что во всем этом конструктор не повинен.

Однако, нередко упрекают конструктора в том, что его трансформаторы не выносят и малых повышений напряжения. При этом ему показывают старые трансформаторы, нечувствительные к повышениям напряжения. В результате виновным оказывается конструктор, оттого что он своевременно не нашел общего языка с эксплуатационным инженером.

Для пользы дела необходимо совместное рассмотрение ими кривой намагничивания железа (фиг. 6). Она показывает с какой необычайной быстротой возрастает намагничивающий ток (практически представляющий собой ток холостого хода) при увеличении насыщения железа. При 13 000 индукц. линий/ cm^2 на каждый сантиметр пути силового потока требуется 8,5 ампервитков. Если напряжение возрастает на 10%, то и индукция соответственно возрастает на 10%. При 14 000 индукц. линий/ cm^2 железо требует 15 ампервитков, т. е. намагничивающий ток почти удвоился.

Прежние трансформаторы имели небольшие насыщения. Железо было в те времена настолько скверным, что приносило большие потери холостого хода, несмотря на незначительные индукции. Конечно, при этом был незначительным и намагничивающий ток. Лучший железный лист способствует уменьшению величины потерь, но отнюдь не улучшению кривой намагничивания. При 10 000 индукционных линий/ cm^2 на 1 погонный cm требуется 4 ампервитка, при 11 000 — около 5. Вот почему прежние конструкции легко переносят повышения напряжения.

В настоящее время конструктор должен требовать от эксплуатационного инженера точного указания номинального напряжения. Ему незнакома эксплуатация. Было бы безответственно оплачивать невнимательность эксплуатационного инженера излишней тратой материала и понижением величины магнитной индукции.

Правда, эксплуатационный инженер не всегда может точно указать, под каким напряжением придется работать его трансформатору. Ему неизвестно, в каком направлении пойдет развитие его сети. Кроме того, он имеет право требовать приспособленности трансформатора к работе в любом месте сети.

Но, несмотря на это, не следует все же требовать слабой нагрузки железа. Не следует забывать, что между низким и высоким напряжением существует определенное отношение. Отчасти и по этой причине следует правильно указывать высокое напряжение.

Если все же эксплуатационному инженеру не представляется возможным указать предполагаемое рабочее напряжение с точностью до 5% и даже 10%, то, по меньшей мере, он не должен скрывать этого от конструктора. Для этих случаев верным средством являются отклонения.

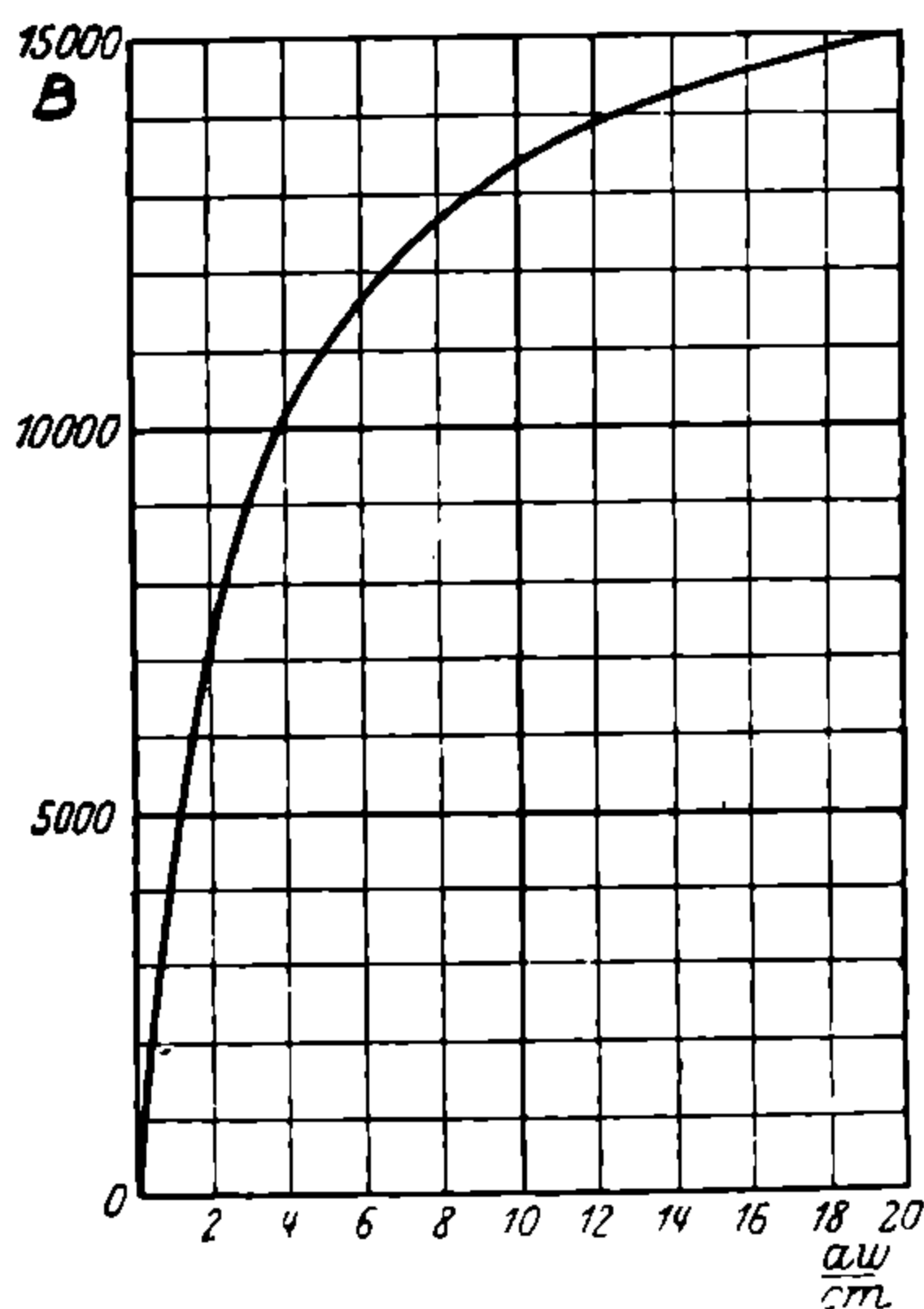
При налаженной эксплуатации колебание напряжения не выйдет из рамок 10%. Обмотка высокого напряжения выполняется с регулировкой в $\pm 5\%$. Это не ведет к значительному ее удорожанию. Однако,

токи холостого хода будут этим понижены, так как индукция будет оставаться в определенных границах.

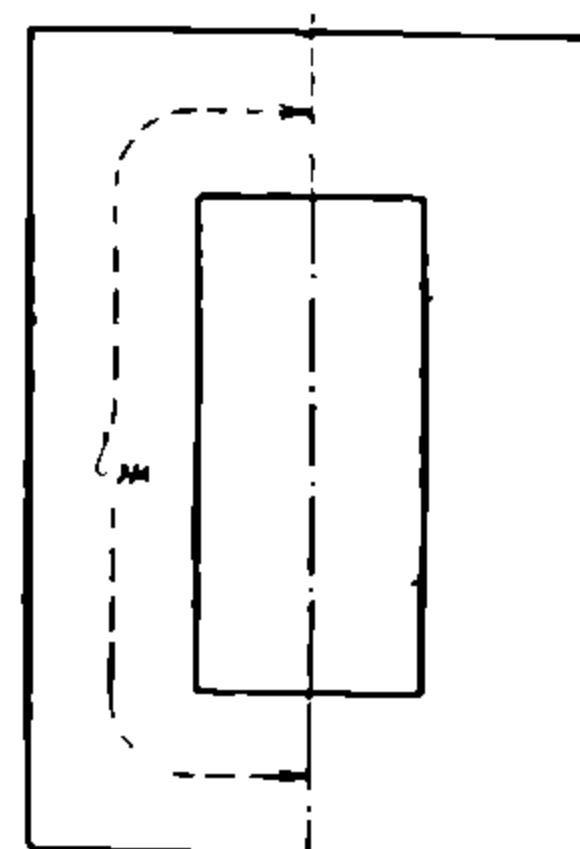
В последние годы ответвления стали неотъемлемой составной частью трансформатора. Конструктор кой-чему научился. Он не выжидает требований эксплуатационного инженера и сам предусматривает в трансформаторе ответвления.

Однако, и при этом положении вещей проблема тока холостого хода продолжает оставаться значительной эксплуатационной проблемой. Вопреки вышесказанному она все еще представляет собой неточную проблему. Даже и ответвления не в состоянии воспрепятствовать значительным колебаниям тока холостого хода.

Как ни неопределенен ток холостого хода трансформатора, все же теоретическое исследование его вполне возможно. Относительно простым способом можно показать эксплуатационному инженеру, в каких случаях он должен сказать свое веское слово и, наоборот, в каких случаях он требует невозможного. Легче всего, однако, показать внутреннюю связь между проблемой тока холостого хода и другими эксплуатационными проблемами.



Фиг. 6.



Фиг. 7.

21. ЗАВИСИМОСТЬ ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА ОТ ПОТЕРЬ В ЖЕЛЕЗЕ.

Для эксплуатационного инженера не является излишним узнать величину намагничивающего тока трансформатора. Этот подсчет должен быть прост. Но с первого взгляда может показаться, что он может интересовать в гораздо большей мере конструктора, чем учение об эксплуатации.

Однако, доведя этот подсчет до конца, мы убедимся в неожиданности его результатов, особенно для эксплуатационного инженера. Он с удивлением обнаружит, что ему надлежит чрезвычайно внимательно относиться к вопросу о токе холостого хода.

Как известно, ток холостого хода состоит из активного тока, расходуемого на потери в железе, и реактивного тока, намагничивающего железный сердечник. Активный ток пропорционален, конечно, потерям.

НТБ
ДНУЗТ

Он составляет столько же процентов от тока при полной нагрузке, сколько потери в железе — от полной мощности. В сущности, он весьма мал в сравнении с величиной всего тока холостого хода. Главную роль играет намагничивающий ток.

Известно, что ампервитки, потребные для создания магнитного потока с насыщением в B ($\frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$), пропорциональны этой индукции B , а также и пути (т.-е. длине средней индукционной линии) $l_{\text{ж}}$ (фиг. 7).

Имеем

$$\sqrt{2} I_0 w = l_{\text{ж}} f(B) \quad (15)$$

где I_0 — эффективное значение намагничивающего тока, w — число витков первичной обмотки. Число намагничивающих ампервитков для одного сантиметра пути магнитного потока — $f(B)$, можно взять непосредственно из кривой намагничивания, полученной при постоянном токе. Так как принято учитывать максимальные значения индукции, то необходимо взять и максимальное значение намагничивающего тока $\sqrt{2} \cdot I_0$.

Умножим обе части уравнения (15) на значение напряжения одного витка, которое, как известно, равно

$$e = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} F_{\text{ж}} B \cdot \nu \cdot 10^{-8} \text{ V},$$

где $F_{\text{ж}}$ — поперечное сечение железа в см , ν — число периодов. Умножим обе части уравнения (15) на e , тогда получаем уравнение

$$I_0 \cdot w \cdot e = \pi \nu \cdot 10^{-8} B \cdot f(B) l_{\text{ж}} F_{\text{ж}}.$$

В левой части произведение $w \cdot e$ дает первичное напряжение, в правой — произведение $l_{\text{ж}} F_{\text{ж}}$ равно объему железа. Если отнесем намагничивающий ток к единице полного тока и подсчитаем в процентах, то получим

$$100 \frac{I_0}{I} I w \cdot e = \pi \nu \cdot 10^{-6} B f(B) l_{\text{ж}} F_{\text{ж}}.$$

От объема нетрудно перейти к весу $G_{\text{ж}}$ железного сердечника; нетруден и переход от веса к потерям в железе $V_{\text{ж}}$, если известно, что при 50 периодах и 10 000 индукц. линий/ см^2 каждый килограмм железного сердечника потребляет $k_{\text{ж}}$ ватт. Тогда имеем

$$V_{\text{ж}} = k_{\text{ж}} G_{\text{ж}} (B \cdot 10^{-4})^2.$$

При удельном весе железного сердечника, равном $7,5 \text{ kg/dm}^3$, получим

$$100 \frac{I_0}{I} \cdot I \cdot w \cdot e = \frac{\pi \nu \cdot 10^{+5}}{7,5 k_{\text{ж}}} \cdot \frac{f(B)}{B} V$$

Слева выражение $I \cdot w \cdot e$ представляет собой номинальную мощность, к единице которой мы относим потери в железе. Лучше всего и потери выразить в процентах. Тогда имеем, что удельное значение намагничивающего тока равно

$$j_0 = 100 \frac{I_0}{I} \%,$$

а удельное значение потерь в железе

$$v_{\text{ж}} = 100 \frac{V_{\text{ж}}}{I w \cdot e}$$

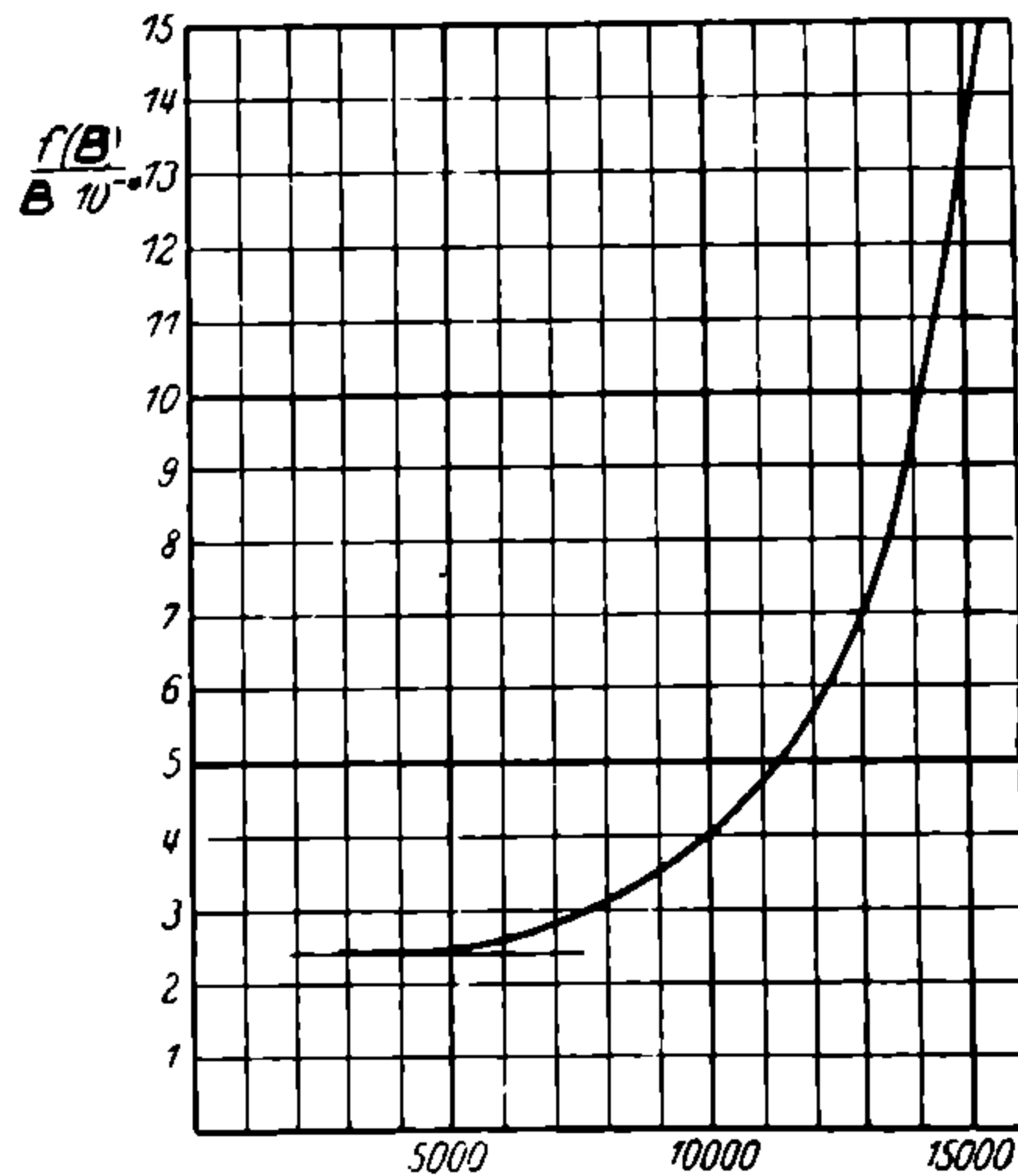
Следовательно, при 50 периодах в секунду, уравнение будет иметь вид

$$j_0 = \frac{2,1 f(B)}{k_{ж} B 10^{-4}} v_{ж} \% \quad (16)$$

Это уравнение гласит:

Намагничивающий ток трансформатора пропорционален потерям в железе, отнесенным к единице мощности.

Он зависит только от этих потерь, от индукции и от удельных потерь в железе $k_{ж}$. От формы железного сердечника он совершенно не зависит.



Фиг. 8.

Прежде чем сделать из уравнения (16) необходимые выводы для изучения об эксплуатации, следует отметить некоторые стороны его практического применения. Трансформаторостроение употребляет железный лист двух сортов: легированный и высоколегированный. Первый имеет величину потерь больше $2,3 \text{ W/kg}$, второй — около $1,8 \text{ W/kg}$ (если при этом считать и неизбежные добавочные потери).

Особо важное значение имеет, конечно, выражение

$$\frac{f(B)}{B 10^{-4}}$$

На основании кривой намагничивания фиг. 6 легко получаем кривую фиг. 8. Она дает возможность легко определить величину намагничивающего тока.

22. ТОК ХОЛОСТОГО ХОДА И МОЩНОСТЬ.

После исследования предыдущего параграфа эксплуатационный инженер получает ясное представление о рассматриваемом вопросе. Ему придется отказаться от многих неправильных воззрений.

Интересно в первую очередь изучить зависимость величины тока холостого хода от мощности трансформатора. Как уже выяснено в главе 1, в одном каком-либо типовом ряде нагрузка железа, т.-е. магнитная индукция B в нем, не меняется. Потери в целом, также и потери в железе растут, подобно весам, пропорционально третьей степени линейных измерений конструкции.

НТБ
ДНУЗТ

Мощность, как это известно из параграфа 3, растет пропорционально четвертой степени измерений. Откуда заключаем что в пределах определенного типового ряда удельные потери в железе обратно пропорциональны линейным измерениям и в то же время корню четвертой степени из мощности.

Ток холостого хода уменьшается по мере возрастания мощности. Если при 100 *kW* он составляет 10%, то уже при 10 000 *kW* он составит не более 3%.

Отсюда — два вывода. В первую очередь ясно, что конструктор по мере возрастания мощности, предъявляет железу все большие и большие требования. При малых трансформаторах он довольствуется индукцией в 13 000 $\frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$, при 100 000 *kW* он легко допускает и 15 000 $\frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$.

С другой стороны, эксплуатационный инженер убеждается в том, что опасность угрожает со стороны многочисленных малых трансформаторов распределительной сети. Мощные трансформаторы, расположенные в начале и в конце линии передачи, мало способствуют ухудшению работы, так как они потребляют небольшие токи холостого хода.

Особенное значение для эксплуатационного инженера имеет осознание того факта, что вопрос о токе холостого хода внутренне связан с вопросом о потерях в железе. Все будет в порядке, если от конструктора требуют лишь очень малые потери в железе. Ток холостого хода будет уменьшаться одновременно с потерями. Затруднение возникает при требовании больших ограничений одновременно как для тока холостого хода, так и для потерь (хотя с первого взгляда подобное требование и кажется вполне естественным), что выполнимо лишь за счет изменения магнитной индукции.

Эксплуатационный инженер должен понимать, что предписывая и потери в железе, и ток холостого хода, он этим самым предписывает и определенную магнитную индукцию. Но последняя определяет цену конструкции. Подобное предписывание обходится дорого. Более того, может случиться, что к конструктору будет предъявлено невыполнимое требование.

Множитель

$$\frac{f(B)}{B \cdot 10^{-4}}$$

имеет определенное минимальное значение, понижение которого физически невозможно.

В последние годы сильно возросли стремления к понижению потерь в железе. Это вынудило конструктора почти забросить низко-сортное железо. Легированное железо, являвшееся до мировой войны весьма распространенным материалом, теперь почти изъято из трансформаторостроения.

Высоколегированное железо значительно понизило удельную величину потерь в трансформаторостроении, однако, оно не могло улучшить кривой намагничивания. Ток холостого хода в двух одинаково построенных железных сердечниках оказался даже несколько большим при сердечнике из лучшего железа.

Эксплуатационный инженер, успешно усвоивший вопросы, связанные с потерями в железе, не может понять, почему возникают большие трудности с током холостого хода. Необходимо поэтому, чтобы уче-

ние об эксплуатации занялось проверочным расчетом тока холостого хода трансформатора.

Если учесть все вышеприведенные данные и считать, что конструктор допустит величину индукции в $13\,000 \frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$ (при малых и средних мощностях), то окажется, что при применении высоколегированного железа ток холостого хода, выраженный в процентах, будет приблизительно в 9 раз больше, чем процентное значение потерь в железе. Это временное практическое данное должно быть, однако, точнее исследовано.

23. ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР МЕЖДУ ЯРМОМ И КЕРНОМ. НОРМИРОВАННЫЕ ТОКИ ХОЛОСТОГО ХОДА.

Намагничивающий ток трансформатора имеет своим назначением преодоление не только магнитного сопротивления железной части магнитопровода. При более точном исследовании пути магнитного потока мы обнаруживаем мало заметные, но весьма большие сопротивления, которые также необходимо преодолеть. Для этого необходим добавочный намагничивающий ток.

Железный сердечник составляется из отдельных полос железного листа. Невозможно, однако, выполнить из железа абсолютно непосредственный переход кернов к железу ярма. Обычно здесь образуется воздушный зазор, существование которого вызывается необходимостью монтирования обмотки на керне.

Известен ряд конструкций с чередующимися в стыке листами керна и ярма. Подобный стык способствует лучшему прохождению магнитного потока.

Во избежание воздушного зазора приходится прибегать, таким образом, к несколько затруднительному набору чередующихся листов керна и ярма.

Подобные керны являются, как оказалось, удачной конструкцией. Но все же и чередующиеся листы создают зазор порядка $0,1 \text{ мм}$.

И здесь, как и в случае полного воздушного зазора, мы имеем дело, правда с меньшим, намагничивающим током.

При $13\,000 \frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$ для преодоления этого зазора в одном керне потребуется

$$\frac{0,8 \cdot 0,01 \cdot 13\,000}{\sqrt{2}} = 73 \text{ AW}$$

независимо от величины трансформатора.

В типовом ряде напряжение в одном витке падает пропорционально поперечному сечению железа, т. е. квадрату линейных измерений и тем самым и корню квадратному из мощности.

Одновременно с этим падают и ампервитки, создаваемые обмоткой при полной нагрузке. Расход мощности на воздушный зазор, отнесенный к единице этих ампервитков, растет, следовательно, пропорционально квадратному корню из мощности.

Трансформатор в 100 kVA трехфазного типа имеет, приблизительно, напряжение одного витка $4,5 \text{ V}$. Ампервитки при полной нагрузке с первичной и вторичной стороны выразятся

$$\frac{100\,000}{3 \cdot 4,5} = 7\,400 \text{ AW.}$$

Ампервитки, расходуемые на воздушный зазор, составляют приблизительно 1% от полного числа ампервитков.

Маломощный трансформатор в 1 *kVA* будет расходовать 10% тока полной нагрузки на преодоление воздушного зазора. Чем меньше мощность, тем больше намагничивающий ток, расходуемый на воздушный зазор. По мере роста числа маломощных трансформаторов в эксплуатации величина суммарного намагничивающего тока становится относительно все менее выгодной, как об этом отчасти можно судить и из выводов предыдущего параграфа.

Маломощный трансформатор вырождается. Он вынуждает конструктора все более и более понижать индукции. При весьма малых мощностях, как-то при делителях напряжения, могут встретиться трудности такого порядка, что конструктор не будет в силах их разрешить.

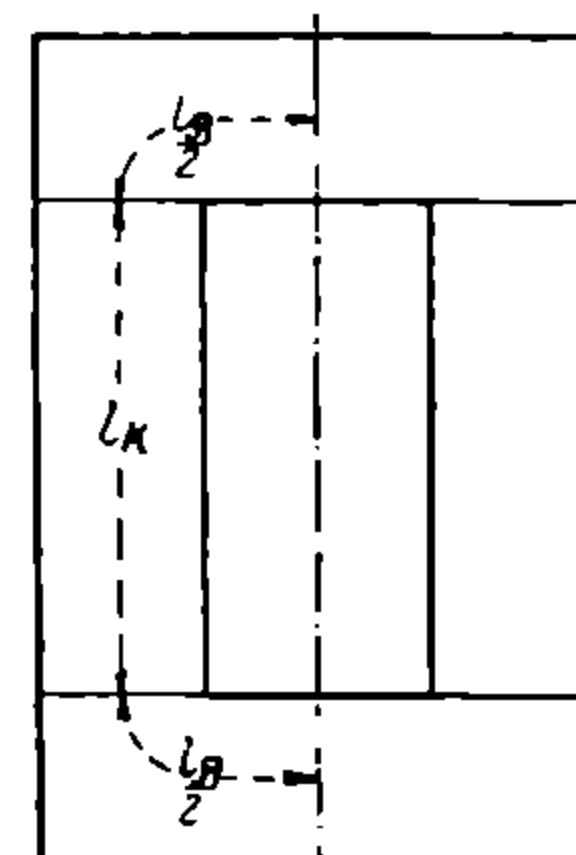
В старых установках еще до сих пор встречаются местные сети с относительно высоким напряжением, например, 500 *V*. В этом случае у каждого дома ставится небольшой трансформатор от 1 до 2 *kW*, трансформирующий напряжение 500 *V* на 110 *V* для питания ламп накаливания. Подобное распределение объяснялось желанием сэкономить медь в местной распределительной сети и удешевить питание ламп, но при этом возникли громадные потери энергии на трансформацию и значительные безваттные токи.

Учет намагничивающего тока, расходуемого на воздушный зазор, облегчает окончательное практическое суждение по вопросу о токе холостого хода. В предыдущем параграфе было указано, что при $13\,000 \frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$ ток, намагничивающий железо (в процентах) должен быть в 9 раз больше потерь в железе (выраженных в процентах от мощности). При мощности в 100 *kVA* придется безусловно допустить индукцию порядка $13\,000 \frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$. Для суммарного намагничивающего тока отношение возрастет с 9 приблизительно до 10.

Положив это число в основу при подсчетах для малых и средних мощностей, мы придем к совершенно приемлемым результатам. Трансформатор в 100 *kVA* с масляным охлаждением имеет около 600 *W* потерь в железе. При этом его ток холостого хода равен 6%. Эксплуатационный инженер с этим согласится.

В нормах Чехословацкого электротехнического союза (изд. 1925 г.) находим следующие данные для трансформаторов трехфазного тока с масляным охлаждением при длительной работе.

Номинальная мощность <i>kVA</i>	6 000 вольт потери холостого хода <i>W</i>	Ток холостого хода % %
5	70	16
10	115	13
20	190	10
30	255	9
50	370	8
75	490	7
100	600	6



Фиг. 9.

Эти данные соответствуют отношению 10—11. Чехословакия — страна угля. Ее нормы по трансформаторостроению являются доказа-

тельством того, что между конструктором и эксплуатационным инженером мыслимо соглашение также и в вопросе о токе холостого хода.

Так как конструктор, принимая во внимание высшие гармоники намагничивающего тока, в последнее время избегает индукций больших $13\,000 \frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$ для мощностей в 100 kVA , а эксплуатационный инженер, с своей стороны, довольствуется отношением 10 — то можно в качестве практического решения вопроса о токе холостого хода принять требование

$$\frac{\text{ток холостого хода в } \%}{\text{потеря холостого хода в } \%} = 10.$$

24. МАЛОМОЩНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ. ЯРМО С УВЕЛИЧЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ.

При мощностях в 100 kVA и ниже становится все затруднительнее удержаться в рамках вышеуказанных соотношений, так как этому препятствует воздушный зазор между керном трансформатора и его ярмом. Индукция должна поэтому постепенно уменьшаться.

Трудно упрекнуть конструктора в том, что он неуступчив в вопросах магнитной нагрузки железа. Дело для него не в излишнем расходе железа. Для него гораздо существенней вопрос об увеличении длины витков, связанном с увеличением поперечного сечения керна. Чем меньше трансформатор, тем тоньше провод. Цена килограмма изолированного провода растет очень быстро, если диаметр провода уменьшается. Чем меньше трансформатор, тем меньшую роль играет расход железа и тем большую роль играет потребность в медном проводе.

По этим причинам маломощному трансформатору пришлось искать выход в увеличенном сечении ярма. Упорно отстаивая определенные индукции в керне трансформатора, конструктор податлив в вопросах увеличения размеров поперечного сечения ярма. Сечение ярма не обуславливает собой удлинения витков. Его размеры конструктору безразличны. У маломощных трансформаторов принято увеличивать сечение ярма. С ослаблением магнитной индукции в какой-либо части магнитопровода ослабляется и намагничивающий ток. Кроме того, уменьшаются и потери в железе.

Необходимо рассмотреть в какой зависимости находятся намагничивающий ток и потери холостого хода при увеличенном сечении ярма. Необходимо установить какое влияние может вообще оказать это увеличение сечения.

Пусть в керне (длину которого, согласно фиг. 9, обозначим через l_k) магнитная индукция равна $B \left(\frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2} \right)$. Поперечное сечение ярма примем в α раз больше поперечного сечения керна. Тогда магнитная индукция в ярме будет

$$\frac{B}{\alpha} \text{ индукц. линий/см}^2.$$

Длину части ярма, относящейся к одному керну (фиг. 9), обозначим через l_n .

Если для каждого сантиметра длины керна потребуется $f(B)$ ампер-витков, то для каждого сантиметра длины ярма потребуется $f\left(\frac{B}{\alpha}\right)$ ампер-

витков. Следовательно, необходимые для возбуждения ампервитки пропорциональны сумме

$$l_s \cdot f(B) + l_n f\left(\frac{B}{\alpha}\right)$$

Потери холостого хода будут пропорциональны

$$l_s + \frac{l_n}{\alpha}.$$

Таким образом имеем дробь

$$\frac{l_s \cdot f(B) + l_n f\left(\frac{B}{\alpha}\right)}{l_s + \frac{l_n}{\alpha}}$$

При ярме с увеличенным сечением выраженный в процентах намагничивающий ток, таким образом, равен

$$i_0 = \frac{2,1}{k_{ж} \cdot B \cdot 10^{-4}} \frac{l_s f(B) + l_n f\left(\frac{B}{\alpha}\right)}{l_s + \frac{l_n}{\alpha}} v_{ж} \%.$$

Правильно построенный трансформатор без увеличенного сечения ярма потребляет для кернов то же количество железа, что и для ярма. Поэтому, приблизительно, имеем

$$l_s = l_n$$

и для нашего исследования является действительной дробь

$$\frac{f(B) + f\left(\frac{B}{\alpha}\right)}{1 + \frac{1}{\alpha}}.$$

Эта дробь, конечно, меньше единицы. Намагничивающий ток падает быстрее магнитной индукции. Увеличение сечения ярма — удачное решение, отличающееся большой гибкостью.

Понижение магнитной индукции в керне с $13\,000 \frac{\text{инд. линий}}{\text{см}^2}$ на $10\,000$ уменьшает известное нам отношение тока холостого хода с 10 , приблизительно, на

$$10 \cdot \frac{8,5 + 4,0}{8,5 \left(1 + \frac{1}{1,3}\right)} = 8,3,$$

в случае действительности кривой намагничивания фиг. 6.

Практическая предельная величина этого отношения тока холостого хода равна приблизительно 8 . Его можно достигнуть лишь при очень больших сечениях ярма. Поэтому редки конструкции с сечением ярма, увеличенным больше, чем на 30% .

При желании сохранить это соотношение тока холостого хода равным 10 и для трансформаторов с увеличенным сечением ярма, конструктор при более или менее крупных мощностях не встретит в этом затруднений. При 100 kVA он может несколько превзойти величину $13\,000 \frac{\text{инд. линий}}{\text{см}^2}$. При маломощных конструкциях, у которых одного увеличения сечения ярма недостаточно, трудности несомненно остаются.

Внутренняя связь между вопросами о токе холостого хода и о потерях в железе позволяет чрезвычайно ясно учесть трудности, связанные с сухим трансформатором.

Сухой трансформатор работает с очень небольшими плотностями тока в меди.

При тех же мощностях и том же напряжении на одном витке для него требуется значительно большее сечение меди, чем для трансформатора с масляным охлаждением. Уже по одному этому для его обмотки требуется большое место и, следовательно, и больший керн.

Воздух охлаждает хуже масла, а потому требуются большие расстояния между обмотками. Воздух, кроме того, и изолирует хуже масла. Железный сердечник сухого трансформатора в связи с этим приобретает еще большие размеры.

У сухого трансформатора неизбежны большие потери в железе наряду с малыми потерями в меди. Для многих предприятий, особенно для тепловых центральных станций со световой нагрузкой, он совершенно непригоден.

Большие потери в железе вызывают, конечно, и большие токи холостого хода. Отношение тока холостого хода у сухого трансформатора такое же, как и у трансформатора с масляным охлаждением. Потери в железе являются решающими.

В конечном счете разница из-за нагрузки в меди. Эта нагрузка увеличивает мощность, уменьшает удельные потери, а вместе с ними и ток холостого хода. Таким образом, лучшее охлаждение имеет и другие преимущества, кроме удешевления конструкции.

При мощных трансформаторах с водяным охлаждением медь выдерживает нагрузки такого порядка, что потери в железе и ток холостого хода становятся незначительными даже при индукции в $15\,000 \frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$

Проблема тока холостого хода трансформатора является простейшей проблемой трансформаторостроения. При поисках новых путей к увеличению использования материала попутно сама по себе решается и проблема тока холостого хода.

Эта проблема нам представляется действительно простой. Мы уже давно установили известные предельные значения индукций и не собираемся их в дальнейшем повышать. Больше того, мы уже имели значения индукций выше теперешних. Подобное отступление можно отметить и в остальном электромашиностроении.

Эти понижения индукций усиливают впечатление, что они останутся незыблемыми. Тем самым изо дня в день все легче и легче решается проблема тока холостого хода как для эксплуатационного инженера, так и для конструктора.

IV. Соединения.

25. СОЕДИНЕНИЯ У ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

Собственно говоря, вопросы о том, как построить обмотку трансформатора, как разместить отдельные катушки, как их между собой соединить и, наконец, как отдельные фазы соединить в одну какую-либо систему — все эти вопросы касаются, главным образом, конструктора. На крышке трансформатора с масляным охлаждением имеются зажимы для включения в сеть. Эксплуатационного инженера несколько не интересует вопрос о том, что происходит внутри кожуха до тех пор, пока все в порядке. По меньшей мере так может показаться.

Известны различные способы соединений трехфазных трансформаторов, даже если речь идет только о соединении отдельных фаз. Каждое из этих соединений имеет свои особенности и для каждого вида работы требуется свой способ соединения фаз.

Вопрос о способе соединения нельзя исключить из ряда эксплуатационных вопросов, так как это повело бы к печальным результатам.

Для обмоток трансформатора трехфазного тока имеются три способа соединения фаз: соединение звездой, соединение треугольником и соединение зигзагом. Если эксплуатационный инженер не пред'являет никаких специальных требований конструктору по поводу способов соединения фаз, то с уверенностью можно считать, что сам конструктор осуществит как со стороны высокого, так и со стороны низкого напряжения — соединение звездой.

Нетрудно и об'яснить, почему конструктор вначале остановится на соединении «звезда-звезда». Оно — самое дешевое и выполнимо с меньшим числом витков. При нем сечение провода относительно больше, чем при соединении треугольником. Немного витков из толстого провода занимает места меньше, чем много витков из тонкого провода.

Конструктор ищет всегда пути к самой дешевой конструкции. В этом праве ему нельзя отказать. К дешевой конструкции стремится и эксплуатационный инженер. Если дешевое соединение «звезда-звезда» должно быть заменено другим, более дорогим, то эксплуатационный инженер в особенности должен знать причину этой замены.

Простой вопрос о способе соединения осложняется при рассмотрении неравномерного распределения нагрузки в отдельных фазах, обычно возникающего в осветительном деле. Силовые трансформаторы в отличие от осветительных равномерно нагружены во всех своих фазах; для них соединение «звезда-звезда» оказывается вполне приемлемым.

Осветительный трансформатор и здесь оказывается трудно выполнимой конструкцией. Учение об эксплуатации трансформатора было бы значительно проще, если бы не существовало осветительного дела со

своими непостоянными нагрузками. Если специальные соединения фаз для целей освещения значительно удорожают трансформаторы, то следует выяснить в какой мере эти расходы оправдываются.

Еще и по сей день во многих осветительных установках существуют трансформаторы с соединением фаз «звезда-звезда». Неопытный эксплуатационный инженер не знает опасностей, а потому их не боится.

Есть еще одно обстоятельство, толкающее конструктора и эксплуатационного инженера к совместному обсуждению вопроса о способе соединения фаз. Дело не только в характере опасностей, вытекающих из плохих способов соединений, но и в величине этих опасностей. Конструктор охотно будет вести расчеты по самым тяжелым случаям, дабы избежать в дальнейшем нежелательных упреков, а эксплуатационный инженер учитывает лишь действительно возможные опасности. Вопрос о способе соединений фаз несомненно является одной из проблем учения об эксплуатации.

Наконец, не только налаженная эксплуатация толкает эксплуатационного инженера к изучению различных способов соединений фаз трансформатора.

В каждом деле бывают аварии и повреждения. Эксплуатационный инженер должен время от времени приподнимать крышку трансформатора.

Часто оказывается возможным, не прерывая подачи тока, исправлять те или другие тяжелые повреждения. Имеется ряд способов соединений на случай повреждения. Эксплуатационный инженер должен с ними познакомиться. Перерыв в подаче тока — весьма нежелательное явление, и эксплуатационный инженер не откажется и от паллиативных способов в том случае, если последние дают ему возможность, хотя бы короткое время продолжать подачу тока.

Нет сомнения в том, что эти вспомогательные соединения должны быть рассмотрены учением об эксплуатации, для которого они играют большую роль, чем для учения о трансформаторостроении.

26. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И МАГНИТНОЕ РАВНОВЕСИЕ.

Для того чтобы иметь правильное представление о трудностях вопроса о соединениях, необходимо ясное понимание происходящих в трансформаторе физических процессов. Прежде чем приступить к изучению способов соединения, небесполезно в несколько грубых чертах нарисовать картину действия трансформатора.

К первичной обмотке трансформатора приложено напряжение, находящееся в любой момент в электрическом равновесии с противодействующими напряжениями. Этими противодействующими напряжениями являются падения напряжения от омического и индуктивного сопротивлений первичной обмотки и главным образом напряжение индуктированное магнитным потоком трансформатора.

Всякое нарушение электрического равновесия вызывает возникновение тока, восстанавливающего магнитный поток, а тем самым и равновесие. Следовательно, в первичной обмотке трансформатора при холостом ходе протекает лишь ток, возбуждающий магнитный поток, а именно намагничивающий ток.

Магнитный поток образует в каждом витке, его охватывающем, такое же напряжение по тому же закону. Поэтому во вторичной обмотке возникает напряжение, относящееся к напряжению, индуктированному

в первичной обмотке, как число витков вторичной обмотки относится к числу витков первичной. Это напряжение вторичной обмотки и используется для питания внешних цепей.

Но, протекая по вторичным обмоткам, этот ток создает свой магнитный поток в железном керне. Этот магнитный поток не должен нарушать основного потока, так как электрическое равновесие в первичных обмотках должно сохраниться во что бы то ни стало. Таким образом в первичной обмотке к намагничивающему току присоединяется еще и некий добавочный ток, уравнивающий в магнитном отношении ток внешней нагрузки. К электрическому равновесию напряжений в первичной обмотке присоединяется магнитное равновесие нагрузочных ампервитков обеих обмоток.

Это двойное равновесие и характеризует работу трансформатора в любой момент, при каждом случае в эксплуатации. В затруднительных случаях в эксплуатации главную роль играет магнитное равновесие. В трехфазных трансформаторах со многими путями для магнитного потока это относится ко многим группам ампервитков.

Если бы процессы восстановления равновесия легко и свободно протекали в трансформаторе, то не возникало бы и многих трудностей, вызываемых сложными случаями нагрузок. Однофазный трансформатор не знает никаких трудностей. Но в многофазных трансформаторах неравномерные нагрузки фаз создают большие трудности. В этих случаях, вследствие своеобразного соединения фазовых токов (или магнитных потоков), нелегко удовлетворить одновременно требованиям электрического и магнитного равновесия, и требованиям данного способа соединения. У этих трансформаторов дело доходит часто до резких нарушений электрического или магнитного равновесия в отдельных фазах; эти нарушения могут быть уничтожены лишь уравнительными токами, протекающими от фазы к фазе. В таких условиях картина работы трансформатора сильно искажается, с чем эксплуатационный инженер не может примириться.

При симметричном соединении звездой без нулевого провода все три фазовых тока равны между собой и равномерно сдвинуты по фазе друг относительно друга. Первичная обмотка трехфазного трансформатора выполняется звездой без нулевого проводника. При сдвиге фаз в 120° между токами нагрузки со стороны низкого напряжения, но при неравенстве этих токов (что часто бывает в осветительном деле), в первичной обмотке должны были бы возникнуть токи, находящиеся между собой в той же зависимости, что и токи вторичной обмотки. Это неизбежно произошло бы согласно закону магнитного равновесия, но этого случиться не может, так как тому воспрепятствует соединение звездой.

Мы видим, что проблема соединений трудна и важна. Но неправильности в работе могут возникнуть не только вследствие неудачного соединения фазовых токов. В трехфазных кернах, принятых в Европе, связаны между собой и фазовые магнитные потоки. В обоих ярах эти потоки соединяются в звезду. Таким путем возникает новое препятствие, не допускающее одностороннего изменения фазового магнитного потока. Электрическое равновесие отдельных фаз, следовательно, встречает новые трудности на своем пути.

Эти простые, общедоступные размышления должны заставить эксплуатационного инженера задуматься над ними. Его будет интересовать вопрос о том, к каким мерам самопомощи прибегает трансформатор, вынужденный к ненормальной работе из-за неправильного выбора

способа соединений. Он пожелает узнать и последствия этой ненормальной работы. Соединять обмотки трансформатора по способу «звезда-звезда» для осветительного дела — это по меньшей мере легкомыслие. Нельзя рассчитывать на равенство осветительных нагрузок в фазах. Равномерное распределение числа присоединенных осветительных единиц между фазами еще не означает равномерного распределения нагрузок. Все зависит от настроения потребителей. Они включают и выключают свет, когда им заблагорассудится. Остается лишь рассчитывать на любую фазовую нагрузку.

27. СОЕДИНЕНИЕ «ЗВЕЗДА-ЗВЕЗДА» В ОСВЕТИТЕЛЬНОМ ДЕЛЕ.

Самым поучительным и в то же время самым простым случаем является случай полной нагрузки одной фазы. Он мало вероятен в эксплуатации, но он дает ясное представление о вопросе. Он должен быть исследован учением об эксплуатации, а именно, для случая соединения звездой без нулевого провода со стороны первичной обмотки, а со стороны вторичной — соединения звездой, конечно, с нулевым проводом.

Не повредит ясности, но сильно облегчит исследование вопроса, если мы примем, что в первичной и вторичной обмотке имеется одинаковое число витков, или, иначе говоря, что трансформатор работает с передаточным числом 1 : 1. Вместо магнитного равновесия ампервитков в этом случае можно будет просто говорить о равенстве токов нагрузки.

Самые крупные осложнения вопроса мы будем иметь, конечно, в случае (как это принято в Европе при построении трехфазных типов трансформаторов), когда фазовые магнитные потоки соединяются в двойную звезду. Однако, для полноты решения вопроса следует заняться также и американским типом, при котором три совершенно самостоятельных однофазных трансформатора образуют одну трехфазную трансформаторную группу. Эта группа предоставляет магнитным потокам полную самостоятельность и, таким образом, с точки зрения нашей проблемы является более простой. Ее поэтому рассмотрим во вторую очередь.

Фиг. 10 изображает наш случай, подлежащий рассмотрению. Во вторичной обмотке имеем лишь в одной фазе ток нагрузки I , в первичной же во всех трех токи i_1 , i_2 , i_3 . Три магнитных потока в фазах обозначим Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 .

При данном соединении для первичных токов можно написать равенство

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad . (17)$$

Также и три магнитных потока, соединенных в звезду, дают в сумме нуль

$$\overline{\Phi}_1 + \overline{\Phi}_2 + \overline{\Phi}_3 = 0.$$

Магнитное равновесие токов нагрузки должно иметь место в каждом из трех замкнутых путей для магнитного потока. Поэтому справедливы следующие уравнения

$$\begin{aligned} I - i_1 + i_2 &= 0 \\ I - i_1 + i_3 &= 0 \\ i_2 - i_3 &= 0 \end{aligned}$$

Из уравнения (17) и из группы уравнений (18) следует, что

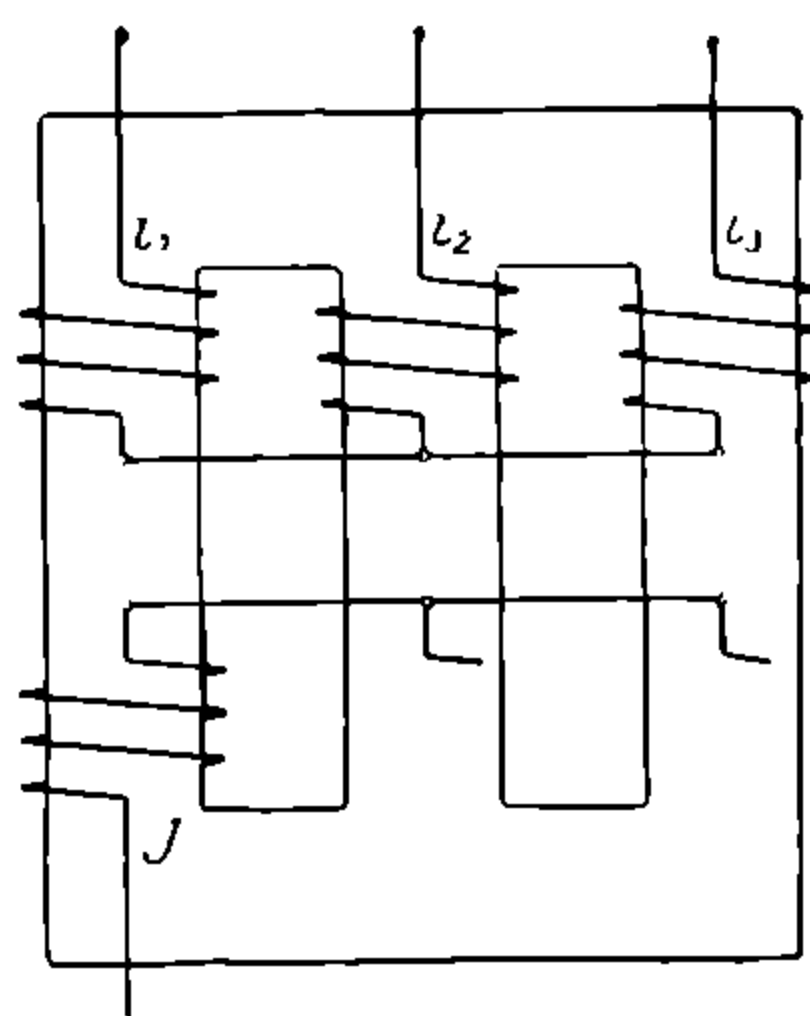
$$i_1 = \frac{2}{3} I.$$

$$i_2 = i_3 = -\frac{I}{3}$$

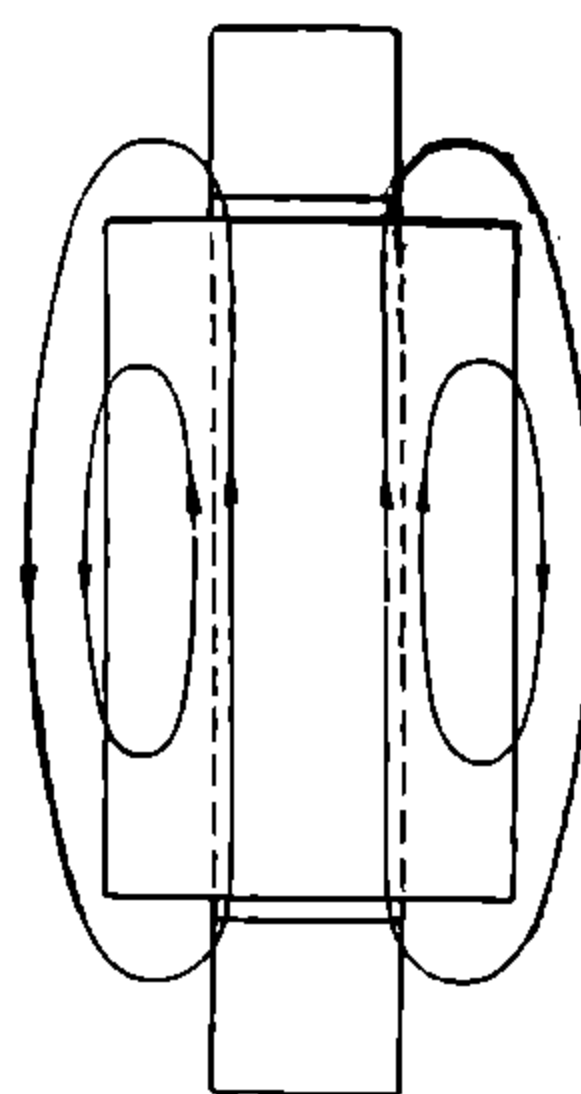
Однофазная вторичная нагрузка на деле сказывается во всех трех фазах первичной обмотки. Эта картина распределения нагрузки в фазах первичной обмотки совершенно неприемлема. Безнадежно, конечно, стремиться к преобразованию однофазных нагрузок в выравненные трехфазные нагрузки при помощи неподвижных трансформаторов. Как известно, эта задача разрешима лишь при помощи вращающихся умформеров. Но все же будет весьма неприятно констатировать, что в двух фазах первичной обмотки возникает сдвиг фаз в 60° ¹⁾, несмотря на то, что нагрузка вторичной обмотки безындукционна.

В главной фазе первичной обмотки нагрузка также безындукционна. Она содержит две трети нагрузки вторичной обмотки. Последняя треть будет поровну суммироваться из токов сильно сдвинутых по фазе.

Плохое распределение нагрузок является наименьшим злом обыкновенного соединения «звезда-звезда» без нулевого провода со стороны первичной обмотки. Гораздо опаснее то обстоятельство, что на каждом



Фиг. 10.



Фиг. 11.

керна отсутствует магнитное равновесие. Из фиг. 10 видим, что на двух кернах ток идет лишь по первичной обмотке. Далее, на третьем кerne, нагруженном вторично, одна треть ампервитков остается без магнитного противовеса.

Внимательнее присматриваясь к этому случаю, мы обнаруживаем, что все три керна одинаково возбуждены. Все они имеют добавочные ампервитки возбуждения по одной трети нагрузочных ампервитков. Более того, эти три добавочные ампервитка совпадают по фазе. Возникает, следовательно, добавочный однофазный магнитный поток, проходящий через все три керна и замыкающийся через воздух (фиг. 11)²⁾. Он связан с обмотками всех кернов и, конечно, будет вызывать с первичной и с вторичной стороны известные напряжения.

¹⁾ Равносторонний треугольник токов превращается в прямую, так как $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ является в данном случае алгебраической суммой $\frac{2}{3} + \left(-\frac{1}{3}\right) + \left(-\frac{1}{3}\right) = 0$.

Примеч. переводчика.

²⁾ Этот однофазный магнитный поток образуется из потоков в трех кернах, одинаково меняющих свою величину и направление одновременно во всех кернах. Поэтому эти потоки не могут замыкаться через ярмо.

Прим. редактора.

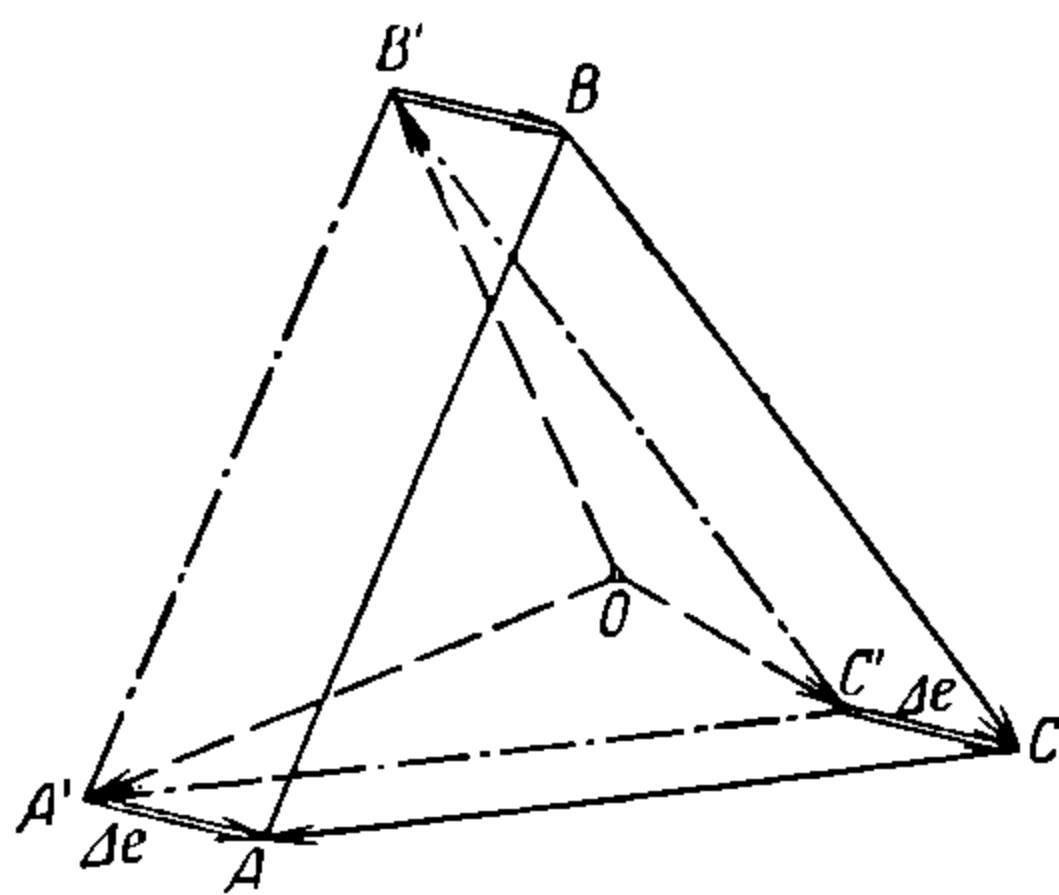
НТБ
ДНУЗТ

Добавочный однофазный магнитный поток является крупным недостатком соединения «звезда-звезда» без нулевого провода со стороны первичной обмотки.

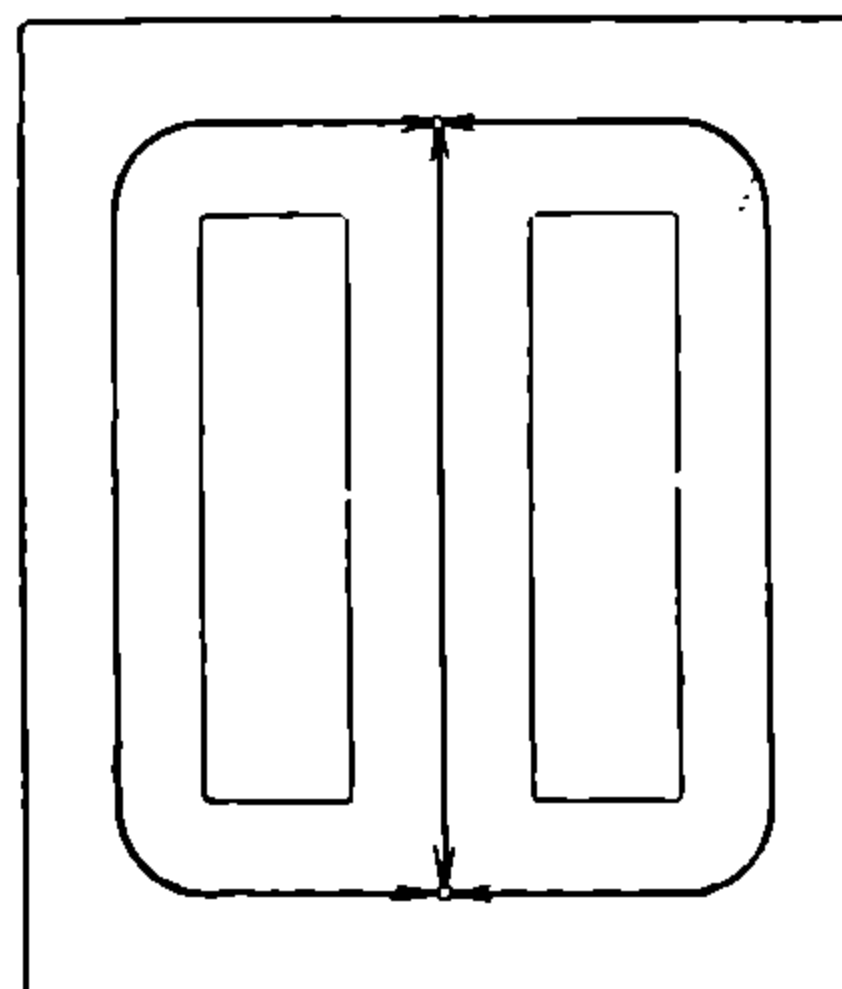
Он приводит к целому ряду неприятных последствий, которыми эксплуатационный инженер должен заинтересоваться. Их следует здесь же показать.

Однофазный добавочный поток не является потоком рассеяния. Он охватывает, так же как и главный магнитный поток, первичную и вторичную обмотки. Он образует добавочное напряжение, которое со стороны первичной обмотки вместе с внутренним напряжением обмотки (индуктированным главным потоком) уравнивает напряжение, приложенное извне. Со стороны же вторичной обмотки это добавочное напряжение, суммируясь с напряжением, созданным главным магнитным потоком, образует фазовое напряжение.

При этом представлении о роли добавочного напряжения мы невольно могли бы прийти к мысли, что добавочный поток безвреден, так как он практически не может повести к падениям напряжения. Но эта мысль неверна.



Фиг. 12.



Фиг. 13.

Здесь вступает в свои права соединение звездой главного магнитного потока. Если бы картина напряжений осталась бы неизменной, т.-е. если бы нулевая точка O , несмотря на возникновение добавочного потока, не сдвинулась относительно центра тяжести треугольника, приложенного напряжения ABC (фиг. 12), то главный поток должен был бы вызвать фазовые напряжения OA' , OB' и OC' со стороны первичной обмотки. В каждом из трех кернов поток был бы пропорционален этим напряжениям. Но это невозможно из-за соединения звездой трех фазовых потоков (фиг. 13), ибо три вектора OA' , OB' и OC' в этом случае не образуют замкнутого треугольника¹⁾. Для этого не хватит вектора AA' .

Соединение звездой трех фазовых потоков вызывает сдвиг нулевой точки обмотки в точку O' (фиг. 14), при чем должно быть

$$OO' = AA',$$

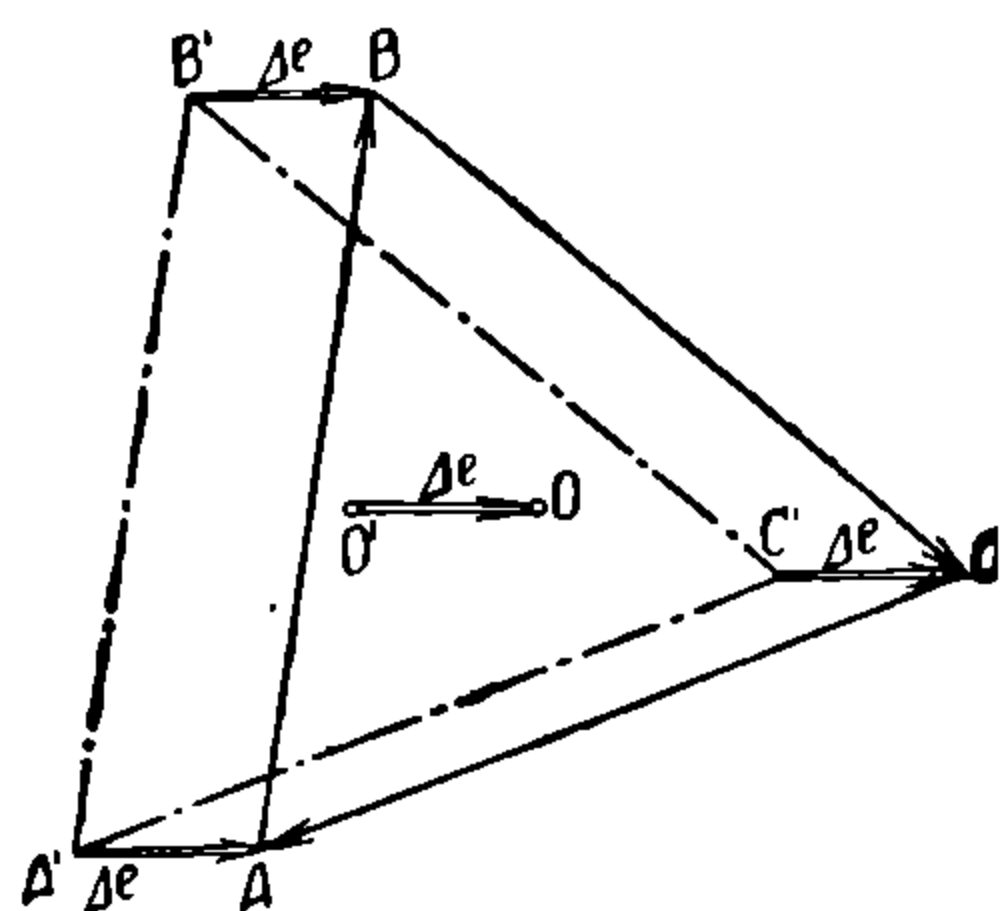
ибо только в этом случае замкнется треугольник, составленный из векторов $O'A'$, $O'B'$, $O'C'$. Магнитный поток, соединенный звездой, сдвигает нулевую точку обмотки в сторону центра тяжести им образуемого треугольника напряжений. Ниже это будет доказано.

Фиг. 14 является действительной картиной напряжений. Вектора $O'A$, $O'B$ и $O'C$ являются действительными фазовыми напряжениями

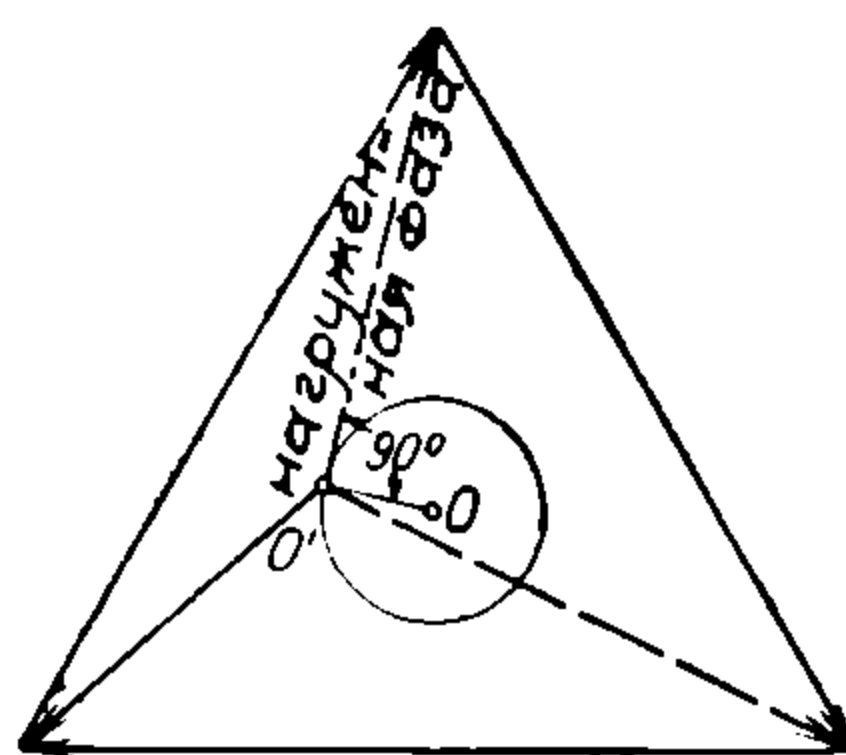
¹⁾ Так как $\overline{\Phi_1} + \overline{\Phi_2} + \overline{\Phi_3} = 0$: то должно $\overline{OA'} + \overline{OB'} + \overline{OC'} = 0$, т.-е. вектора $\overline{OA'}$, $\overline{OB'}$ и $\overline{OC'}$ должны образовать замкнутый Δ .

в первичной и вторичной обмотке, образованными суммой главного и добавочного потоков. Практически, из-за наличия добавочного потока мы все же приходим к существованию падения напряжения.

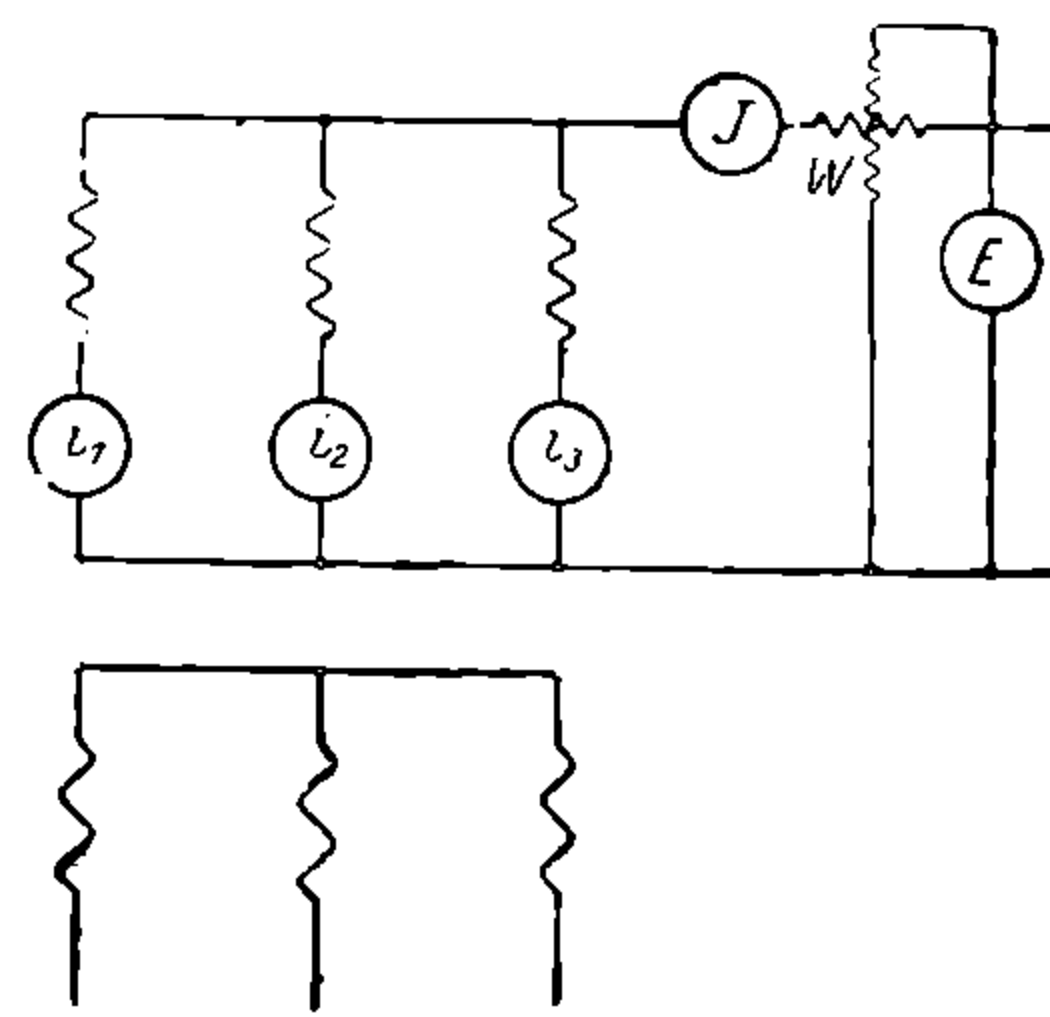
Фаза добавочного напряжения, сдвигающая нулевую точку, зависит, конечно, от угла сдвига фаз нагрузки. При данном токе однофазной нагрузки и разных углах сдвига фаз нулевая точка будет перемещаться по окружности, описанной из нулевой точки при равномерной трехфазной нагрузке как центра, радиусом равным добавочному напряжению ¹⁾. Случай, изображенный на фиг. 15, соответствует однофазной безындукционной нагрузке.



Фиг. 14.



Фиг. 15.



Фиг. 16

Величина этого добавочного напряжения практически имеет важное значение. Ее не легко подсчитать, но относительно не трудно измерить. Для этого необходимо пропустить однофазный переменный ток, равный току одноплечей нагрузки через три параллельно соединенных фазы первичной обмотки и измерить напряжение у зажимов этой параллельной группы. Это напряжение и будет равно напряжению, индуцированному однофазным переменным потоком, при условии, если ток равномерно распределяется по всем трем обмоткам. При этом, конечно, в полученный от измерения результат входит и омическое падение напряжения. Но можно, согласно фиг. 16, включить в цепь ваттметр для определения угла сдвига фаз между током и напряжением. При этом не трудно будет определить омическое падение напряжения.

В электротехническом институте Люблянского Университета этим способом был испытан сухой трансформатор в 9 kVA, 1 500/220 V, 50 периодов. Соединение соответствовало фиг. 16. В результате получились следующие данные:

E	I	$\cos \varphi$		i_2	i_3
94	3,4	0,33	1,14	1,14	1,14
152	5,3	0,28	1,76	1,76	1,76
199	7,5	0,27	2,5	2,5	2,5
241	9,2	0,26	3,05	3,05	3,05

Токораспределение было совершенно равномерным, а влияние омического сопротивления обмотки незначительным.

¹⁾ См. Основы Эл-ки К. А. Круг. 1926 г. стр. 263.

Току полной нагрузки в 3,45 А, возбуждающему добавочный поток, соответствовало бы, согласно измерениям, добавочное напряжение около 275 В, т.-е.

$$100 \cdot \frac{275 \cdot \sqrt{3}}{1500} = 31,8\%,$$

в случае учета и омического падения напряжения.

При однофазной полной нагрузке, как выяснено выше, следует учитывать лишь одну треть этой величины. Но и 10% от фазового напряжения величина чрезмерная для добавочного напряжения. Фиг. 15 показывает, что при однофазной световой нагрузке одно фазовое напряжение увеличилось почти на полную величину добавочного напряжения, тогда как оба других несколько уменьшились.

Но это не исчерпывает вопроса. Добавочное напряжение, кроме того, зависит от мощности трансформатора. В этом легко убедиться на основании следующих рассуждений.

Допустим, что мы увеличили размеры трансформатора в x раз, сохранив, однако, плотность тока в меди и магнитную индукцию в железе прежними. При этом, как известно, главный магнитный поток возрастет пропорционально второй степени x , так же как и ампервитки обмотки; мощность же возрастет пропорционально четвертой степени x .

Фазовое напряжение при том же числе витков пропорционально главному магнитному потоку, добавочное же—добавочному потоку. Но последний растет вместе с числом ампервитков. Кроме того уменьшается его магнитное сопротивление, так как длина линий увеличивается в x раз, а сечение—в x^2 раз. В результате добавочное напряжение растет в x раз скорее, чем фазовое напряжение, и, будучи отнесено к последнему, оно становится пропорциональным корню четвертой степени из мощности.

Опасности, связанные с добавочным потоком, кажутся при больших мощностях (если судить по данным вышеприведенного опыта) большими, чем они есть в действительности. У мало мощного трансформатора, взятого для опыта, магнитная индукция и плотность тока, конечно, малы. Только начиная с такой мощности, при которой достигнуты обычные границы магнитной индукции и плотности тока, вступает в силу вышеприведенный закон роста.

Во втором издании своей книги «Die Transformatoren» на стр. 46 (Springer, Berlin 1925) автор приближенно подсчитывает магнитное сопротивление однофазного магнитного потока. Согласно этого подсчета, между сопротивлением R и диаметром керна d можно написать зависимость

$$R = \frac{1}{3d} \quad (19)$$

Принимая в вышеупомянутом трансформаторе магнитную индукцию в 10 000 инд. линий в кернах, имевших диаметр в 90 мм, при коэффициенте заполнения в 70% имеем: поперечное сечение железа керна

$$\frac{9^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,7 = 44,5 \text{ см}^2$$

напряжение одного витка

$$4,44 \cdot 44,5 \cdot 10\,000 \cdot 10^{-8} = 1 \text{ В}$$

и число ампервитков

$$\frac{9\,000}{3 \cdot 1} = 3\,000 \text{ А В.}$$

Так как величина магнитного сопротивления однофазового добавочного потока будет равна

$$R = \frac{1}{3 \cdot 9},$$

то величина добавочного потока в трех ядрах, созданного током полной нагрузки, будет

$$\frac{4\pi}{10} \cdot 3000 \sqrt{2} \cdot 3 \cdot 9 \text{ линий,}$$

а главный магнитный поток

$$44,5 \cdot 10000 \text{ линий.}$$

Тогда имеем удельное добавочное напряжение

$$100 \cdot \frac{\frac{4\pi}{10} \cdot 3000 \cdot \sqrt{2} \cdot 3 \cdot 9}{44,5 \cdot 10000} = 32,2\%,$$

хорошо согласующееся с данными опыта.

Таким образом, уравнение (19) дает удовлетворительную величину для подсчета точного значения добавочного напряжения для любой конструкции. Следует обратить внимание на то, что уравнение (19) дает возможность точно наметить закон роста добавочного напряжения.

У трансформаторов с масляным охлаждением удельное добавочное напряжение больше, чем у сухих трансформаторов. Первые обходятся при той же индукции главного магнитного потока меньшими диаметрами ядра. У них значительно меньший главный магнитный поток и, следовательно, большее число ампервитков, а также и большее магнитное сопротивление для добавочного потока. Сравнительный подсчет лучше всего освещает эту разницу.

Пример. Пусть трансформатору в 100 kVA при одинаковых индукциях для сухого типа потребуются диаметр ядра в 160 мм, а для типа с масляным охлаждением — диаметр ядра 140 мм. Число ампервитков при полной нагрузке у трансформатора с масляным охлаждением будет в

$$\left(\frac{160}{140}\right)^2 = 1,3 \text{ раза}$$

больше, чем у сухого, так как магнитный поток у первого в 1,3 раза меньше, чем у второго. Большая плотность тока у типа с масляным охлаждением дает возможность выполнить это отношение.

Магнитное сопротивление для добавочного потока у типа с масляным охлаждением больше в

$$\frac{160}{140} = 1,14 \text{ раза.}$$

Несмотря на это, его добавочный поток окажется в

$$\frac{1,3}{1,14} = 1,14 \text{ раза}$$

больше.

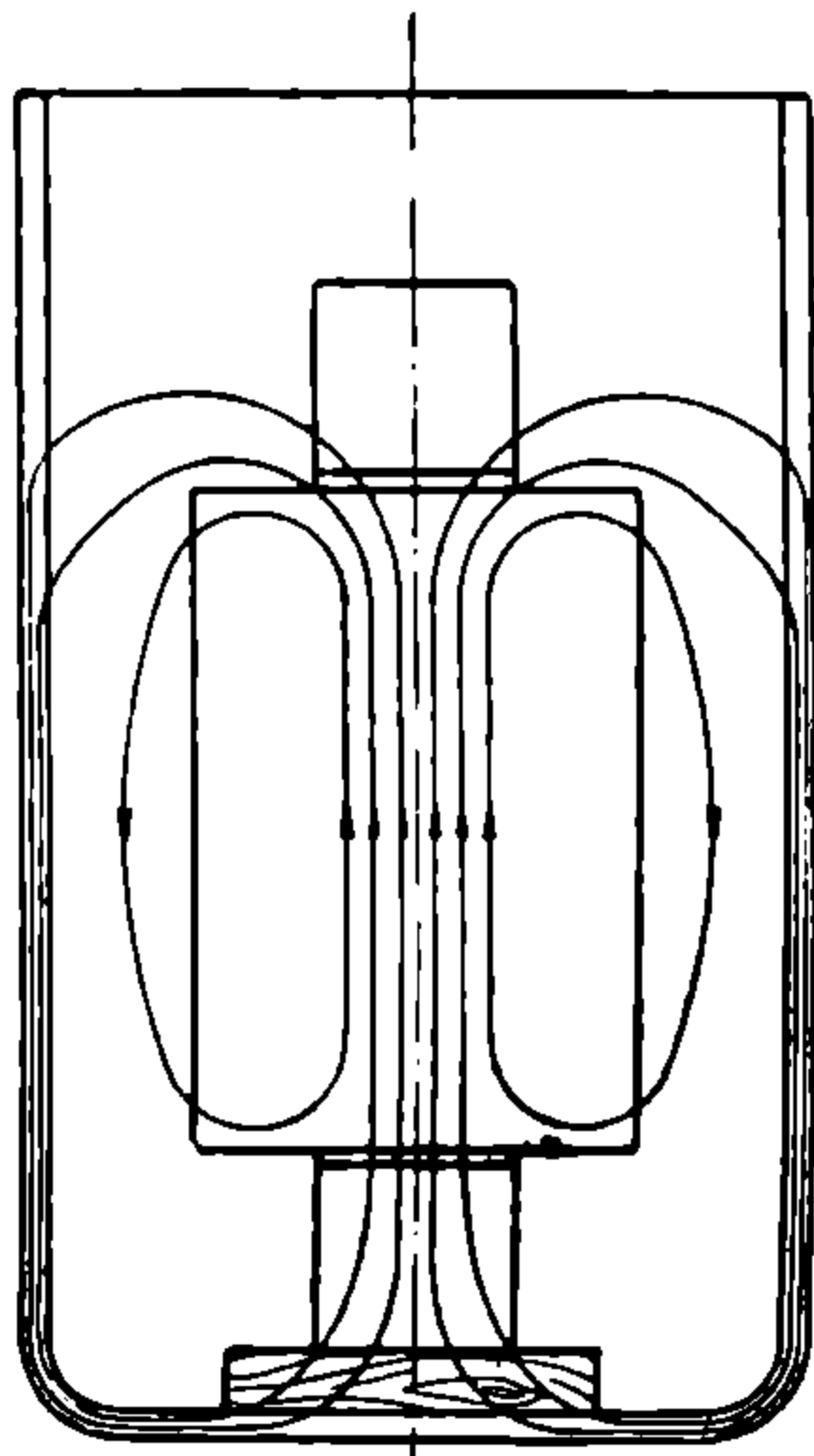
Так как его главный магнитный поток в 1,3 раза меньше, то удельное добавочное напряжение для типа с масляным охлаждением увеличится в

$$1,14 \cdot 1,3 = 1,49 \text{ раза.}$$

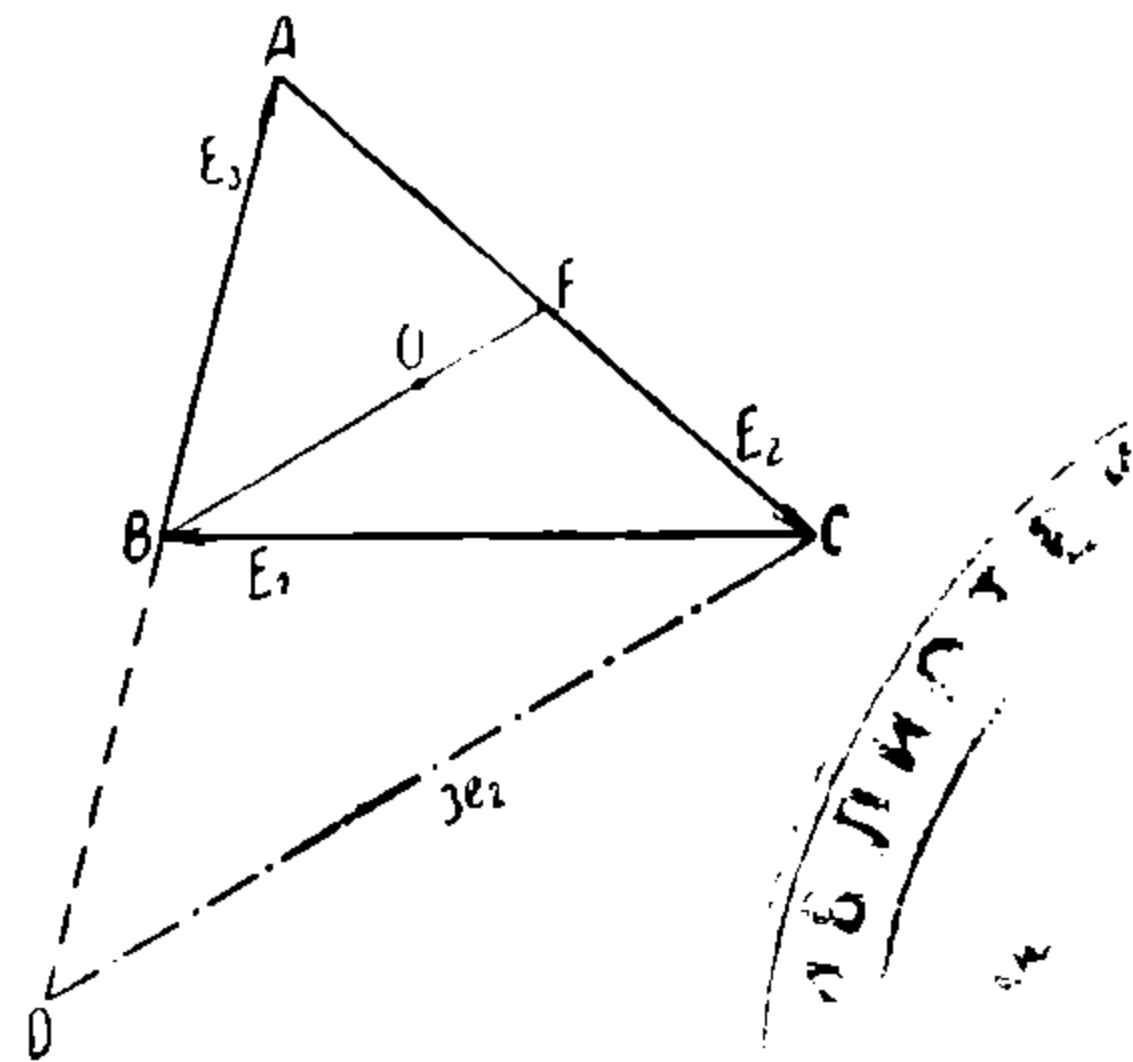
Трансформатор с масляным охлаждением в первую очередь предназначен для осветительного дела. Это обстоятельство придает особое значение добавочному потоку.

У трансформатора с масляным охлаждением имеется еще одна особенность его добавочного потока. Последний проходит через стенку кожуха и использует ее в качестве обратного пути (фиг. 17). Вместе с тем, кожух образует собой замкнутый виток, охватывающий весь трансформатор и добавочный поток. По этому «витку» будут проходить уравнительные токи, которые будут оказывать реактивное действие на добавочный поток, но в то же время разовьют добавочные потери в железе кожуха.

Это явление чрезвычайно опасное. Уже при холостом ходе наблюдаются мощные добавочные потери в железе кожуха, несмотря на то, что они возникают от однофазного добавочного потока, вызванного током холостого хода. Известно, что намагничивающий ток имеет силь-



Фиг. 17.



Фиг. 18.

ные третьи гармоники, совпадающие между собой по фазе, вследствие тройного числа периодов. Так как эти гармоники не могут протекать через обмотки из-за соединения их звездой, то трансформатор должен направить им навстречу равные, но противоположно направленные токи тройного числа периодов. Эти токи образуют добавочный поток тройного числа периодов, конечно, значительно слабее однофазной полной нагрузки. Намагничивающий ток составляет обычно около 10% тока при полной нагрузке, третья гармоника — около 30% от основной. Добавочный поток при холостом ходе слабее более чем в 10 раз. Конечно, тройное число периодов увеличивает добавочное напряжение и, вместе с ним, и уравнительный ток в железе кожуха. Все же добавочный поток от однофазной полной нагрузки вызовет значительно большие добавочные потери в железе кожуха.

Таким образом, соединение звездой без нулевого провода со стороны первичной обмотки для осветительных целей следует окончательно признать непригодным. То обстоятельство, что при соединении звездой без нулевого провода нормальные падения напряжения в первичной обмотке распределяются по трем фазам, играет малую роль в сравнении с отрицательными явлениями добавочного потока.

НТБ
ДНУЗТ

Полезно рассмотреть эти явления.

К первичным зажимам трансформатора приложено неизменяющееся напряжение от генератора, соединенного треугольником. В нагруженной фазе конец вектора передвигается во внутрь на величину нормального падения напряжения в первичной обмотке. Поэтому треугольник напряжений, индуктируемый главным магнитным потоком, шаются все три конечные точки треугольника напряжения (фиг. 18).

Собственно говоря, этот случай имеет значение только для соединения звездой с нулевым проводом, так как при этом соединении нагрузка одной фазы со стороны вторичной обмотки вызывает в первичной обмотке также нагрузку только одной фазы. Без нулевого провода смешаются все три конечные точки треугольника напряжения (фиг. 18).

Обозначив линейные напряжения через E_1 , E_2 и E_3 , индуктированные фазовые напряжения через e_1 , e_2 и e_3 (фиг. 18), мы получим следующие уравнения электрического равновесия:

$$\begin{aligned} E_2 + e_3 - e_1 &= 0, \\ E_3 + e_1 - e_2 &= 0, \\ E_1 + e_2 - e_3 &= 0. \end{aligned}$$

Так как все три фазовых потока пропорциональны индуктированным фазовым напряжениям и, кроме того, соединены в звезду, то

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0.$$

Следовательно

$$e_2 = \frac{E_3 - E_2}{3}.$$

Фиг. 18 показывает местонахождение нулевой точки. Здесь мы видим, что оба треугольника ADC и ABF подобны. Поэтому не только CF равно FA , но и

$$BF = \frac{3e_1}{2}.$$

Нулевая точка совпадает с центром тяжести треугольника приложенных напряжений. Нормальное падение напряжения одной фазы распределяется, следовательно, между тремя фазами.

28. СОЕДИНЕНИЕ «ТРЕУГОЛЬНИК-ЗВЕЗДА».

Хорошим соединением для осветительного дела является соединение «треугольник-звезда». Оно удорожает конструкцию. Правда, расход меди в сравнении с соединением «звезда-звезда» не возрастает. Число витков в первичной обмотке хотя и увеличится в отношении $\sqrt{3}:1$, зато поперечное сечение провода в первичной обмотке уменьшится в том же отношении.

Но при более тонком проводе относительно увеличиваются расходы на изоляцию и ее размеры. Разница тем больше, чем толщина всей обмотки больше в сравнении с диаметром провода. Чем меньше мощность, чем выше напряжение, тем дороже соединение треугольником.

В чем преимущество этого дорогого способа соединения для целей освещения? Рассматривая, как и раньше, однофазную нагрузку вторичной обмотки, мы на первый взгляд не обнаруживаем никакого отличия от соединения звездой. Сумма фазовых токов должна быть равна нулю

НТБ
ДНУЗТ

и при соединении треугольником. И при этом соединении должны существовать электрическое и магнитное равновесия.

Все, на первый взгляд, происходит точно так же, как и в соединении «звезда-звезда» без нулевого провода в первичной обмотке. Уравнения равновесия остаются неизменными, не могут измениться поэтому и данные расчета.

Но однофазный добавочный поток в этом случае не может удержаться. Обмотка, соединенная треугольником, представляет собою расположенную на трех ядрах замкнутую цепь для тока. По этой замкнутой цепи может протекать ток, совершенно отсутствующий в самой сети. Этот ток является по своему действию на добавочный поток как бы вторичным током, оказывающим реактивное действие на добавочный поток и не могущим быть уравновешенным никаким током из сети.

Таким образом, мы видим, что соединение треугольником сильно отличается от соединения «звезда-звезда» без нулевого провода в первичной обмотке. С точки зрения сети сумма трех фазовых токов должна равняться нулю, однако, в каждой фазе течет добавочный ток, конечно, одинаковый во всех трех фазах.

Сделав допущение, что первичная обмотка не имеет никакого сопротивления, мы обнаруживаем, что в этом случае однофазный добавочный поток должен совершенно исчезнуть. В противном случае в коротко замкнутой цепи трех фазовых обмоток протекал бы бесконечно большой уравнительный ток. Однако, добавочный ток исчезает совершенно, если ампервитки на каждом ядре находятся в равновесии. Согласно обозначений фиг. 10, мы имеем

$$\begin{aligned}i_1 &= I, \\i_2 &= 0, \\i_3 &= 0,\end{aligned}$$

уравнительный ток составлял бы

$$I_k = \frac{I}{3}$$

и однофазная нагрузка передалась бы в первичной обмотке лишь на одну фазу, а именно, на расположенную на том же ядре.

Эта идеальная картина нагрузки в действительности, конечно, достигается не полностью. Отклонения, однако, как в этом легко убедиться, незначительны.

Однофазный добавочный поток, как это было доказано раньше, возбуждается на каждом сердечнике током $\frac{I}{3}$. В обмотках, соединенных треугольником, действует уравнительный ток I_k . Поэтому при соединении треугольником должна остаться некоторая часть однофазного потока, возбуждаемая токами $\frac{I}{3}$ и I_k , которая индуцирует напряжение E_x . Под влиянием E_x и течет уравнительный ток I_k через сопротивление r фазовой обмотки (фиг. 19). Обозначив индуктивное сопротивление фазовой обмотки, возникшее от добавочного потока, через x , мы получим в соответствии с диаграммой фиг. 20, что

$$\left(\frac{I}{3}\right)^2 x^2 = I_k^2 x^2 + I_k^2 r^2,$$

или

$$I_k = \frac{I}{3} \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}}.$$

НТБ
ДНУЗТ

Приняв во внимание данные измерений, согласно предыдущего параграфа, получим

$$\frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \sin \varphi$$

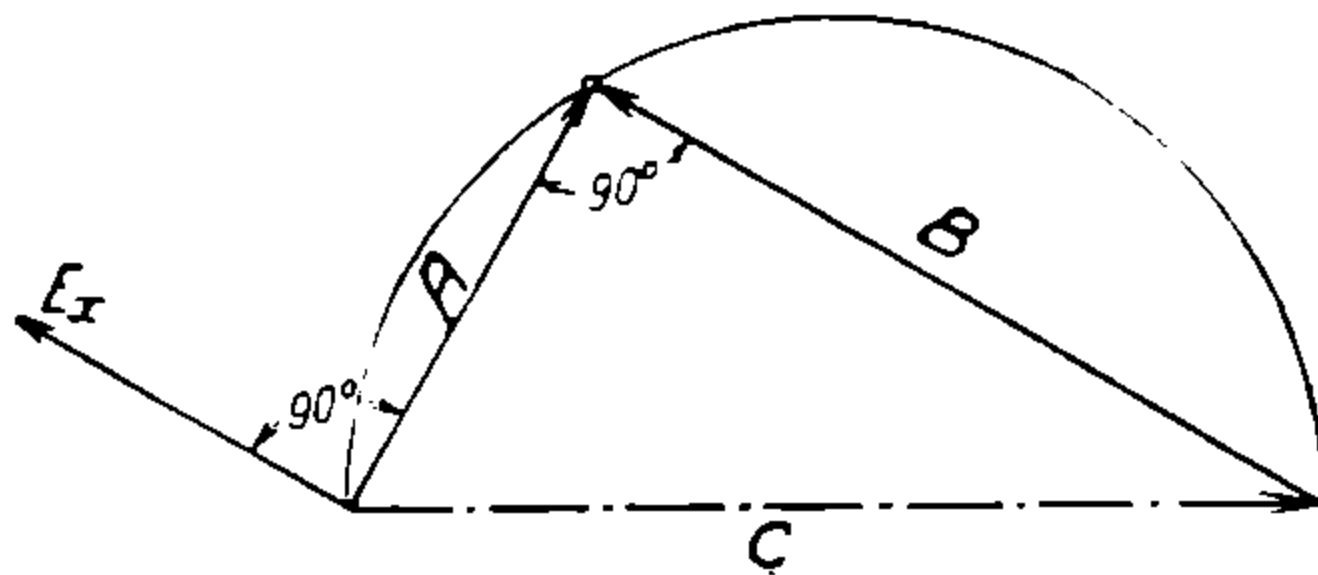
и

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - 0,28^2} = 0,95.$$

В описанном случае уравнительный ток достигает, следовательно, 95% своего идеального значения. Эти отношения становятся еще благоприятнее в случае больших однофазных добавочных потоков, а именно, в случае больших мощностей и у трансформаторов с масляным охлаждением.

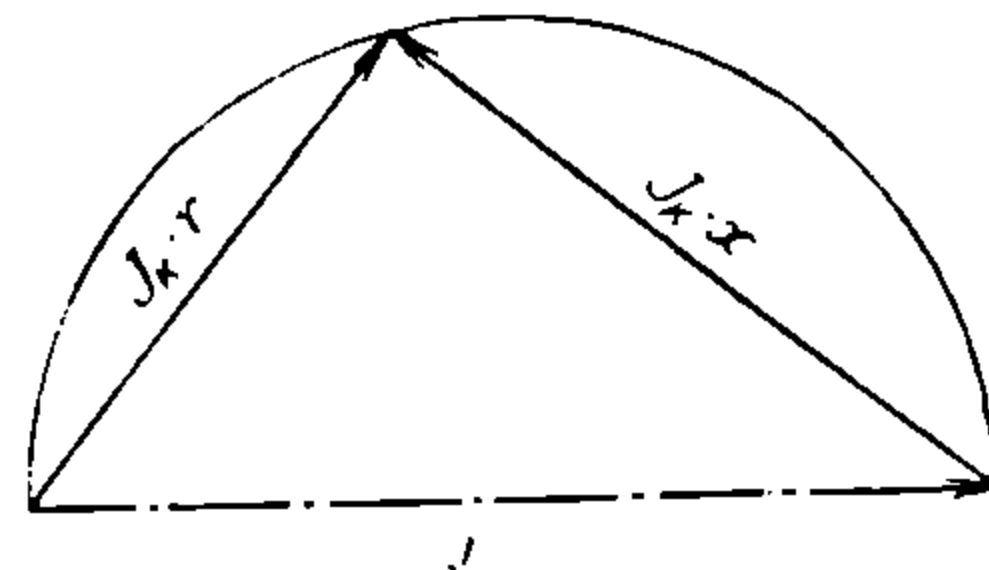
Соединение первичной обмотки треугольником уничтожает, следовательно, опасный добавочный поток, сводя его к незначительному по величине остаточному потоку, и этим самым устраняет все сопутствующие этому потоку отрицательные явления, описанные в предыдущем параграфе.

Встречаются в эксплуатации сухие трансформаторы с охлаждающими ребрами, воспринимающие тяжелые световые нагрузки, несмотря на соединение их обмоток способом «звезда-звезда» без нулевого провода в первичной обмотке. Эти особые конструкции как-будто противоречат теории. Практически они не имеют значения, но представляют теоретический интерес.



Фиг. 19.

- А. Дросселированный добавочный поток.
- В. Дросселирующий поток.
- С. Недросселированный добавочный поток.



Фиг. 20.

Трансформаторы с охлаждающими ребрами снабжены обмотками, составленными из дисковых катушек. Эти катушки сидят на керне плотно друг к другу, без каких-либо охлаждающих и изолирующих промежутков между ними. Между катушками, однако, помещается медный или алюминиевый лист с выступающими за пределы обмотки краями (фиг. 21). Поверхности катушек, прижатые к охлаждающим листам, отдают этим хорошо теплопроводящим материалам выделяемую при работе теплоту. Со свободных выступающих поверхностей этих листов теплота передается окружающему воздуху.

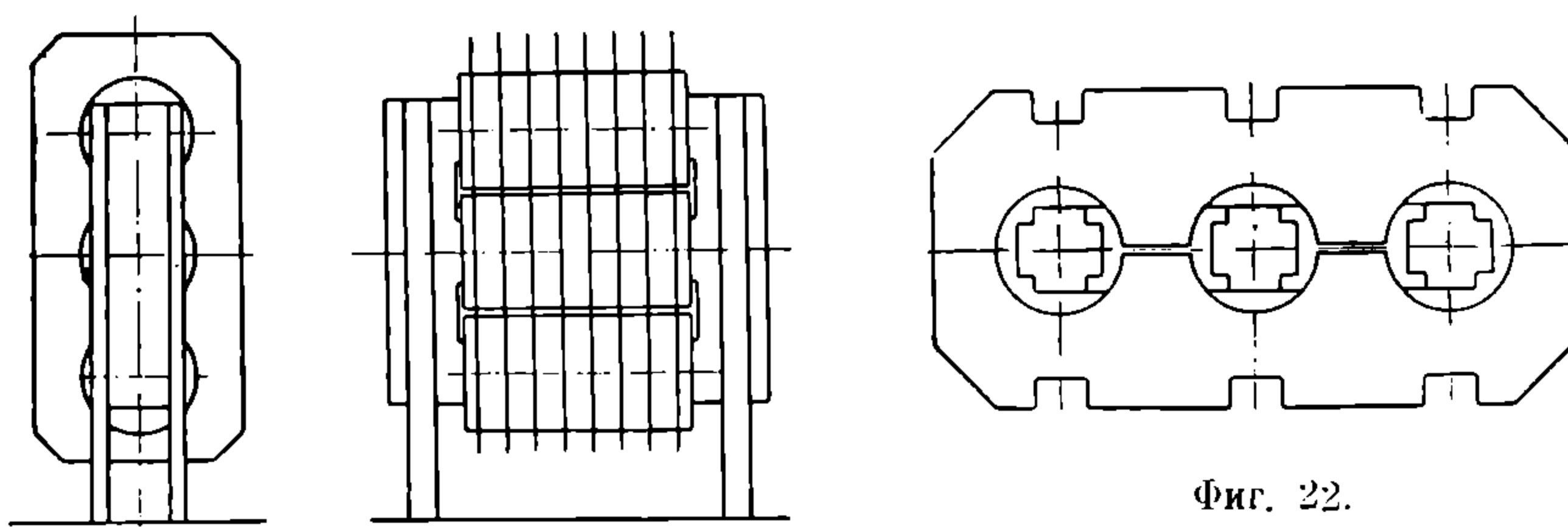
Работа этих конструкций с охлаждающими ребрами не интересует учение об эксплуатации. Для него существенней выяснение скрытой роли этих охлаждающих листов при однофазной нагрузке, т.е. нагрузке осветительной. Присматриваясь к одному такому листу, мы (фиг. 22) обнаруживаем наличие в двух местах прорезов, сообщающих отверстия для кернов. Конечно, лист не должен образовывать короткозамкнутого витка вокруг одного керна, но весь лист в целом представляет собой замкнутый виток, охватывающий все три керна. Для главного потока в этом нет никакой опасности. Сумма трех фазовых потоков всегда равна нулю. Однако, для добавочного потока, столь вредного при соеди-

НТБ
ДНУЗТ

нении «звезда-звезда» без нулевого провода в первичной обмотке, этот лист является замкнутой обмоткой, так же, как при соединении треугольником.

Этот факт соответствует с виду исключительному случаю. Речь идет о скрытом соединении треугольником. Вообще говоря, можно выполнить осветительный трансформатор и при соединении «звезда-звезда» без нулевого провода в первичной обмотке, снабдив его замкнутой уравнивательной обмоткой, охватывающей все три керна.

Эта уравнивательная обмотка состоит из одного лишь витка на каждом керне. Поперечное сечение такого витка не трудно определить. Чем оно меньше, тем больше будет омическое сопротивление уравнивательного витка, тем меньше подсчитанный выше $\sin \varphi$ и тем больше отдалится распределение нагрузки от идеального при соединении треугольником.



Фиг. 21.

Фиг. 22.

Мы видим, что уравнивательная обмотка дает нам все промежуточные случаи между обыкновенным соединением «звезда-звезда» без нулевого провода в первичной обмотке и соединением «треугольник-звезда». Но уравнивательная обмотка влечет за собой добавочный расход меди, поэтому в новейшей практике она не употребляется, за исключением случаев, когда она попутно решает какие-либо другие задачи. Однако, в некоторых случаях она может быть применена в эксплуатации как временная мера, так как на короткое время ее сможет выполнить и эксплуатационный инженер.

29. СОЕДИНЕНИЕ В «ЗИГЗАГ».

Принимая соединение «треугольник-звезда», эксплуатационный инженер этим самым освобождается от заботы распределить однофазную нагрузку на большее число фаз первичной обмотки, после того как он убедился в невозможности идеального решения. В этом отношении соединение «треугольник-звезда» является прямым, ясным решением проблемы осветительного трансформатора.

Существует, однако, другое, пригодное для осветительных целей, соединение, дающее хорошее распределение однофазной нагрузки на несколько фаз первичной обмотки. Это — соединение в «зигзаг». Оно выполняется столь же часто, как и соединение треугольником и уже по одному этому должно быть рассмотрено учением об эксплуатации.

Со стороны высокого напряжения соединение «звезда-зигзаг» сохраняет дешевую обмотку, свойственную звезде без нулевого провода. Со стороны же низкого напряжения оно распределяет витки одной фазы между двумя различными кернами трехфазного трансформатора. При этом вторичное фазовое напряжение составляется из двух частич-

НТБ
ДНУЗТ

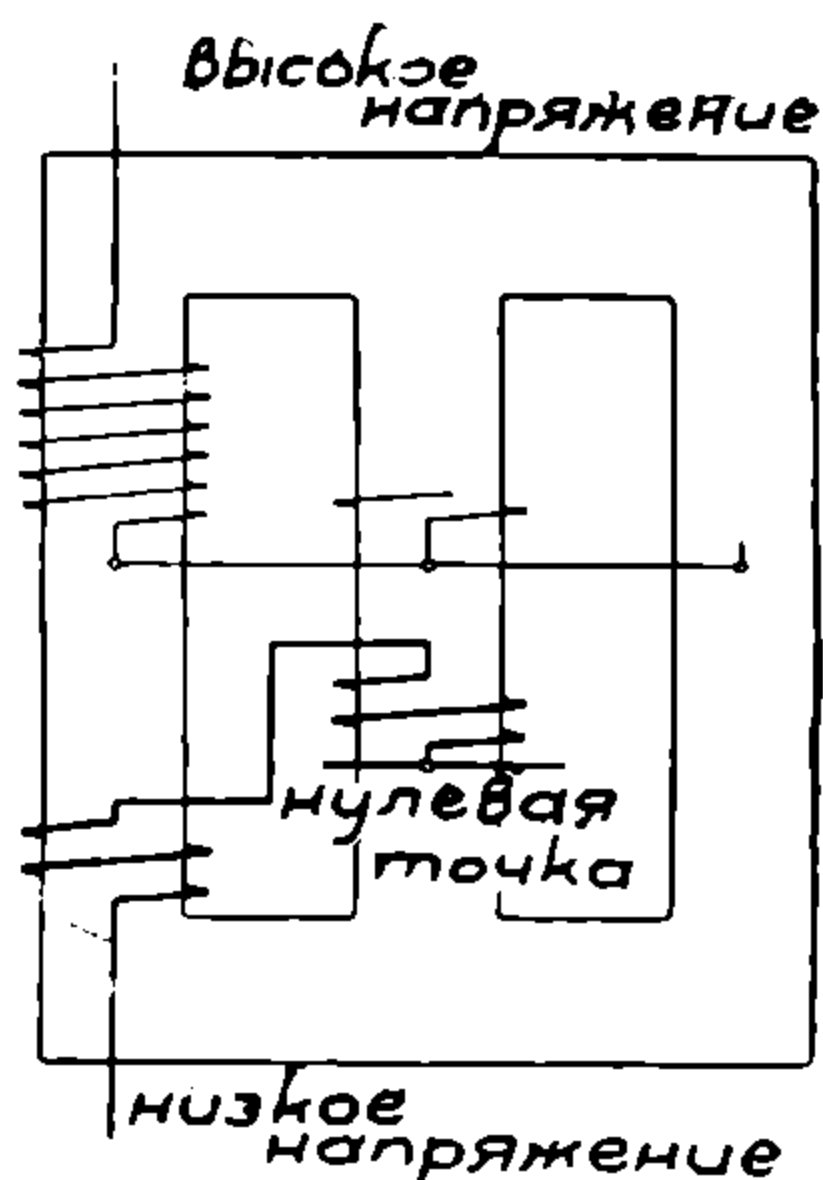
ных напряжений, сдвинутых друг относительно друга на 120° . Это достигается включением одной половины витков против другой (фиг. 23).

Соединение «зигзаг» требует, конечно, больше витков (при том же поперечном сечении провода), чем обыкновенное соединение звездой. Из фиг. 24 можно легко убедиться, что на стороне вторичной обмотки потребуется больше меди в отношении:

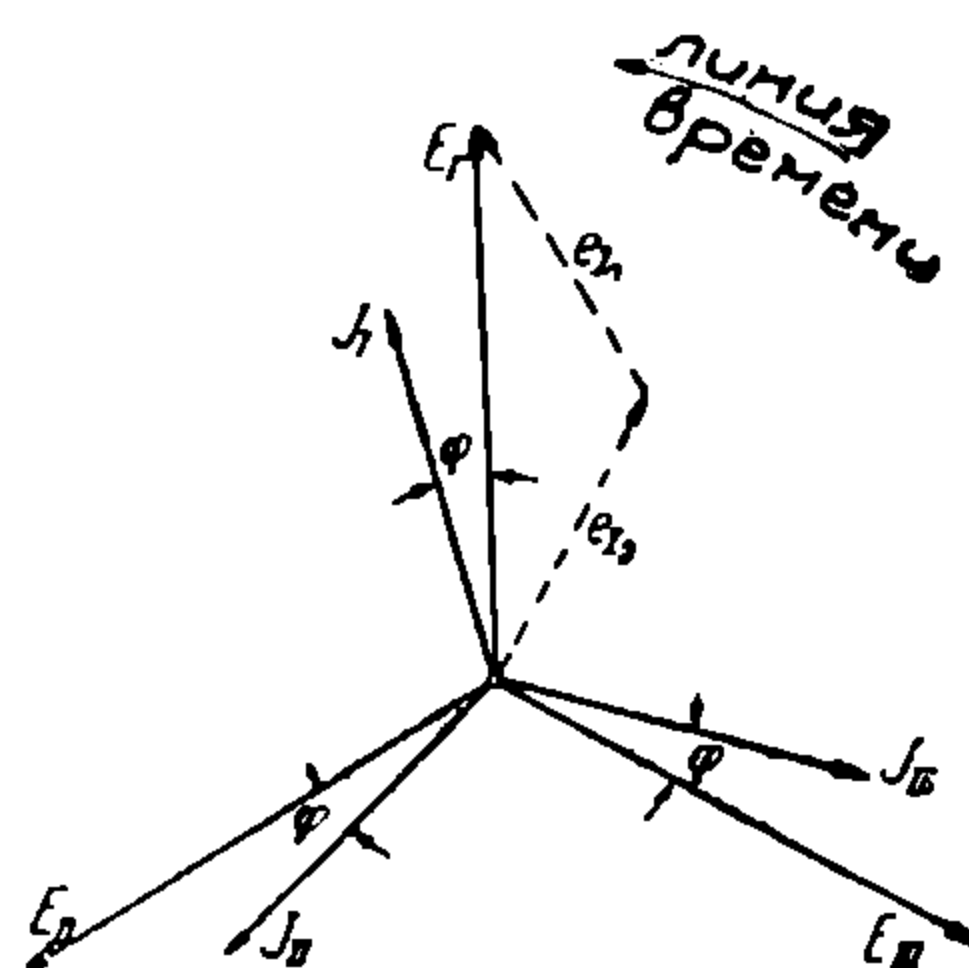
$$1 : \cos 30^\circ = 2 : \sqrt{3}$$

Следовательно, при этом способе соединения приходится принимать во внимание 15-процентное удорожание вторичной обмотки в сравнении с обыкновенным соединением «звезда-звезда».

И соединение треугольником удорожало конструкцию. Эксплоатационного инженера будет интересовать вопрос о том, за какую обмотку ему придется дороже платить. Но на этот вопрос нет ясного ответа. С одной стороны, речь идет о 15-процентном удорожании обмотки низкого напряжения, с другой — о неопределенном удорожании обмотки высокого напряжения. Одно лишь достоверно. Чем меньше мощность трансформатора, тем приемлемее соединение в зигзаг; чем выше первичное напряжение, тем труднее будет выполнение соединения треугольником.



Фиг. 23.



Фиг. 24.

Соединение в зигзаг можно все же считать самым дешевым решением вопроса. Оно все более и более вытесняет соединение треугольником. Поэтому особенно важно изучить ее сложные электрические особенности.

Соединение в зигзаг имеет и при полной нагрузке всех вторичных фаз некоторые особенности, отсутствующие у других способов соединения. Поэтому, прежде чем изучить особенности при осветительной нагрузке, следует рассмотреть явления, сопровождающие обыкновенную полную, например, силовую, нагрузку.

С первого же взгляда обнаруживаются трудности, таящиеся в соединении «зигзагом». Обмотки низкого напряжения одного керна принадлежат двум различным фазам. Через них, как указано выше, в противоположных направлениях будут протекать токи, сдвинутые друг относительно друга на 120° . Эта обмотка одного керна лишь частично имеет единственный, общий поток рассеяния, а следовательно лишь частично в ней происходит нормальное индуктивное падение напряжения. Оба фазовых тока имеют составляющие, направленные друг против друга, подобно тому, как нормально направлены токи первич-

НТБ
ДНУЗТ

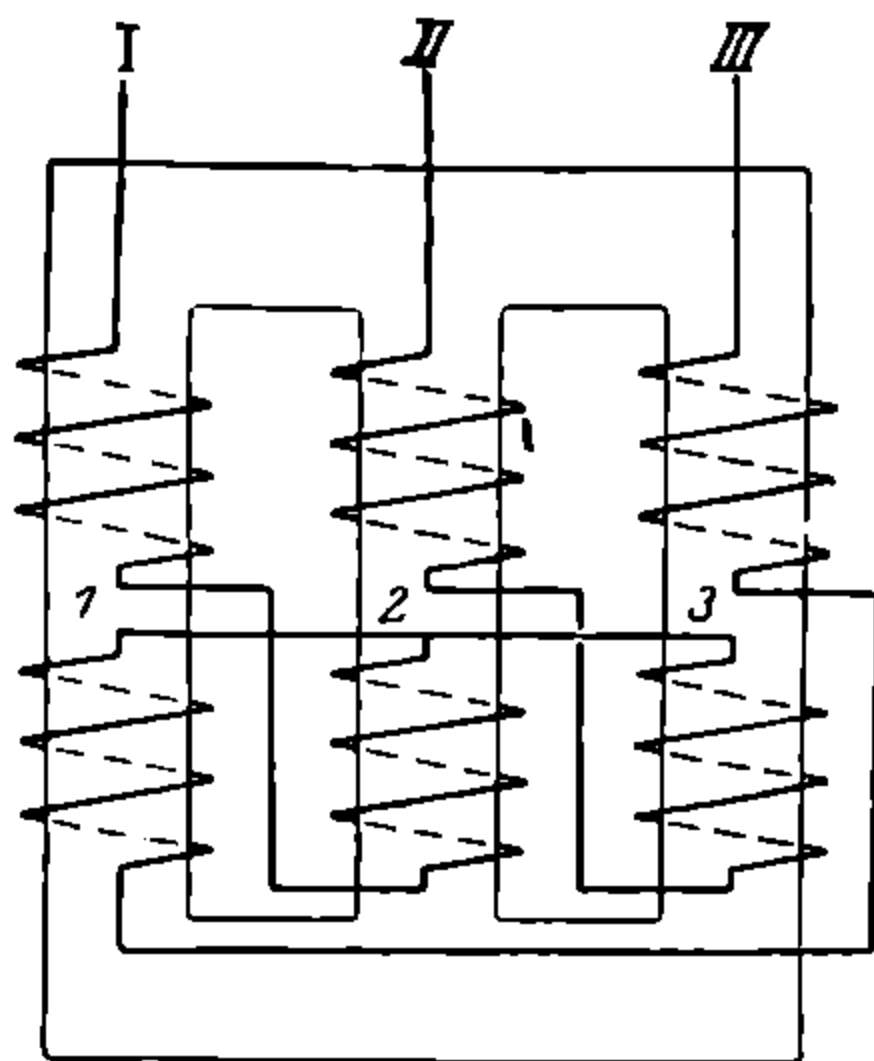
ной и вторичной обмоток в обычном случае. Потoki рассеяния обеих половин обмоток, находящихся на одном керне, направлены также друг против друга, несмотря на то, что созданы обмотками одной и той же стороны низкого напряжения. Образуется, таким образом, внутренний добавочный поток рассеяния вторичной обмотки, создающий добавочное индуктивное падение напряжения.

Фиг. 25 дает полную картину соединения в зигзаг обмоток низкого напряжения. Обмотка высокого напряжения здесь не указана, так как она в наших рассуждениях никакой роли не играет. Три фазы обозначены римскими цифрами, три керна — арабскими.

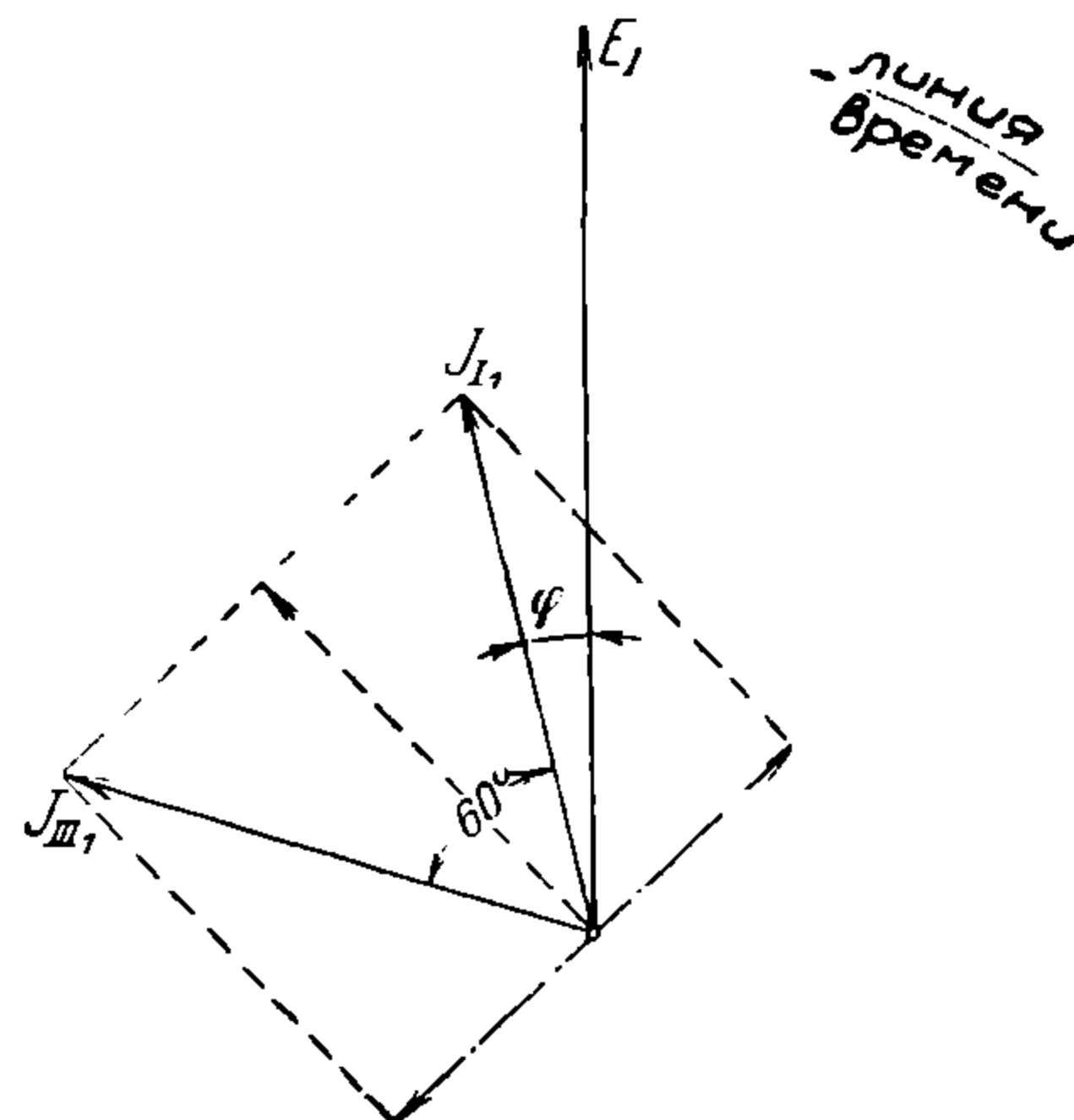
Первая фаза обмотки своей одной половиной расположена на керне 1, другой — на керне 2. Обе половины включены одна против другой. Напряжение у зажимов E_1 составляется из частичных индуктированных напряжений e_{11} и e_{12}

$$E_1 = e_{11} - e_{12}.$$

Фиг. 24 показывает расположение векторов напряжений. На ней изображены и вектора токов, сдвинутых под произвольным углом.



Фиг. 25.



Фиг. 26.

Следует, конечно, учесть то обстоятельство, что обе половины фазовой обмотки соединены друг против друга и что фазовые токи протекают по ним в противоположных направлениях. Это можно свести к такому представлению, при котором направления потоков приняты совпадающими, а направление одного из векторов тока изменено на 180° .

Фиг. 26 изображает токи, вызывающие потоки рассеяния у половин обмоток I и III фаз, находящихся на 1-м керне. Вектор тока I фазы взят в том же положении, как на фиг. 24, а вектор тока III фазы — повернут на 180° . Нормальный главный поток рассеяния обмотки низкого напряжения, находящейся на 1-м керне, будет создан одинаково направленными составляющими обоих токов, тогда как добавочный, внутренний поток рассеяния будет создан обоими противоположно направленными составляющими обоих токов.

Ясно, что оба вектора тока I_1 и $-I_{III}$ образуют между собой угол в 60° , тогда как I_1 и I_{III} находятся друг к другу под углом в 120° . Обе одинаково направленные составляющие токов в

$$\sqrt{3} : 2 = \cos 30^\circ : 1 \text{ раз}$$

меньше суммарных токов. Наоборот, обе противоположно направленные составляющие токов представляют собой лишь половину суммарных токов.

Главный поток рассеяния, следовательно, одинаков по величине с потоком рассеяния нормальной фазовой обмотки, не включенной зигзагом. Возбуждающий ток, как доказано, при одинаковой нагрузке меньше в отношении $\sqrt{3}:2$. Зато обмотка, соединенная зигзагом, должна иметь в $2:\sqrt{3}$ раз больше витков при том же напряжении. Таким образом, можно установить: главный поток рассеяния при соединении зигзагом имеет нормальную величину. Но если главный поток рассеяния вызывает полное нормальное индуктивное падение напряжения, то от внутреннего потока рассеяния следует ожидать добавочного индуктивного падения напряжения. Надо во что бы то ни стало стараться уменьшать значения этих добавочных падений напряжения.

Необходимо также рассмотреть связь между главным потоком рассеяния в обмотке низкого напряжения, соединенной зигзагом и потоком рассеяния обмотки высокого напряжения. Как в первичной, так и во вторичной обмотке на каждом керне возбуждающее действие токов полной нагрузки должно находиться в магнитном равновесии, в противном случае главный поток трансформатора не может работать без помех, как этого требует электрическое равновесие приложенного внешнего и индуцированного в обмотках первичных напряжений. Следовательно, со стороны низкого напряжения в одном керне обе противоположно направленные составляющие фазовых токов в магнитном отношении взаимно уничтожаются в цепи главного потока. Только одинаково направленные составляющие вторичных фазовых токов одного керна находятся в магнитном отношении в равновесии с током полной нагрузки обмотки высокого напряжения.

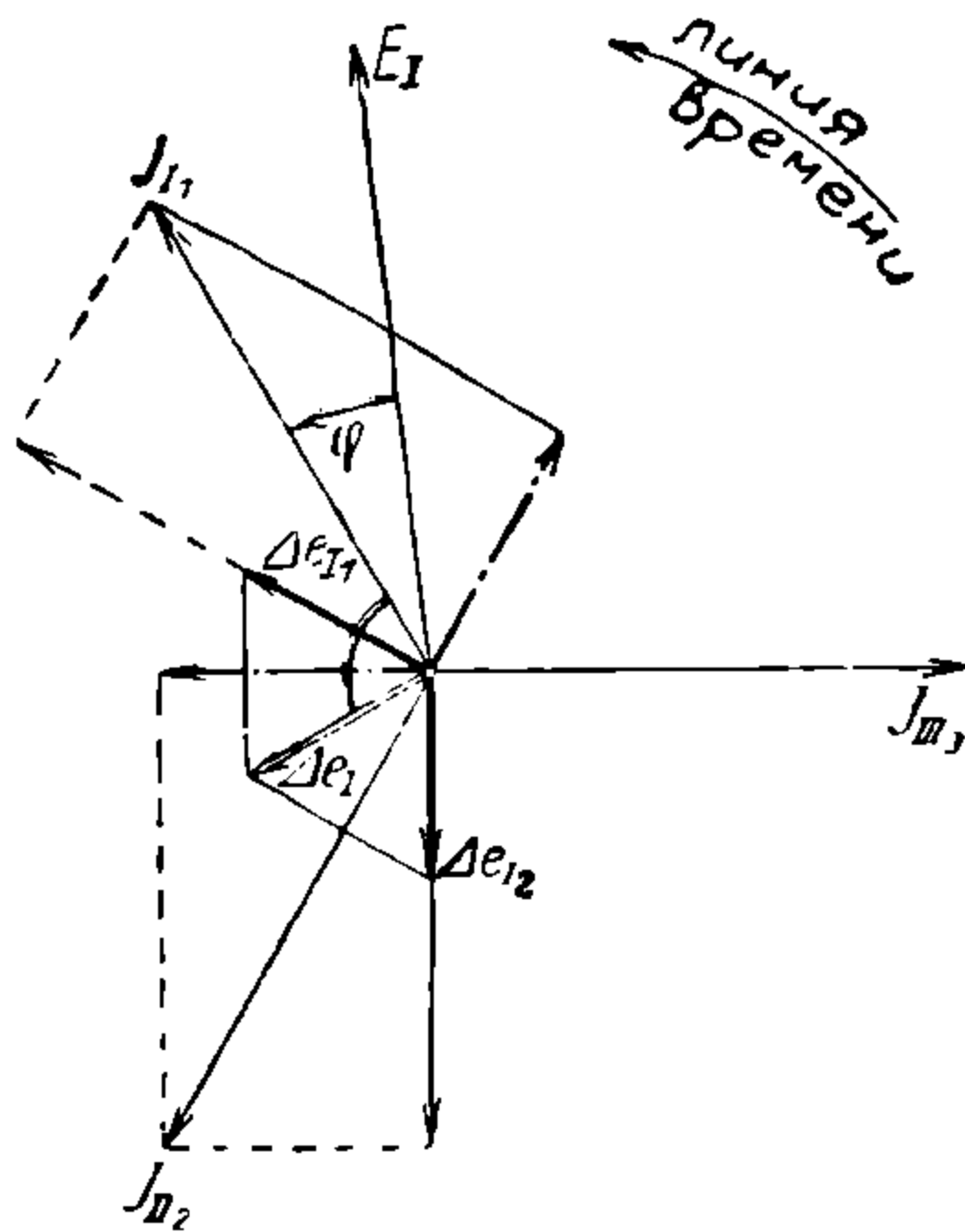
Принимая коэффициент трансформации $1:1$ находим, что на деле, из-за соединения зигзагом, во вторичной обмотке оказывается в $\frac{2}{\sqrt{3}}$ раз больше витков, чем в первичной. Поэтому в магнитном отношении действительна лишь составляющая вторичного тока, в $\frac{\sqrt{3}}{2}$ раз меньшая самого тока. Произведение дает то же число ампервитков как для первичной, так и для вторичной обмоток.

Индуктивное падение напряжения от главного потока рассеяния относится к фазовому напряжению при соединении зигзагом так же, как величина потока рассеяния к величине главного потока трансформатора. Таким образом следует ожидать то же индуктивное падение напряжения от главного потока рассеяния, что и при других соединениях, так как установлено, что величина этого главного потока рассеяния при соединении зигзагом равна величине потоков рассеяния при других способах соединений.

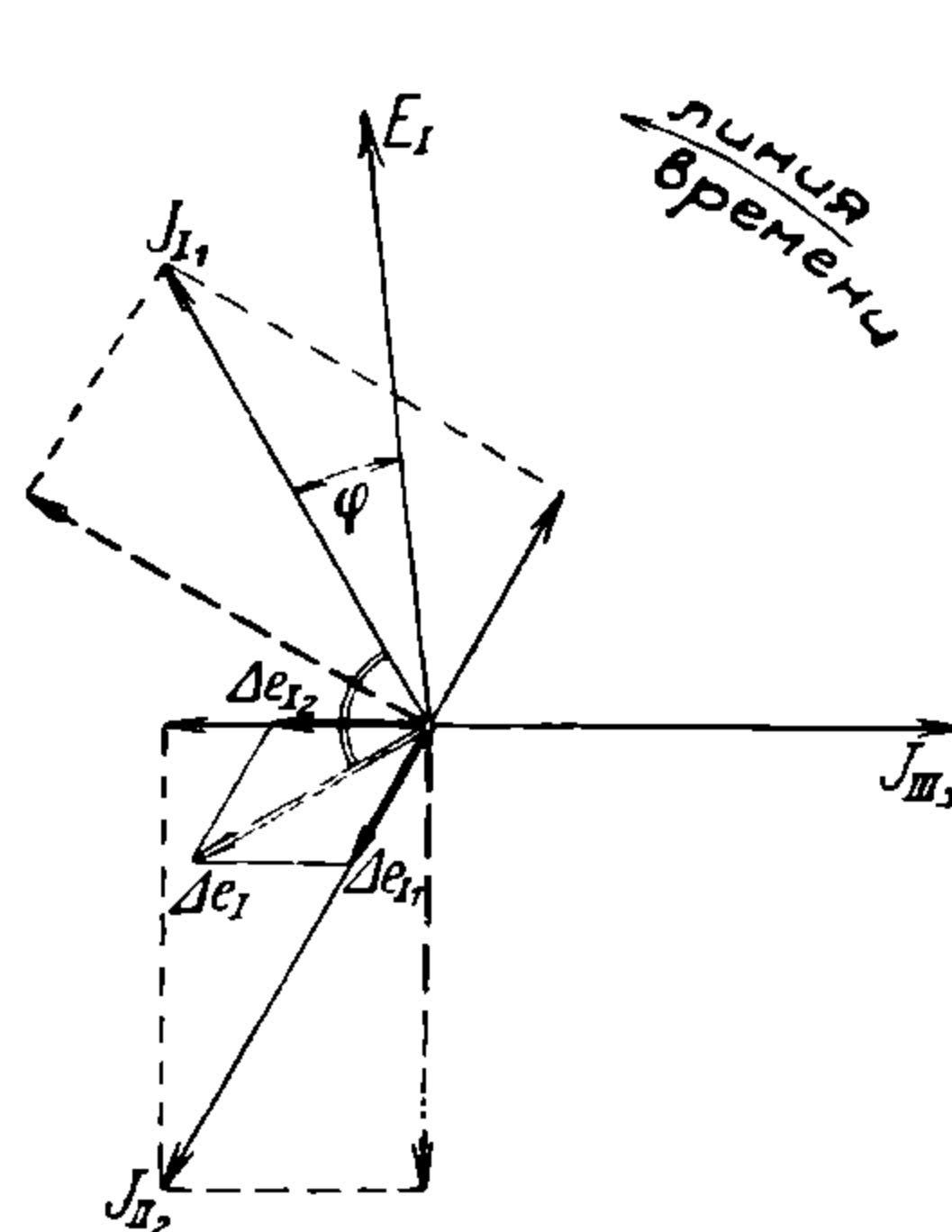
Может ввести в заблуждение то обстоятельство, что индуктивное падение напряжения главного потока рассеяния при соединении зигзагом сдвинуто на 90° не относительно самого тока нагрузки, а относительно его составляющей. Но индуктивные падения напряжения обеих половин обмоток одной фазы сдвинуты между собой по фазе так же, как и частичные напряжения одной фазы, созданные главным потоком трансформатора. Таким образом, все же образуется правильный сдвиг фаз между индуктивным падением напряжения и током нагрузки. При помощи фиг. 27 легко уяснить себе вышесказанное.

Рассматривая добавочное индуктивное падение напряжения, вызванное добавочным внутренним потоком рассеяния в обмотке, соединенной зигзагом, приходим к неожиданному выводу, что это падение напряжения должно быть сдвинуто по фазе против нормального индуктивного падения напряжения на 90° . Добавочный и главный потоки рассеяния образуются из двух взаимно перпендикулярных составляющих вторичного тока нагрузки. Несмотря на это, подобный вывод оказался бы ошибочным. Если бы он был правильным, то добавочное индуктивное падение напряжения стало бы выполнять роль омического падения напряжения.

Сложные физические явления протекают здесь следующим образом. Добавочное индуктивное падение напряжения одной половины фазы действительно сдвинуто по фазе на 90° против нормального индуктивного падения напряжения. Но этот сдвиг фаз составляет в одной половине фазы $+90^\circ$, а в другой -90° . С точки зрения внутреннего рассеяния обе половины обмотки, соединенной зигзагом (половины, принадлежащие разным фазам, но находящиеся на одном керне),



Фиг. 27.



Фиг. 28.

образуют первичную и вторичную обмотки некоего скрытого трансформатора. Рассеяния их направлены друг против друга. Одна половина обмотки фазы играет на одном керне роль первичной обмотки, тогда как вторая половина, находясь на другом керне, играет роль вторичной обмотки. Они, как известно, соединены навстречу друг другу. Таким образом, обмен ролями влечет за собой и перемену знака у угла сдвига фаз для индуктивного падения напряжения.

Обе половины нормального индуктивного падения напряжения одной фазы, из-за их соединения, должны суммироваться так же, как и напряжения, индуктированные в обеих половинах фаз. Обе половины добавочного индуктивного падения напряжения одной фазы должны были бы друг из друга геометрически вычитываться. Но вышеописанная перемена знаков угла сдвига фаз для главного индуктивного падения напряжения превращает это вычитание в сложение. Поэтому результирующее добавочное индуктивное падение напряжения одной фазы имеет, как вектор, то же направление, что и главное индуктивное падение напряжения.

Фиг. 28 еще раз показывает расположение векторов фазового напряжения, токов нагрузки и их основных составляющих, определяю-

щих собой добавочный поток рассеяния. Кроме того, на рисунке даны добавочные индуктивные частичные падения напряжения и, как следствие, результирующие добавочные индуктивные падения напряжения.

На фиг. 27 и 28 можно заметить существенную разницу между обоими, одинаковыми по фазе, индуктивными падениями напряжения одной фазы. Главное падение напряжения фазы в $\sqrt{3} - 1$ раза больше главного падения напряжения одной половины фазы, так же как и индуктированное напряжение одной фазы в $\sqrt{3} : 1$ раза больше индуктированного напряжения одной половины фазы. Результирующее же добавочное падение напряжения, напротив, равно результирующему падению напряжения половины фазы. Оно состоит из двух равных составляющих, сдвинутых друг относительно друга на 120° .

С чисто физической стороны, проблему добавочного индуктивного падения напряжения при соединении зигзагом можно считать выясненной. По крайней мере для трансформатора при полной нагрузке. Но прежде чем перейти к случаю однофазно-нагруженного трансформатора, необходимо решить вопрос о том, до каких размеров может вырасти добавочное индуктивное падение напряжения. Необходимо последнее сравнить с главным индуктивным падением напряжения. Однако, оказывается, что этот одинаково важный как для конструктора, так и для эксплуатационного инженера вопрос в общем виде не может быть решен. Оказывается, что вопрос о том, в какой мере выявятся отрицательные стороны добавочного падения напряжения, зависит исключительно от расположения обмоток. Конечно, как и конструктор, так и эксплуатационный инженер, заинтересованы в том, чтобы по возможности уменьшить неприятное явление — добавочное индуктивное падение напряжения.

Полезно исследовать внимательнее некоторые способы расположения обмоток. При этом следует заранее исключить заведомо непригодные расположения, благоприятные для добавочного потока рассеяния.

В трансформаторах с дисковыми обмотками, как известно, обе половины фаз обмотки низкого напряжения, расположенные на одном керне, так же как и первичные и вторичные обмотки, в обычных соединениях состоят из чередующихся друг с другом отдельных катушек. Таким образом возникает вопрос о правильном способе взаимного расположения этих катушек (фиг. 29).

Расположение обмоток фиг. 30 хуже, хотя и кажется более соответствующим нормальному построению дисковых обмоток. Это расположение дает слишком большие расстояния между катушками с противоположно направленными потоками. По тем же причинам совсем неприемлемым оказалось бы расположение фиг. 31. Возьмем для рассмотрения расположение фиг. 29 и попытаемся определить величину добавочного индуктивного падения напряжения. Для удобства примем расстояния между катушками равными, независимо от того, находятся ли они между катушками высокого и низкого напряжения или между двумя катушками низкого напряжения.

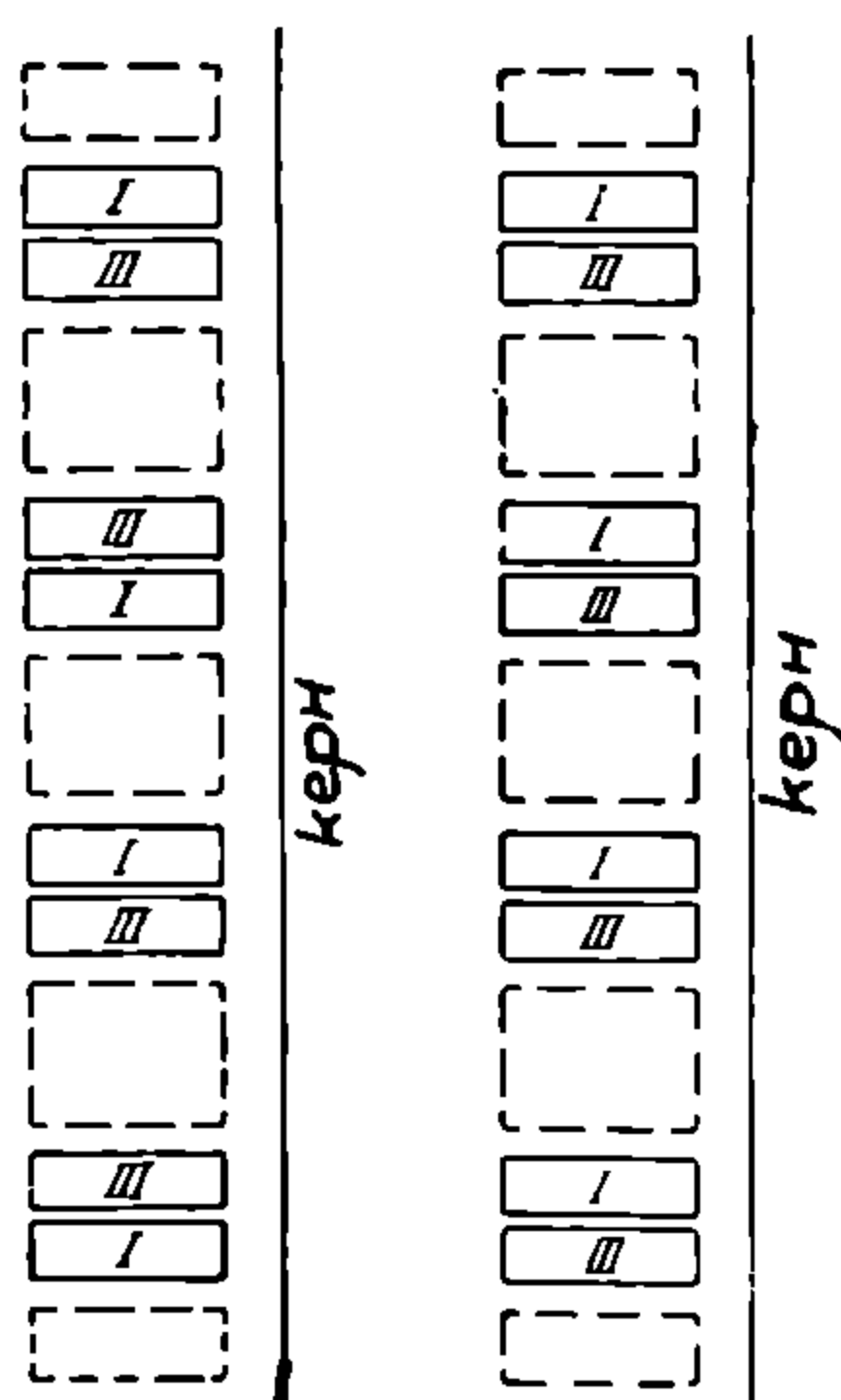
Главный поток рассеяния возникает обычным путем. Его величина зависит от ампервитков при полной нагрузке первичной обмотки, от числа первичных катушек и от магнитного сопротивления.

Магнитное сопротивление главного потока рассеяния, как известно, зависит от приведенной длины магнитной линии рассеяния, от приведенного воздушного зазора и от средней длины витка. Принимаем эти

НТБ
ДНУЗТ

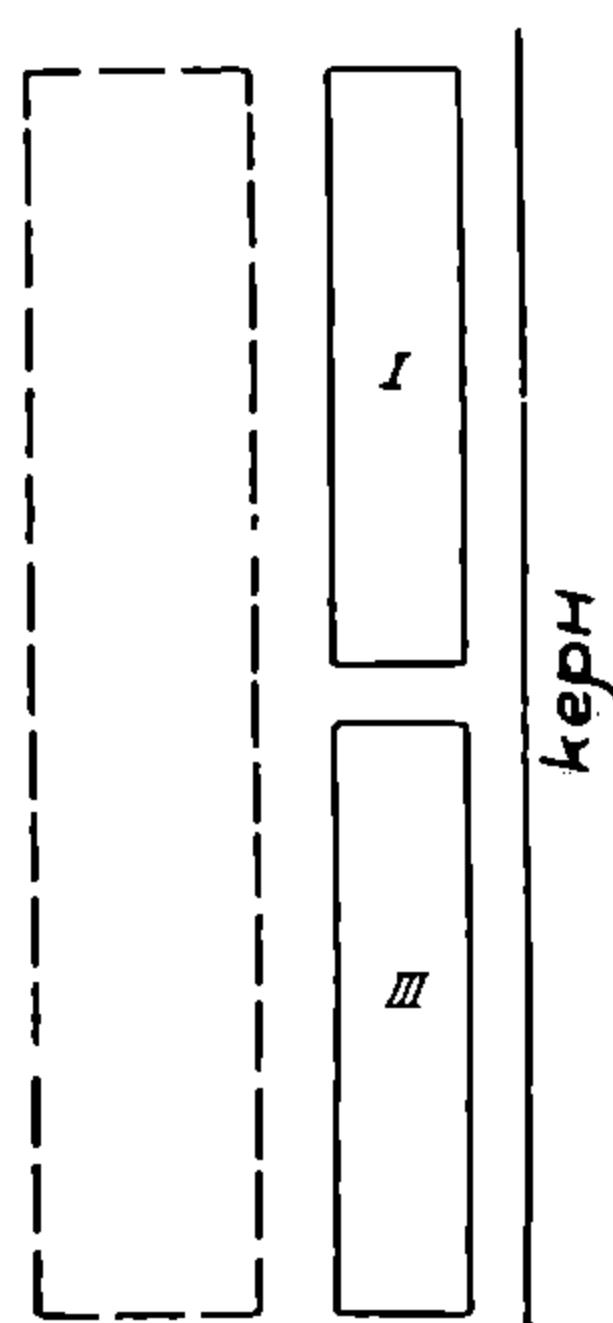
три величины одинаковыми, как для главного потока рассеяния, так и для добавочного.

Ампервитки добавочного потока рассеяния образуются половиной вторичной обмотки одного керна. Эти ампервитки, как выяснено выше, образуются лишь одной составляющей вторичного тока, равной в точности половине суммарного тока. Поэтому добавочный поток рассеяния должен был бы быть в $2\sqrt{3}$ раз слабее главного потока рассеяния. Кроме того, фиг. 29 показывает, что фиктивный трансформатор добавочного потока рассеяния имеет лишь половину числа катушек действительного трансформатора (т.-е. у него осуществлено подразделение обмотки лишь наполовину). При этом следует, конечно, обратить внимание на то, что действительный трансформатор имеет половинные катушки, тогда как у фиктивного—первичные и вторичные вместе. В конечном счете, добавочный поток рассеяния оказывается в $1\sqrt{3}$ раз больше главного потока рассеяния.



Фиг. 29.

Фиг. 30.



Фиг. 31.

При этом следует учесть и то вышеустановленное обстоятельство, что суммарное главное падение напряжения одной фазы в $\sqrt{3}$ раз больше главного падения напряжения половины фазы, а суммарное добавочное падение напряжения в точности равно добавочному частичному падению напряжения. Для рассмотренного здесь расположения катушек получилось бы отношение 3:1 в пользу главного падения напряжения.

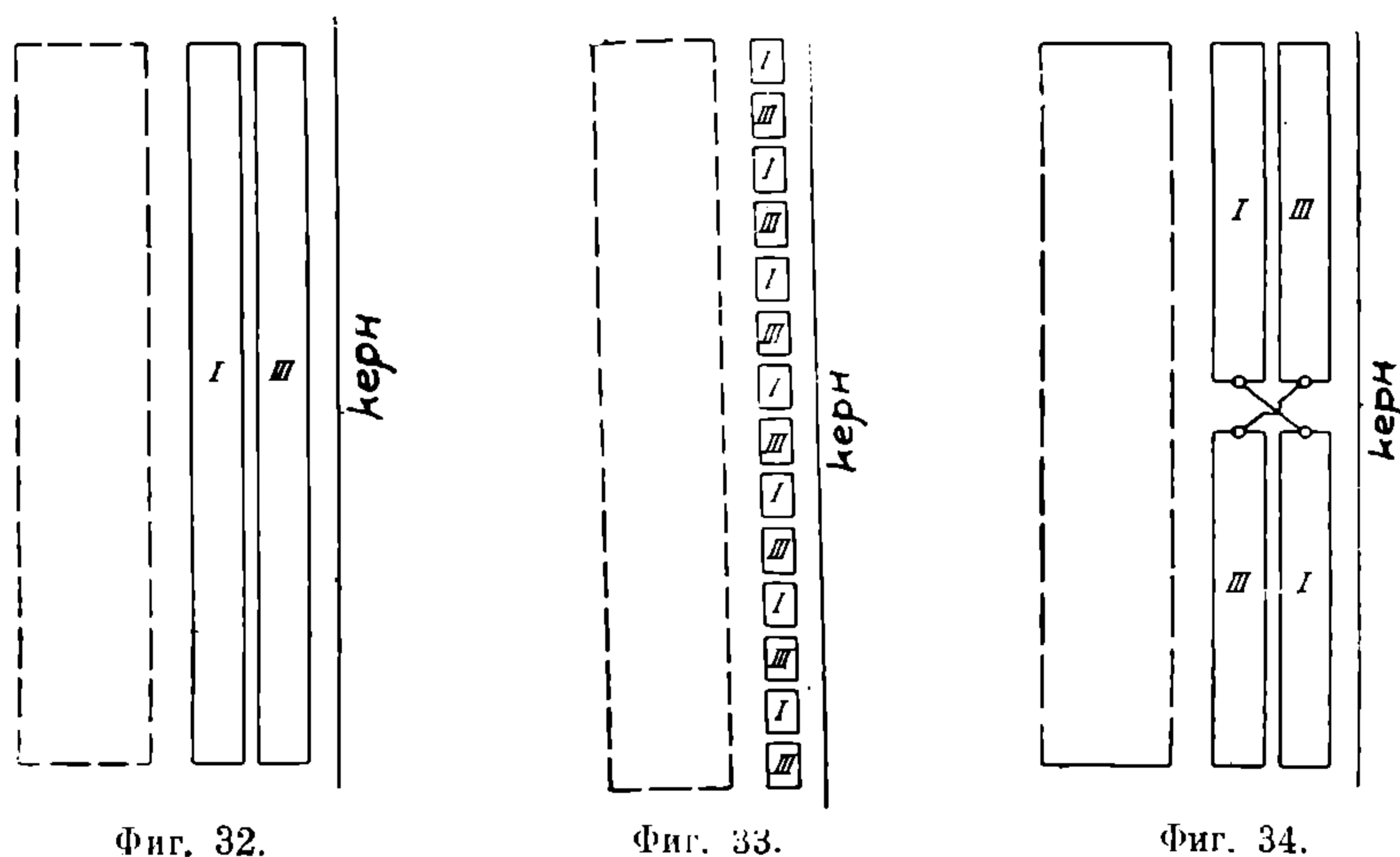
Это дало бы при совершенно безупречном расположении обмоток возрастание индуктивного падения напряжения при соединении зигзагом приблизительно на 33% во вторичной обмотке, или увеличение суммарного индуктивного падения напряжения трансформатора приблизительно на 16,5%. Однако, действительные данные более благоприятны. Магнитное сопротивление для добавочного потока рассеяния почти всегда значительно больше магнитного сопротивления для главного потока рассеяния, так как катушки низкого напряжения, направляющие свои потоки рассеяния друг против друга, могут быть сдвинуты вплотную между собой, тогда как между катушками высокого и низкого напряжения необходимо оставлять промежутки.

ЧЕТЬ
ДНУЗТ

Фиг. 29, кроме того, показывает, что обе катушки низкого напряжения, принадлежащие одной фазе, довольно далеко отстоят одна от другой. Их отделяет целая катушка высокого напряжения и два между-катушечных промежутка. Эти катушки охватываются силовыми линиями добавочного потока рассеяния. Силовые линии этим самым удлиняются, правда, лишь на одном участке, где они имеют возможность свободно распространиться.

Решающим обстоятельством является возможность хорошего охлаждения, что мы и имеем в выбранном расположении обмоток, соединенных зигзагом. Принимая во внимание опытные данные, следует однако считать нормальным 10%-е приращение индуктивного суммарного падения напряжения в трансформаторе.

Гораздо лучшую картину мы получаем при цилиндрической обмотке. Само собой разумеется, что расположение фиг. 31 здесь не рассматривается. Приемлемо расположение фиг. 32, которое мы и рассмотрим.



Фиг. 32.

Фиг. 33.

Фиг. 34.

Снова примем равными магнитные сопротивления для главного и для добавочного потоков рассеяния. Мы получим как и раньше, что добавочный поток рассеяния в $2\sqrt{3}$ раз слабее. На этот раз, однако, распределение обоих потоков рассеяния одинаково. Получается отношение 6 : 1 в пользу главного падения напряжения.

В действительности и при цилиндрической обмотке магнитное сопротивление для добавочного потока рассеяния почти всегда значительно больше. Оно больше уж по одному тому, что цилиндрическую обмотку, особенно при малых и средних мощностях, выбирают лишь для больших напряжений. Таким путем мы приходим к практическим выводам, гласящим, что при расположении фиг. 32 придется учитывать приращение нормального суммарного индуктивного падения напряжения приблизительно в 5%.

Однако, в очень многих случаях цилиндрическая обмотка при соединении зигзагом может быть значительно улучшена, а именно тогда, когда со стороны низкого напряжения она выполнена в виде однослойной спирали. Такая однослойная спираль является идеальной формой цилиндрической обмотки. Ее легко выполнить в мощных трансформаторах, но она выполнима также и при средних мощностях.

Однослойная спиральная обмотка при соединении зигзагом распадается, конечно, на две спирали. Однако можно осуществить очень хорошее взаимное расположение этих частичных спиралей, если сконструировать обмотку (фиг. 33) в виде двухходовой спирали. Ясно, что при этом добавочное индуктивное падение напряжения сильно понижается.

Нельзя считать законченным исследование различных расположений обмоток при соединении зигзагом без рассмотрения возможных параллельных соединений со стороны низкого напряжения. Особенно необходимы параллельные соединения при дисковом расположении обмоток. Необходимо также конструктивно обеспечить то немаловажное преимущество соединения зигзагом, которое заключается в применимости этого соединения также и при 220/125 V, переходящее в соединение двойной звездой.

Фиг. 29 показывает, что правильно расположенные дисковые катушки могут быть соединены параллельно. Все катушки одной половины фазовой обмотки могут быть между собою соединены параллельно. Катушки двух половин фазовых обмоток, находящихся на разных кернах, конечно, не могут быть параллельны друг другу.

Фиг. 29, кроме того, показывает, что после выполнения соединения зигзагом могут быть соединены параллельно и все катушки низкого напряжения одного керна, что дает возможность без труда получить соединение двойной звездой.

Рассмотрение фиг. 32 показывает, что при цилиндрической обмотке дело обстоит несколько труднее. Обе половины обмоток низкого напряжения одного керна нельзя включить параллельно. Половина обмотки, находящаяся ближе к обмотке высокого напряжения, несомненно, имеет меньшее индуктивное падение напряжения. Поэтому следует каждую фазовую обмотку выполнять на одном керне наверху, а на другом внизу.

При желании обойти эти трудности необходимо перекрещивать обе половины обмотки низкого напряжения на каждом керне, как это указано на фиг. 34. В середине керна верхняя половина обмотки должна быть переведена в нижнее положение.

Ясно, что при двухходовой спирали цилиндрической обмотки (фиг. 33) вообще не может возникнуть затруднения. Отчасти по этой причине и выбирают такую идеальную форму цилиндрической обмотки. Она имеет только тот недостаток, что в ней расположены рядом витки сильно отличающихся между собою напряжений. Однако при низких напряжениях и при достаточно крупных мощностях не встретится особенных конструктивных трудностей.

Соединение зигзагом выбирают лишь из соображений неравномерных осветительных нагрузок. При этом соединении мы имеем незначительные сдвиги фаз. С этой точки зрения добавочное индуктивное падение напряжения при соединении зигзагом не имеет никакого значения. Оно приобретает практическое значение лишь в том случае, когда трансформатор, соединенный в «звезду-зигзаг» должен работать параллельно с другими трансформаторами, соединенными, например, в «треугольник-звезду».

Поскольку речь идет о полной нагрузке трансформатора, постольку можно считать исчерпанным вопрос о соединении зигзагом. Однако, остается невыясненным особый характер работы этого интересного соединения при осветительной нагрузке. Недостаёт исследова-

НТБ
ДНУЗТ

ния одноплечих нагрузок трансформатора, соединенного в «звезду-зигзаг». Это исследование приобретает смысл лишь теперь, после того, как выяснена пригодность соединения для равномерной трехфазной нагрузки.

При этом мы возьмем для рассмотрения крайний случай однофазной полной нагрузки.

При первом же взгляде мы обнаруживаем, что при однофазной нагрузке исчезает добавочное индуктивное падение напряжения. Со стороны низкого напряжения на одном керне мы имеем, с электрической точки зрения, лишь одну половину обмотки, так как вторая — без тока. Этим, однако, вопрос не исчерпывается. Он не может быть исчерпан без исследования работы различных расположении обмоток.

Дисковое расположение обмоток фиг. 29, при однофазной нагрузке переходит в расположение фиг. 35. В последнем уже с первого взгляда видно, что поток рассеяния трансформатора усилился. Половина междукатушечных промежутков значительно увеличилась, а именно, на полную ширину половины обмотки низкого напряжения и на ширину одного междукатушечного промежутка между двумя половинами катушек низкого напряжения. Магнитное сопротивление потока рассеяния должно, поэтому, быть подсчитано по средней величине разных расстояний между обмотками высокого и низкого напряжений. Фиг. 35 показывает эти разные расстояния, обозначенные δ_1 и δ_2 , а также и то, что для обеих обмоток (для первичной и вторичной) среднее расстояние между обмотками будет

$$\frac{\delta_1 + \delta_2}{2}.$$

Следует отметить, что при этом во всех катушках низкого напряжения возникают одинаковые падения напряжения. На фиг. 35 каждая катушка низкого напряжения отстоит с одной стороны на большую величину, а с другой — на меньшую от обмотки высокого напряжения. Фиг. 35 показывает также, что катушки высокого напряжения распадаются на две группы, которые должны иметь различные индуктивные падения напряжения, равные, однако, между собой в пределах одной группы.

Отсюда немедленно следует, что, принимая во внимание однофазную нагрузку, параллельные соединения катушек возможны со стороны низкого напряжения, но не со стороны высокого напряжения, где число параллельных ответвлений тока, в лучшем случае, может быть равно половине числа катушек.

Это ограничение не имеет практического значения. Конструктор всегда старается избежать параллельных соединений, особенно, со стороны высокого напряжения, где возможность избежать их у него имеется. Маломощные трансформаторы впрочем, могут быть универсальными, применимыми для целого ряда различных высоких напряжений. Например, можно обмотку высокого напряжения для 10 000 V, соединенную в звезду, употребить для 6 000 V при соединении треугольником, можно соединить ее 2 раза параллельно и использовать для 5 000 или 3 000 V. Но и в данном случае речь не может идти о многократных параллельных соединениях.

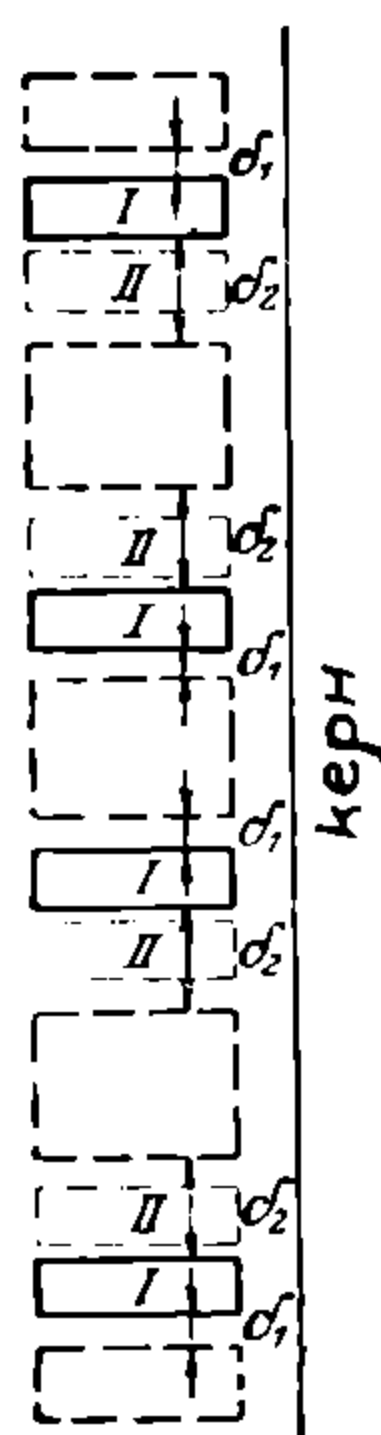
Значительным недостатком обладает расположение дисковых катушек фиг. 29. Здесь катушки высокого напряжения расположены по концам кернов. Если попытаться расположить по краям катушки низкого напряжения (см. фиг. 36), то при однофазной нагрузке конечная

НТБ
ДНУЗТ

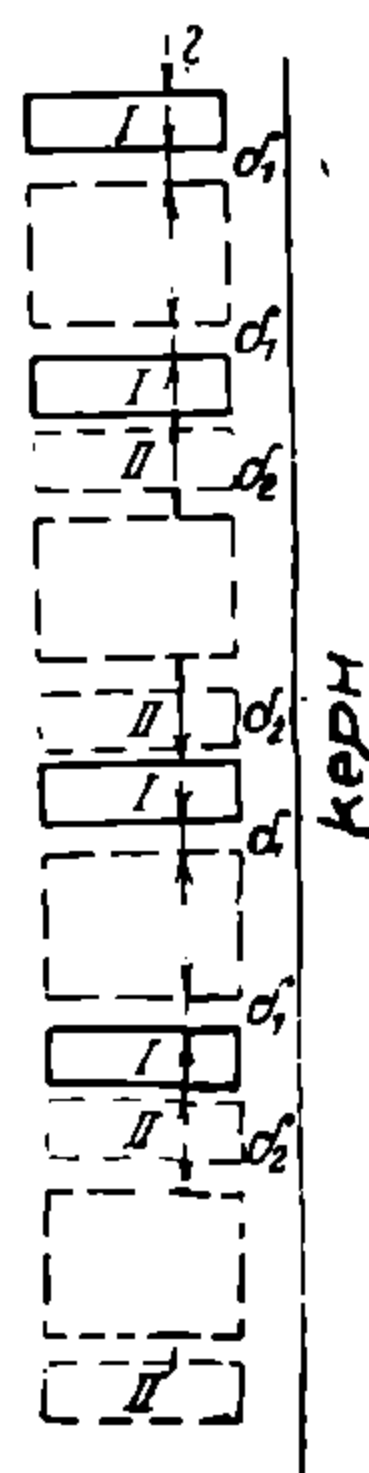
катушка нагруженной фазы оказывается неудобно расположенной. Ее трудно будет соединить параллельно с остальными половинами катушек.

Цилиндрическая обмотка фиг. 34 не создает каких-либо трудностей. Обе половины обмотки низкого напряжения, находящиеся на одном керне, имеют одинаковое расположение относительно обмотки высокого напряжения. Однако, при однофазной нагрузке индуктивное падение напряжения и здесь становится больше, чем при трехфазной нагрузке. Также и в этом случае увеличивается расстояние между обмотками высокого и низкого напряжений.

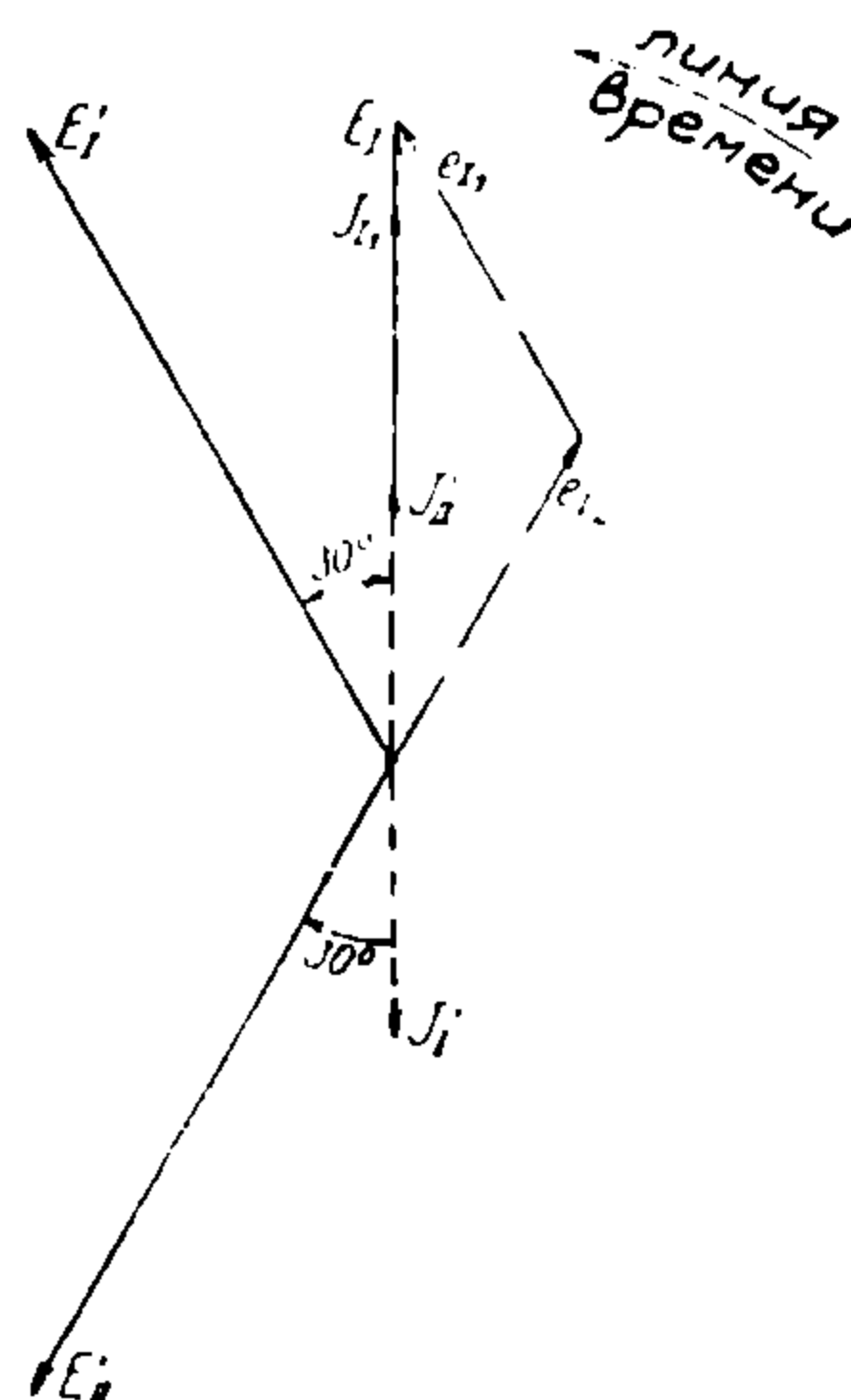
Ничто не меняется лишь при расположении обмотки фиг. 33. Здесь при однофазной нагрузке расстояние между обмотками и длина индукционной линии рассеяния остаются теми же, что и при трехфазной нагрузке. Это расположение обмотк несомненно является лучшим конструктивным решением проблемы соединения зигзагом.



Фиг. 35.



Фиг. 36.



Фиг. 37.

В результате исследования потоков рассеяния при соединении зигзагом нам удалось установить факт существования трех индуктивных падений напряжения. Каждую нагрузку осветительного трансформатора можно считать состоящей из одной равномерной трехфазной и из одной или двух добавочных однофазных. Результатом трехфазной нагрузки является нормальное индуктивное падение напряжения, как и при всяком другом способе соединения, и кроме того добавочное—свойственное лишь соединению зигзагом. Добавочная однофазная нагрузка вызывает второе добавочное индуктивное падение напряжения. Не без основания можно считать, что это второе добавочное падение напряжения значительно опасней. Как установлено выше, оно имеет дело, по меньшей мере, с двойным междуобмоточным промежутком, т.-е. с половиной магнитного сопротивления нормального потока рассеяния (конечно в том случае, если благоприятное расположение обмоток фиг. 33 оказывается невозможным). Это падение напряжения следует подробнее рассмотреть.

Каждая однофазная нагрузка передается двум первичным фазам, а именно тем двум, которые находятся на тех же двух кернах, на которых расположены находящиеся под нагрузкой вторичные фазы. Что

это действительно так и должно быть, следует из обязательности магнитного равновесия нагрузочных токов. На каждом керне первичные ампервитки, в магнитном отношении, уничтожают вторичные. Фиг. 37, построенная для одинакового числа витков в первичной и вторичной обмотках, показывает, как передается нагрузка. Эта диаграмма обращает наше внимание на то обстоятельство, что сдвиги фаз в первичной обмотке возникают и тогда, когда нагрузка вторичной обмотки безындукционна. В каждом случае однофазной нагрузки угол сдвига фаз в одной первичной фазе увеличивается на 30%, тогда как в другой фазе уменьшается на 30°.

Это — опасная особенность соединения зигзагом. Она указывает на то, что такое соединение приспособлено лишь для осветительного дела¹⁾. С появлением сдвига фаз в первичной обмотке, добавочное индуктивное падение напряжения однофазной нагрузки приобретает особое значение.

Из фиг. 37, кроме того, видим, что индуктивное падение напряжения однофазной нагрузки в $\frac{2}{\sqrt{3}}$ раза больше, чем это можно было принять, учитывая безындукционность нагрузки. Числовой пример внесет желательную ясность в этот вопрос.

Пример. Пусть осветительный трансформатор мощностью в 100 *kVA*, соединенный зигзагом, находится под неравномерной нагрузкой. Нагрузка двух фаз — по 23 $\frac{1}{3}$ *kW* каждая, а нагрузка 3-й фазы — 33 $\frac{1}{3}$ *kW*. Расположение обмоток в нем — дисковое. Расстояния между катушками таковы, что поток рассеяния при однофазной нагрузке имеет дело лишь с одной третью нормального магнитного сопротивления.

Принятая нагрузка распадается на равномерную трехфазную в 70 *kW* и однофазную в 10 *kW*. Равномерная трехфазная нагрузка вызывает нормальное индуктивное падение напряжения, составляющее конечно, лишь 70% от нормального индуктивного падения напряжения при полной нагрузке. К этому присоединяется добавочное индуктивное падение напряжения, оцениваемое, как это было доказано раньше, в виде 10%-й добавки к нормальному индуктивному падению напряжения.

Кроме того и однофазная нагрузка дает свое индуктивное падение напряжения. Последнее при однофазной нагрузке составляло бы половину нормального индуктивного падения напряжения при полной трехфазной нагрузке, так как оно вызвано на одном керне лишь половиной вторичной обмотки. Это индуктивное падение напряжения однофазной нагрузки было бы в 3 раза больше, так как магнитное сопротивление — в 3 раза меньше. Кроме того оно, согласно установленному выше способу передачи нагрузки, будет больше в $\frac{2}{\sqrt{3}}$ раза. В результате, это

дает в

$$0,5 \cdot 3 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,3 \text{ раза}$$

большее индуктивное падение напряжения при однофазной полной нагрузке, чем при полной трехфазной. Однако, так как однофазная нагрузка составляет здесь лишь одну треть от однофазной полной нагрузки, то добавочное индуктивное падение напряжения однофазной на-

¹⁾ И для ртутных выпрямителей.

грузки будет составлять лишь 43% от падения напряжения при трехфазной полной нагрузке.

В целом мы имеем дело с

$$100 [0,7 \cdot 1,1 + 0,43] = 120\%$$

того индуктивного падения напряжения, которое появился бы у такого же трансформатора при двухстороннем соединении звездой и при трехфазной полной нагрузке, несмотря на то, что в данном случае трансформатор находится далеко не под полной нагрузкой.

В действительности дело обстоит несколько иначе. Индуктивное падение напряжения при однофазной нагрузке сдвинуто в первичной обмотке на 30° относительно остального падения напряжения. Вследствие этого суммарное падение напряжения несколько уменьшается. При одинаковых соотношениях со стороны первичной и вторичной обмоток, имеем лишь

$$100 \left[0,7 \cdot 1,20 + \frac{0,43}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{0,43}{2} \right] = 116\%,$$

вместо вышеупомянутых 120%.

Однако, это лишь кажущееся преимущество. Именно первичное индуктивное падение напряжения при однофазной нагрузке и должно быть практически принято во внимание при осветительной нагрузке, так как оно не сдвинуто на 90° относительно рабочего напряжения. Оно имеет составляющую, действительно ослабляющую напряжение, и составляет половину первичного падения напряжения при однофазной нагрузке, соответственно фазовому углу в 60° .

Это дает

$$100 \cdot \frac{0,43}{2} \cdot \frac{1}{2} = 11\%,$$

нормального индуктивного падения напряжения при трехфазной полной нагрузке, направленных по фазе против рабочего напряжения.

Сравнительно немного. Конечно лучше было бы уничтожить это все же вредное добавочное явление. Ясно, что достигнуть этого практически возможно расположением обмотки согласно фиг. 33.

Числовой пример наглядно показывает, что однофазные нагрузки сильно увеличивают индуктивное падение напряжения. Это весьма существенно для параллельной работы осветительных трансформаторов. В осветительных сетях с неодинаковой нагрузкой фаз может случиться, что трансформаторы, соединенные зигзагом, передадут нагрузку на параллельно с ними работающие трансформаторы, соединенные в «треугольник-звезду».

30. СОЕДИНЕНИЕ В ЗВЕЗДУ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ.

В американском трансформаторостроении вопрос об односторонних однофазных нагрузках трехфазных сетей решается гораздо легче, чем в европейском. В Америке принято соединение с обеих сторон звездой с нулевым проводом (также с обеих сторон). Трехфазные трансформаторы состояются там просто из трех однофазных, совершенно самостоятельно выполненных трансформаторов.

Соединение звездой с первичной стороны с нулевым проводом дает большое преимущество, заключающееся в том, что фазовые токи при этом соединении имеют полную независимость и друг на друга не

НТБ
ДНУЗТ

вливают. Кроме того наличие трех самостоятельных кернов для трех фазовых магнитных потоков исключает всякую возможность взаимодействия этих потоков.

Совершенно очевидно, что при этом весьма приспособленном для осветительных целей соединении каждая однофазная нагрузка передается на первичную обмотку без изменений. Эксплуатационный инженер весьма доволен этим фактом, да и со стороны конструктора возражений не встретится.

В Европе почти не принято выводить нулевой провод со стороны высокого напряжения. Этим самым, конечно, теряется и возможность пользоваться соединением «звезда-звезда» — с двухсторонним нулевым проводом. Но если бы это соединение и применялось, оно отличалось бы от американского, так как трехфазный трансформатор в магнитном отношении менее свободен, чем трансформатор, составленный из трех однофазных.

В параграфе 27 было указано, что падение напряжения, возникающее в одной фазе, передается вследствие связанности трех фазовых потоков и на остальные фазы. Это не является недостатком в эксплуатации до тех пор, пока величина индуктивного падения напряжения не велика.

Американскому трансформаторостроению знаком трехфазный сердечник, но там он относительно редко применяется. Поэтому обычными там является только соединения треугольником и звездой. Соединение зигзагом — чисто европейский способ соединения. В нем — что-то искусственное, хотя, как мы в этом убедились, оно вполне приемлемо. Оно, собственно говоря, стремится к решению неразрешимой проблемы.

Соединение «звезда-звезда» с двухсторонним нулевым проводом является несколько неуклюжим, но зато прямым и здоровым решением. Оно, несомненно, является и самым дешевым решением вопроса для осветительного трансформатора.

Почти таким же решением вопроса как и соединение «звезда-звезда» с двусторонним нулевым проводом является и соединение «треугольник-звезда». И это соединение представляет собою естественное решение проблемы односторонней нагрузки.

С точки зрения только осветительного дела на деле почти невозможен окончательный выбор между тем или другим способом соединения. Однако, как ни существенно осветительное дело, оно не исчерпывает собой всех случаев в эксплуатации, могущих повлиять на выбор способа соединения. В эксплуатации мыслимы и другие, правда, менее важные случаи, которые должны быть учтены учением об эксплуатации. В этом вопросе незначительные обстоятельства могут дать перевес в ту или другую сторону при выборе того или иного соединения.

Исключительный, но все же существенный случай в эксплуатации представляет собою случай повреждения обмотки высокого напряжения в одной фазе. Эксплуатационному инженеру далеко не безразлично, выйдет ли поврежденный трансформатор из эксплуатации немедленно и на долгое время или он сможет, хотя бы в некоторой мере, продолжать свою работу. В следующем параграфе будет доказано, что в случае соединения треугольником мыслима такая временная работа.

Кроме того, весьма важным обстоятельством, влияющим на выбор способа соединения, является вопрос о высших гармонических составляющих намагничивающего тока. Дело не просто в том, что они должны быть уничтожены конструктором. Высшие гармонические значительно выступают при относительно малом повышении насыщения же-

леза сверх намеченного предела. В эксплуатации часто встречается потребность в повышении рабочего напряжения. Однако с возрастанием напряжения растет и насыщение в железе. Трансформатор, работающий удовлетворительно при номинальном напряжении, при больших напряжениях может показать ряд затруднений в работе. Эксплуатационный инженер должен изучить эти затруднения.

Наконец, несомненно и то, что трансформаторостроение переходит все более и более к нормализованным типам, по крайней мере в области малых и средних мощностей. Вопрос одинаково существен как для конструктора, так и для эксплуатационного инженера. Первый экономит на типовом ряде, второй получает более дешевые трансформаторы с вполне проверенными электрическими свойствами. Нормализация в трансформаторостроении немислима без нормализации обмоток. Они должны быть при всех напряжениях, по возможности, единообразны, особенно со стороны низкого напряжения. Единообразный трансформатор должен быть применим в одинаковой мере как для осветительных, так и для силовых установок. Отсюда вытекает и необходимость одновременной нормализации способов соединений. При этом выявляется решение в пользу одного из двух способов соединения: треугольника или зигзага. Здесь должен сказать свое слово и эксплуатационный инженер, ибо всякое изменение уже нормализованного способа в применении к отдельным случаям в эксплуатации будет сопряжено с материальными жертвами.

Надо полагать, что каждый фабрикант с гибкой шкалой цен будет избегать выполнения ненормальных конструкций.

31. V-ОБРАЗНОЕ СОЕДИНЕНИЕ.

Если трансформатор, соединенный в «треугольник-звезду» отключен вследствие повреждения какой-либо одной первичной фазы, то его можно через короткое время снова пустить в ход при уменьшенной мощности до прибытия заказанных сменных катушек для замены поврежденных (в случае, если резерв не был предусмотрен). Нарушенное соединение треугольником переходит в знакомое нам запасное соединение, а именно, V-образное.

V-образное соединение является ничем иным, как соединением треугольником, у которого недостает одной фазы. У треугольника напряжений первичной обмотки не хватает одной стороны, но все же остались три вершины. Так как электрическое соединение между сетью высокого напряжения и первичной обмоткой осуществляется лишь в этих трех точках, являющихся с электрической стороны вершинами треугольника напряжения, а с технической — с зажимами первичной обмотки — то, очевидно, возможна и дальнейшая работа трансформатора. Разумеется, перед пуском в ход для временной работы с неполной нагрузкой следует удалить поврежденную фазовую обмотку.

Каждый эксплуатационный инженер будет рад возможности продолжать работу временно хотя бы при ограниченной мощности. Ничто так не вредно в эксплуатации, как перерыв в подаче тока. В такие моменты не играет роли большая стоимость соединения треугольником. Оно при повреждении переходит в V-образное соединение, дающее хотя бы в некоторой мере, возможность продолжать работу. Этим оно безусловно ценно. V-образное соединение должно быть исследовано учением об эксплуатации, оно дает эксплуатационному инженеру больше, чем конструктору.

Сначала следовало бы рассмотреть работу V-образного соединения при равномерной трехфазной нагрузке. Это несомненно самый существенный случай. Однако, необходимо исследовать и случаи однофазных нагрузок при временной работе, для того чтобы иметь правильное суждение о V-образном соединении.

Соотношение отдельных элементов V-образного соединения при равномерной трехфазной нагрузке, так же как и при однофазной, предопределяются обязательностью электрического равновесия первичных токов и равновесия, в магнитном отношении, токов нагрузки. Таким образом электрическое и магнитное равновесия облегчают простое решение вопроса и при V-образном соединении.

При прохождении одинаковых токов нагрузки по всем трем фазам неповрежденной обмотки низкого напряжения, в обмотке высокого напряжения ток будет протекать лишь по двум фазовым обмоткам, так как третья отсутствует. Несмотря на это, трехфазный магнитный поток не должен быть нарушен.

Имеет ли трансформатор с V-образным соединением трехфазный магнитный поток? Безусловно имеет. Приложенный извне треугольник напряжения вызывает в обеих неповрежденных фазах противодействующие напряжения, сдвинутые друг относительно друга на 120° . Последние будут индуцироваться лишь в том случае, если через обе фазовых обмотки будут проходить два магнитных потока, также сдвинутых друг относительно друга на 120° . Эти оба потока находят для себя свободный путь через третий kern, на котором находится поврежденная обмотка. В этом третьем керне, таким образом, суммируются оба фазовых потока, образуя при этом третий фазовый поток трехфазного трансформатора.

Так как этот трехфазный нормальный поток не должен быть нарушен, то обе фазы V-образного соединения должны воспринимать такие токи, которые, в магнитном отношении, уравнивают «вторичный ток нагрузки» отсутствующей поврежденной обмотки. Вместе с тремя магнитными потоками трехфазного железного сердечника должны уравниваться и токи нагрузки в первичной и вторичной обмотках.

Если мы снова примем для простоты равное число витков в первичной и вторичной обмотках, то получим следующие уравнения равновесия. Обозначим три вторичных тока нагрузки I_1, I_2, I_3 ; оба первичных тока нагрузки — i_1 и i_2 (i_3 конечно отсутствует) (фиг. 39). Мы имеем

$$\begin{aligned} I_1 - i_1 + i_2 - I_2 &= 0, \\ I_1 - i_1 - I_3 &= 0, \\ I_2 - i_2 - I_3 &= 0. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} i_1 &= I_1 - I_3, \\ i_2 &= I_2 - I_3. \end{aligned}$$

Векторная диаграмма токов фиг. 40, представляющая собой случай симметричной, трехфазной нагрузки, дает простые результаты. При

$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

имеем

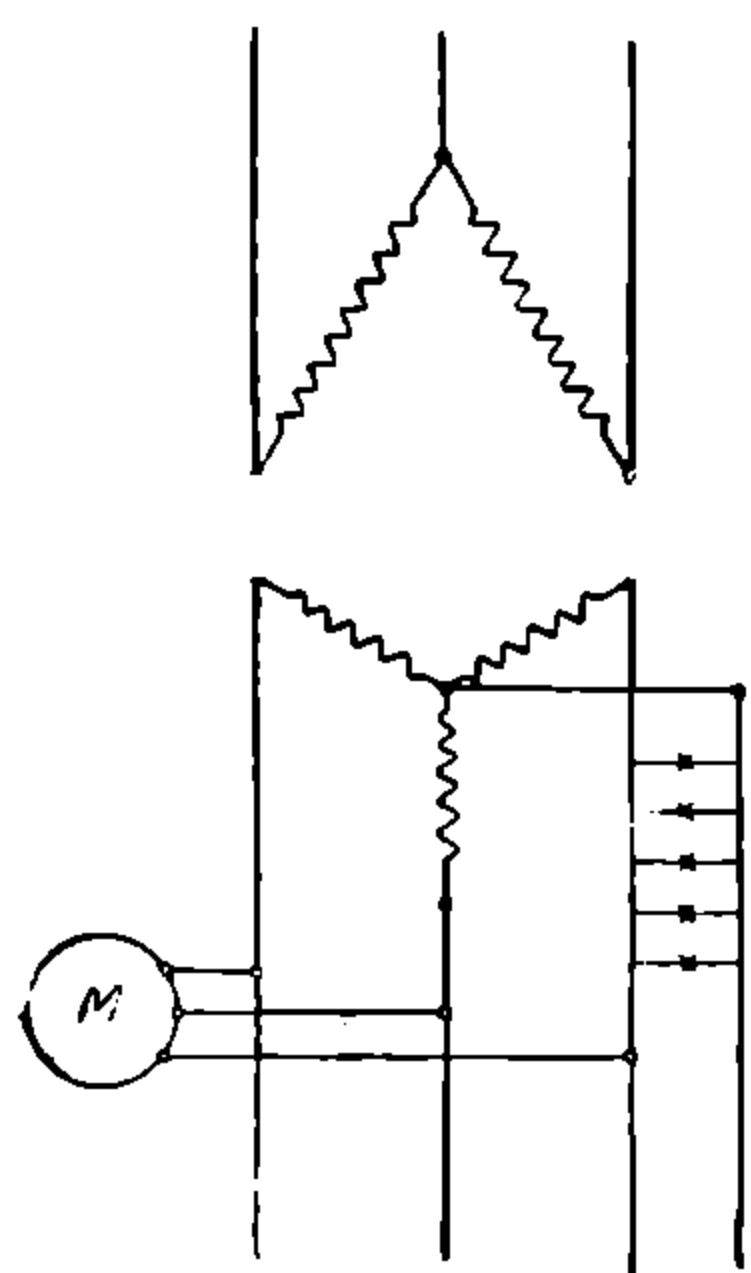
$$i_1 = i_2 = I\sqrt{3}.$$

При этом следует обратить внимание на то, что в обеих первичных фазах возникает сдвиг фаз в 30° , тогда как вторичные ток и напряжение совпадали по фазе. Попутно мы убеждаемся в правильности энергетического баланса.

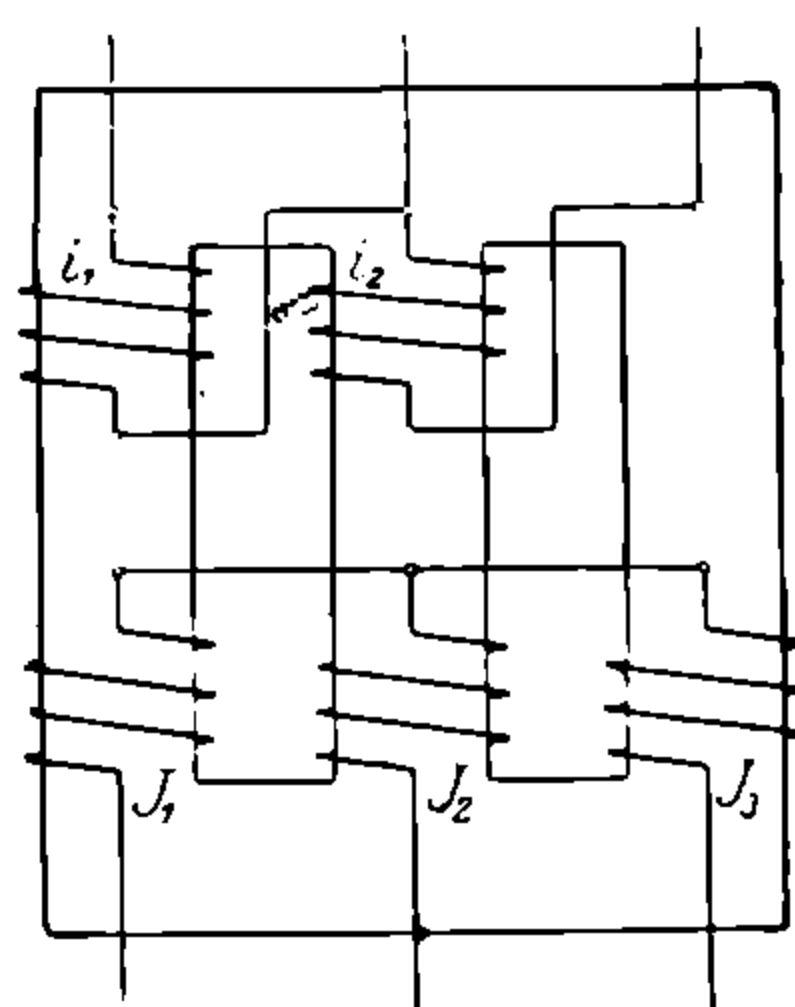
НТБ
ДНУЗТ

Кроме того, фиг. 40 показывает, что в одной первичной фазе ток отстает, а в другой — опережает. Если нагрузка трансформатора не свободна от индуктивности, то с первичной стороны возникают большие неравномерности. В случае сдвига фаз в 30° со вторичной стороны, в первичной обмотке угол сдвига фаз в одной фазе пропадает, тогда как в другой фазе ток будет отставать от напряжения на 60° , что представляет собой весьма нежелательную картину.

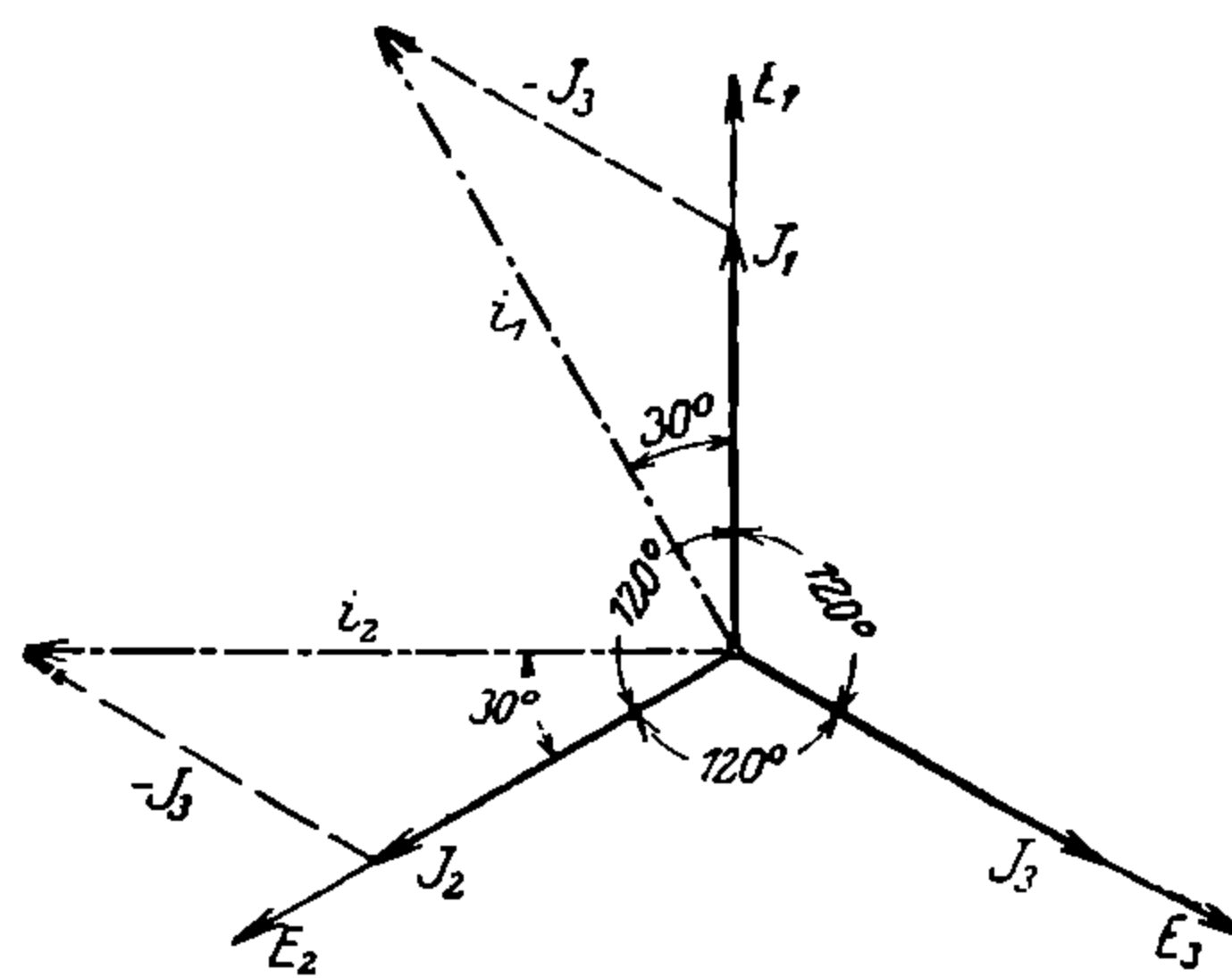
Магнитное равновесие главного магнитного потока обеспечивается указанным распределением нагрузки. Однако на отдельных ядрах возникают местные магнитные потоки, как и при однофазной нагрузке при соединении «звезда-звезда» без нулевого провода в первичной обмотке. На поврежденном ядре имеется лишь один ток I_3 . На обоих работающих ядрах с первичной стороны составляющая тока — I_3 не имеет компенсирующего тока. При принятом обратном направлении витков в первичной и вторичной обмотках, ампервитки, образуемые токами I на всех трех ядрах, оказываются местно в магнитном отношении совершенно свободными.



Фиг. 38.



Фиг. 39.



Фиг. 40.

Результаты известны. Возникает однофазный поток, общий всем трем ядрам, проходящий через них в одном направлении и вынужденный замыкаться через воздух, точно так же, как и в случае находящегося под однофазной нагрузкой соединения «звезда-звезда» без нулевого провода в первичной обмотке. Этот добавочный однофазный поток является вторым нежелательным явлением при V-образном соединении.

Третья трудность сказывается от тока холостого хода. Трехфазный магнитный поток, правда, остается неизменным при переходе от соединения треугольником к V-образному соединению, однако на ядре с поврежденной обмоткой отсутствует намагничивающий ток, создающий этот поток. Очевидно должны быть усилены намагничивающие токи остальных, работающих фаз.

Вначале кажется трудным определить изменение намагничивающих токов. Необходимо учесть насыщение в железе, а потому нельзя вести подсчет так, как будто бы три магнитных потока в трехфазном железном сердечнике представляют собой простую сумму. Все же имеется возможность решить эту задачу сравнительно несложным путем

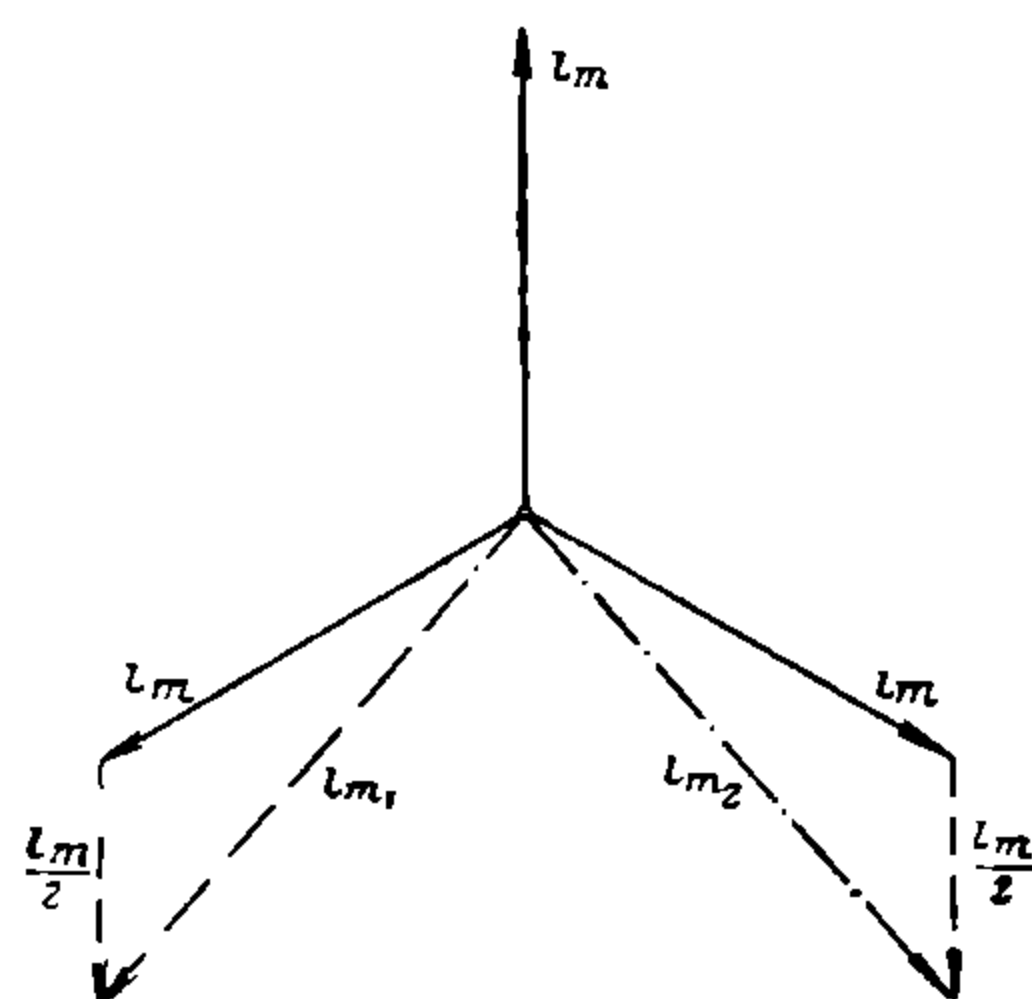
ИНТЬ
ДНУЗТ

Обе фазы V-образного соединения должны сначала воспринимать такие же намагничивающие токи, как до этого соединение треугольником. Этих токов пока достаточно для создания обоих фазовых потоков с их магнитной нулевой точкой. Возбуждение магнитного потока в третьем керне исходит также из обеих фаз, при чем, конечно, должно быть принято, что обе фазы находятся под одинаковой нагрузкой. Оба добавочных намагничивающих тока должны быть, повидимому, по фазе противоположны фазовому потоку, так как по отношению к обоим работающим кернам этот поток имеет обратное направление. Добавочный намагничивающий ток равен половине нормального. Таким путем возникает диаграмма фиг. 41.

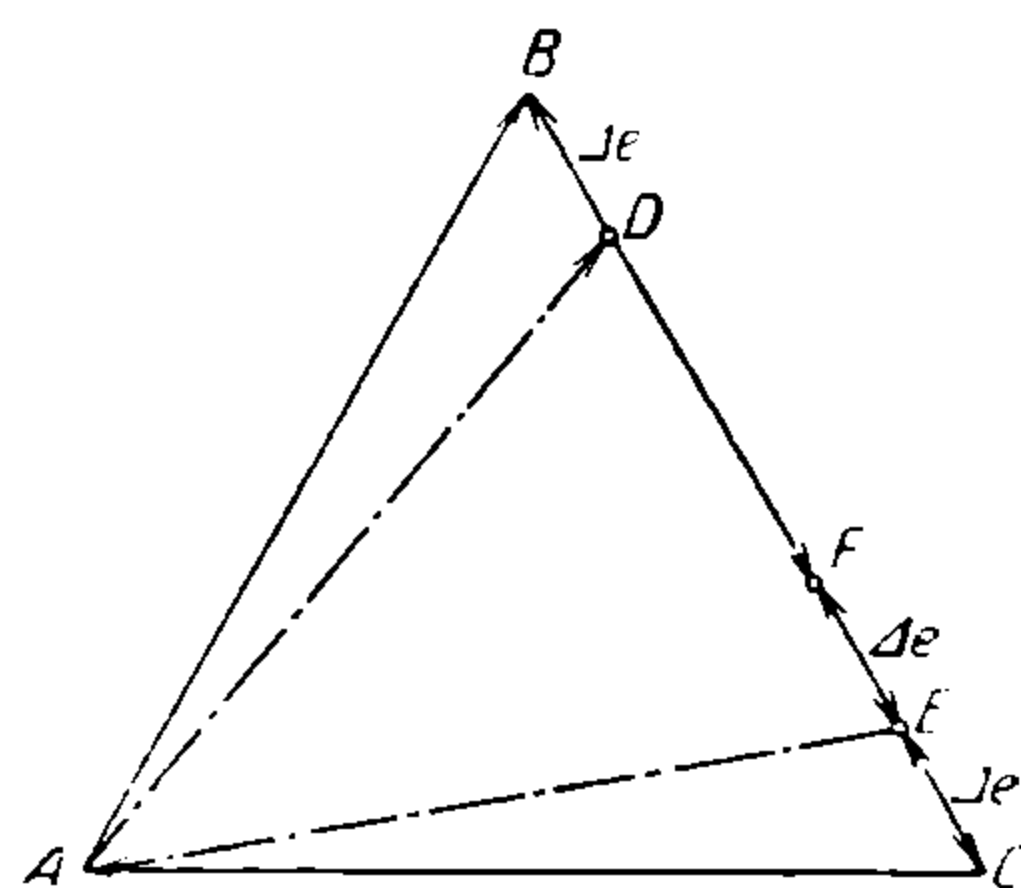
Не трудно подсчитать во сколько раз, вследствие V-образного соединения, увеличивается намагничивающий ток, а одновременно и весь ток холостого хода. Очевидно в

$$\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 + 2 \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} \cos 60^\circ} = 1,32 \text{ раза.}$$

Легко отметить теперь преимущества и недостатки V-образного соединения. Сначала следует обратить внимание на то обстоятельство, что трехфазная нагрузка распределяется на две первичные фазы. Если во



Фиг. 41.



Фиг. 42.

вторичной обмотке проходит полный допустимый ток в трех фазах, то в первичной обмотке оба тока в фазах в $\sqrt{3}$ раза больше, чем при нормальной работе. Конечно это недопустимо. Необходимость держаться допустимых границ нагревания трансформатора вынуждает нас и с первичной стороны оставаться в границах дозволенных величин силы тока. При V-образном соединении полная мощность трансформатора может быть равна лишь

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 100\% = 58\%$$

его номинальной мощности.

Значительное уменьшение. Но эксплуатационный инженер при аварии охотно согласится сократить на время подачу тока на 40%, если при этом он добьется бесперебойной работы.

Установленное выше увеличение тока холостого хода имеет практически малое значение. Для временной работы особенной роли не играет, будет ли ток холостого хода равен 10 или 13%. И это второе сопутствующее явление не может быть решающим при оценке V-образного соединения.

После всего этого ясно, что жизнеспособность V-образного соединения зависит лишь от последствий, вытекающих из однофазного добавочного потока. Все остальные отрицательные особенности этого соединения при временной работе в случае аварии относительно терпимы. Безусловно необходимое исследование этого добавочного потока и сопутствующих ему явлений с первых же шагов показывает, что здесь следует ожидать больших неправильностей в работе, чем при однофазной нагрузке неповрежденного трансформатора, соединенного звездой с первичной стороны без нулевого провода. Добавочный поток возбуждается здесь полным током нагрузки на каждом керне. Хотя этот полный ток нагрузки, как уже доказано, и составляет лишь 60% от нормального полного тока нагрузки, но добавочное напряжение, возникающее при этом, в два раза больше добавочного напряжения при однофазной осветительной нагрузке.

Уже по одному этому, помня диаграмму напряжений фиг. 15, следовало бы V-образное соединение признать неприемлемым. Но такая диаграмма напряжений вообще неприменима к V-образному соединению. С первичной стороны мы не имеем нулевой точки, которая могла бы сдвинуться. Соотношение величин здесь гораздо худшее, чем это может показаться при поверхностном рассмотрении.

Лучше всего заняться сразу исследованием самого неблагоприятного случая, а именно случая чисто индуктивной, хотя бы и симметричной нагрузки. Так как вопрос о направлении вектора добавочного напряжения решает та вторичная фаза, против которой с первичной стороны отсутствует обмотка, то, очевидно, добавочное напряжение на поврежденном керне будет непосредственно вычитываться от фазового напряжения. В приложенном треугольнике напряжений *ABC* фиг. 42 при V-образном соединении индуктированными противодействующими напряжениями уравниваются лишь приложенные напряжения *AB* и *CA*, напряжение же *BC* не уравнивается. На поврежденном керне, соответствующем стороне треугольника *BC*, электрическое равновесие не необходимо, да оно и немыслимо. Предполагается, что добавочное напряжение имеет направление *CB*.

Приложенное напряжение *AB* уравнивается внутренним напряжением *AD* (созданным главным магнитным потоком) вместе с добавочным напряжением *DB*. Таким же образом уравниваются приложенное напряжение *CA* с одной стороны и внутреннее напряжение *EA* (также созданное главным магнитным потоком) совместно с добавочным напряжением *CE* с другой стороны.

Но так как величина главного магнитного потока в одном неповрежденном керне определяется вектором напряжения *AD*, а в другом неповрежденном керне — вектором напряжения *EA*, то благодаря соединению звездой фазовых потоков величина главного магнитного потока в поврежденном керне должна определиться вектором *DE*.

Отсюда видно, что главный магнитный поток создает фазовые напряжения *AD*, *DE* и *EA* по одному определенному закону как с первичной, так и с вторичной стороны. Кроме того добавочный поток на каждом керне с первичной и вторичной стороны присоединяет вызванное им добавочное напряжение.

Таким образом, действительные вторичные фазовые напряжения будут соответствовать векторам *AB* и *CA*. На поврежденном же керне фазовое напряжение *DE*, индуктированное главным магнитным потоком, уменьшится на величину добавочного напряжения *DF*.

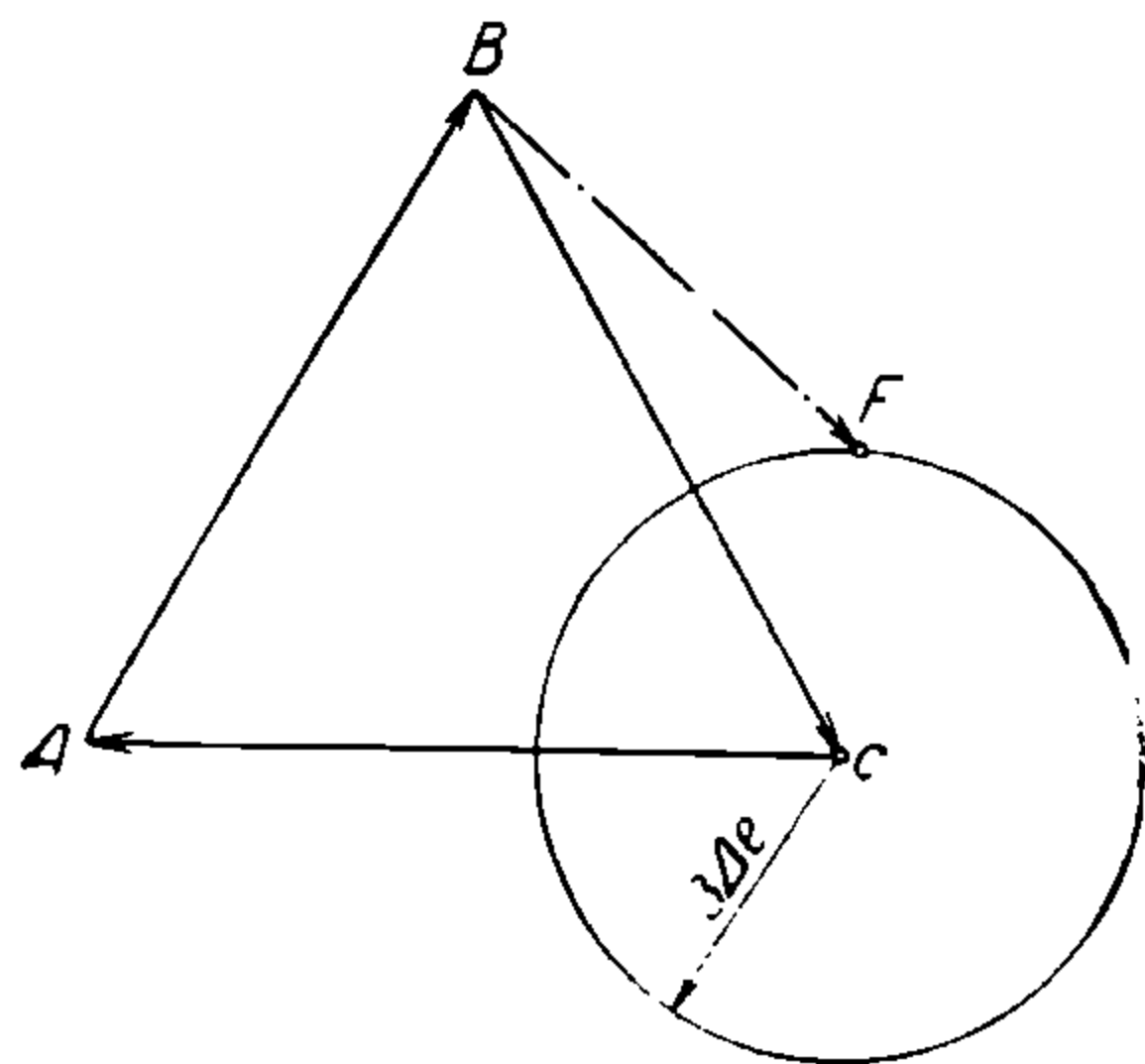
Это уменьшение вторичного фазового напряжения (на трехкратную величину добавочного напряжения) на поврежденном керне при симметричной, чисто индуктивной нагрузке — является весьма неожиданным результатом нашего исследования. Угол сдвига фаз в 120° остается при этом неизменным.

В электротехническом институте Люблянского университета 9 - kVA-й трансформатор, описанный выше в параграфе 27, был испытан при V-образном соединении. Нагрузкой для него служил работавший вхолостую асинхронный мотор. Эта нагрузка составляла приблизительно 60% нормальной мощности трансформатора. При испытании, упомянутом в параграфе 27, он имел 30% добавочного напряжения при условии возбуждения его однофазного добавочного потока полным током нагрузки.

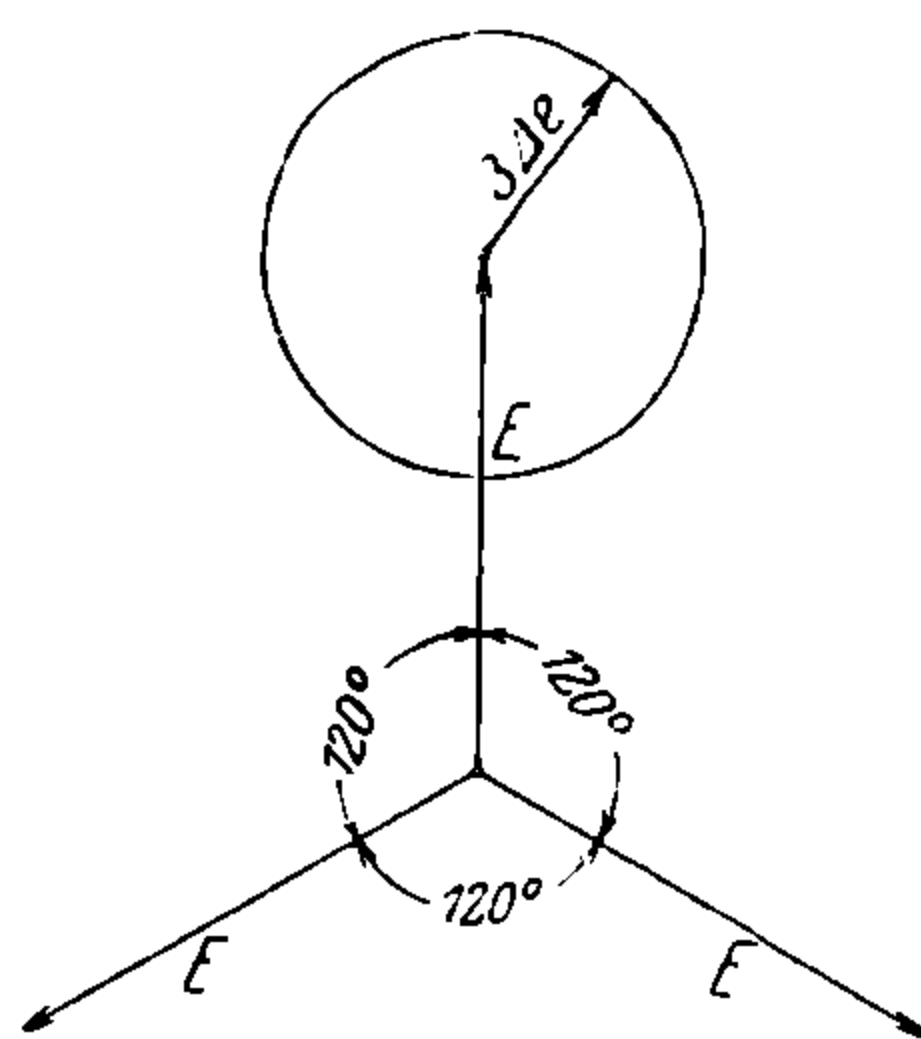
При втором испытании с V-образным соединением этот поток должен был снизиться до

$$3 \cdot 0,6 \cdot 30 = 54\%$$

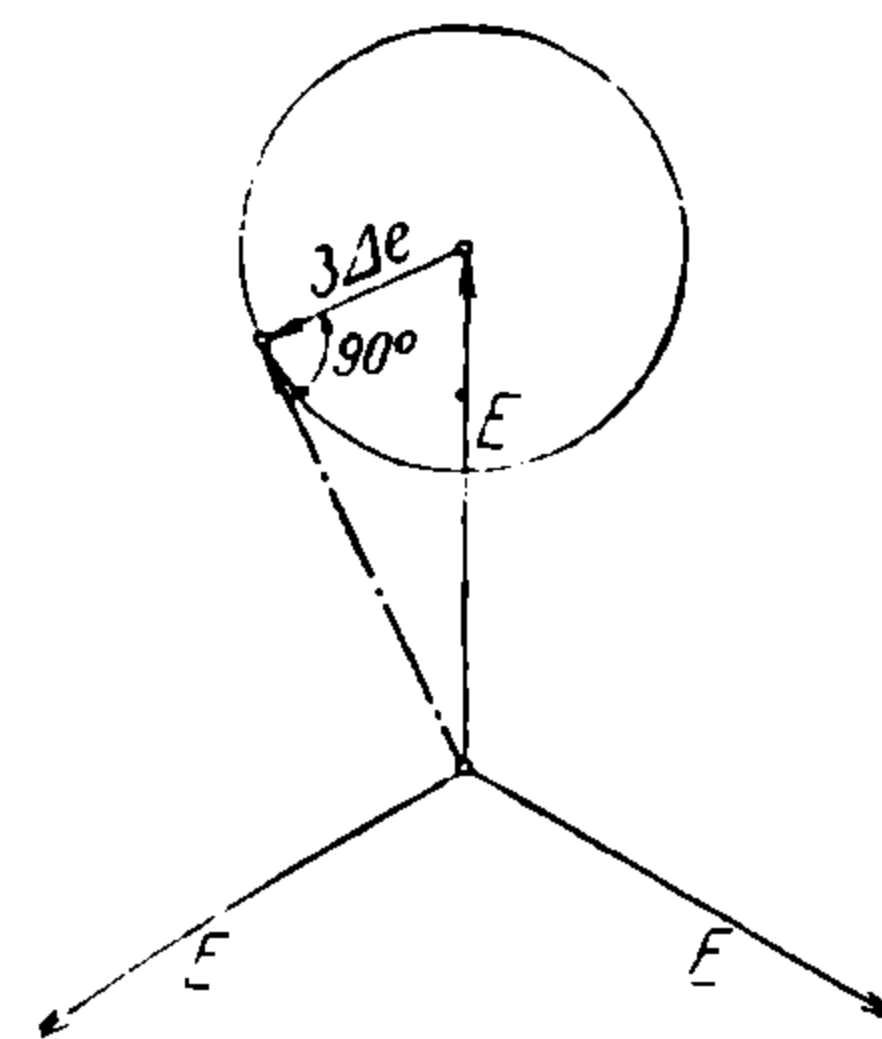
Измерения дали фазовые напряжения: 131, 131 и 76.4 V, при чем нагрузка не была чисто индуктивной.



Фиг. 43.



Фиг. 44.



Фиг. 45.

Не трудно придти к общему для всех случаев решению проблемы V-образного соединения. При различных сдвигах фаз нагрузки вектор добавочного напряжения направлен по-разному. Описав окружность, центром которой является вершина C треугольника напряжений, а радиусом — утроенная величина добавочного напряжения, мы получаем на поврежденном керне вторичное фазовое напряжение в качестве вектора, выходящего из B и оканчивающегося на окружности. Остальными двумя фазовыми напряжениями будут AB и CA. Можно, конечно, диаграмму напряжений V-образного соединения представить в виде, изображенном на фиг. 44, где ясно видна вторичная система напряжений V-образной обмотки.

Подобные особенности V-образного соединения делают его как будто неприемлемым и для временной работы в экстренных случаях. Если напряжение на поврежденном керне может подняться или упасть на 50%, то эксплуатационный инженер вряд ли решится на применение V-образного соединения в эксплуатации.

Но все же V-образное соединение не так плохо, как это кажется. При чисто осветительной нагрузке добавочное напряжение должно отставать на 90° от суммарного фазового напряжения. Фиг. 45 изображает этот случай. Если использовать трансформатор на 60% от его нор-

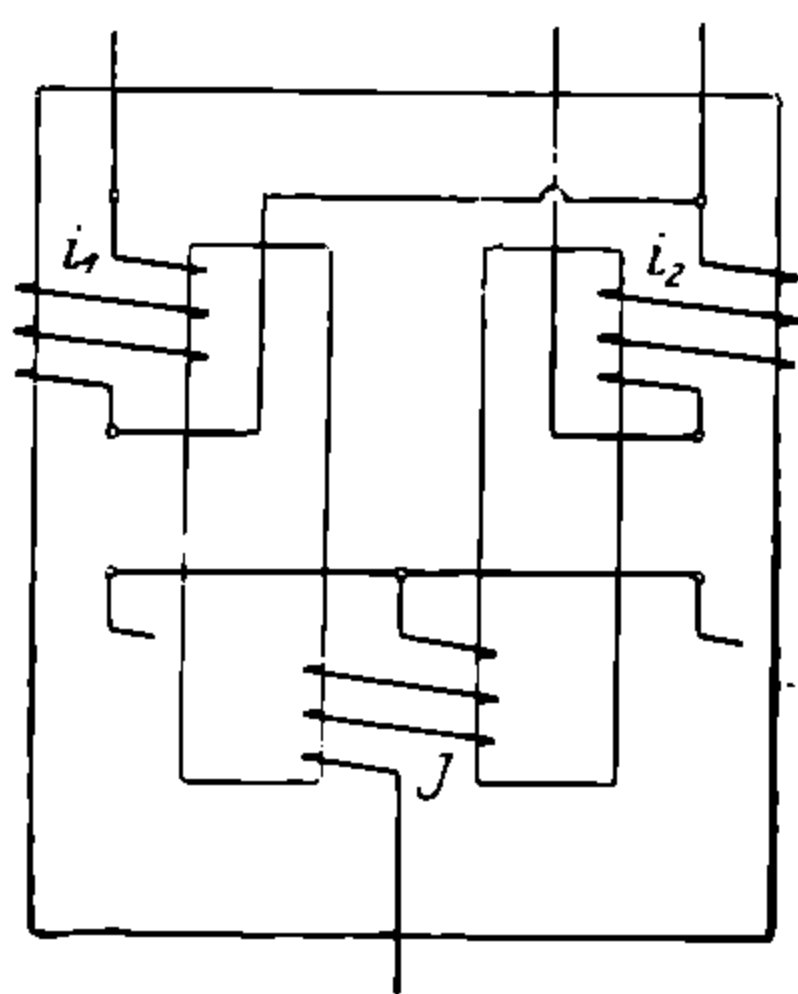
мальной мощности и принять величину добавочного напряжения в 30% (что соответствует добавочному потоку, возбужденному полным током нагрузки), то придется считать для поврежденного керна величину утроенного добавочного напряжения в 54%.

Согласно рис. 45, фазовое напряжение поврежденного керна будет составлять

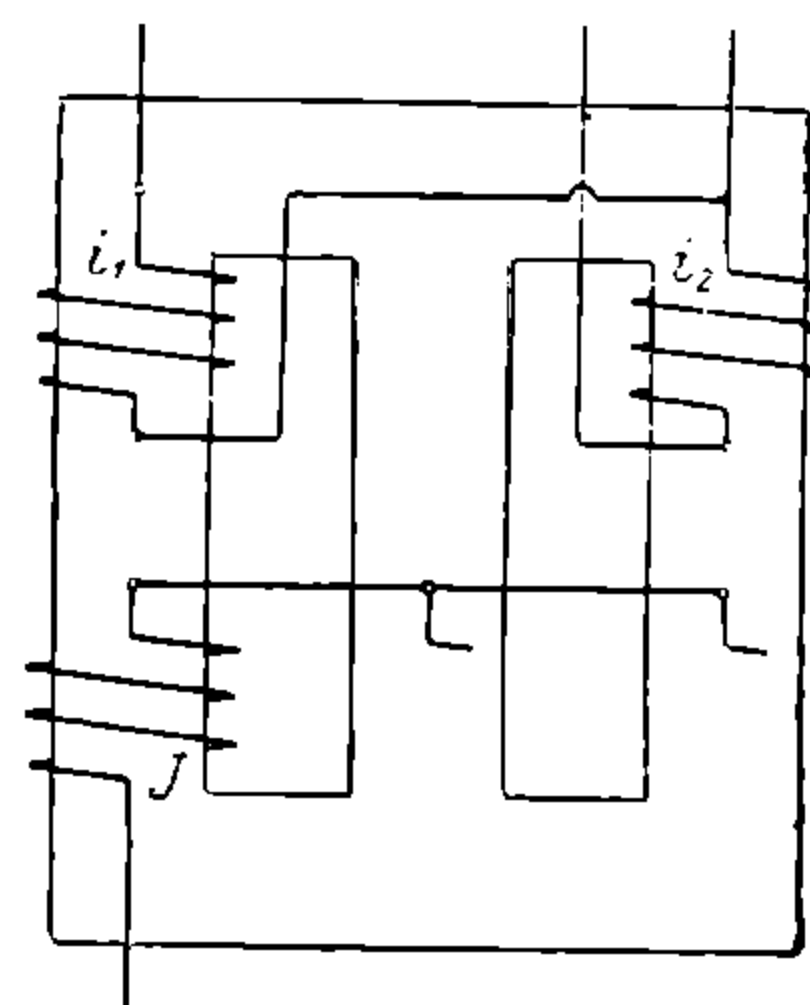
$$\sqrt{1 - 0,54^2} = 0,84,$$

т.е. 84% от нормального фазового напряжения. Речь идет, таким образом, о падении напряжения в 16%. С возрастающим углом сдвига фаз нагрузки соотношения, конечно, ухудшаются. Это ухудшение особенно заметно в фазе, соответствующей поврежденному керну.

V-образное соединение может быть несколько улучшено. Легко убедиться в том, что значительность размеров однофазного добавочного потока V-образного соединения при симметричной вторичной нагрузке объясняется действием тока нагрузки во вторичной обмотке, находящейся на керне с поврежденной первичной обмоткой. На фиг. 46 изобра-



Фиг. 46.



Фиг. 47.

жен случай однофазной нагрузки, при чем под нагрузкой находится вторичная фаза на том керне, на котором отсутствует первичная обмотка. Из этого рисунка можно получить следующие уравнения

$$\begin{aligned} I + i_1 &= 0, \\ I + i_3 &= 0, \\ i_1 - i_3 &= 0. \end{aligned}$$

Это — уравнения магнитного равновесия в трех замкнутых цепях. Следовательно

$$i_1 = i_3 = I.$$

Таким образом возникает добавочный поток той же величины, что и при симметричной полной нагрузке.

Фиг. 47 соответствует случаю однофазной нагрузки на неповрежденном керне. Условия равновесия здесь следующие

$$\begin{aligned} I - i_1 + i_2 &= 0, \\ I - i_1 &= 0, \\ i_3 &= 0. \end{aligned}$$

откуда следует, что

$$\begin{aligned} i_1 &= I, \\ i_3 &= 0. \end{aligned}$$

На этот раз не возникает добавочного потока.

Мы видим, что, уменьшая нагрузку фазы, находящейся на поврежденном керне, можно произвольно уменьшать недостатки V-образного соединения.

Если же эту фазу совершенно выключить, то получится совершенно удовлетворительная работа, при чем вторичную нагрузку можно довести до полной величины номинального тока.

Таким образом мы видим, что V-образное соединение не является плохим для временной работы в экстренных случаях. После удаления поврежденной первичной фазовой обмотки полная подача энергии двумя фазами остается мыслимой. Это является значительным достижением для эксплуатационного инженера. Кроме того нет никакой необходимости совершенно отключить третью фазу. Она может продолжать выполнение своих очень важных функций. Хотя V-образное соединение и неудовлетворительно для силовых установок, однако моторы при нем не останавливаются! По крайней мере важные приводы могут продолжать свою работу. В подобных случаях не обращают внимания ни на потери в трансформаторе, ни на потери в моторах.

32. СРАВНЕНИЕ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.

Из предыдущих рассуждений ясно, что соединения трехфазных трансформаторов имеют большое значение при их работе. Особенной осторожности требует с теоретической точки зрения европейский трехфазный трансформатор.

Силовой трансформатор имеет дело с симметрично распределенной нагрузкой. Он легко удовлетворится обыкновенным, дешевым соединением «звезда-звезда». Он является не только экономически, но и электрически — самой простой конструкцией.

Для осветительных трансформаторов представляется выбор между соединениями «треугольник-звезда» и «звезда-зигзаг». Никакое солидное предприятие не будет воспринимать осветительную нагрузку более дешевым соединением «звезда-звезда», исключая разве тот случай, когда в распоряжении имеется нулевой провод со стороны высокого напряжения.

Эксплуатационному инженеру нелегко выбор. Строители трансформаторов имеют как-будто тенденцию предлагать предприятиям соединение зигзагом. Они совершенно правильно мотивируют это тем, что соединение зигзагом не дороже соединения треугольником и что оно в электрическом отношении выполняет свою задачу не хуже соединения треугольником. И действительно, при нормальной эксплуатации безразлично, какое из двух соединений осуществлено.

Конструктор, пытающийся продвинуть соединение зигзагом, имеет при этом свои особые соображения. Он стремится к унификации конструкций. Так, наряду с нормальным потребляемым напряжением в 380/220 V существует потребляемое напряжение 220/125 V.

Как известно, при соединении зигзагом во всех фазах имеются по две половины обмотки в каждой. Каждая половина дает 220 V, а в последовательном соединении 380 V. Когда соединение зигзагом выполнено и обе половины обмотки низкого напряжения каждого керна соединены между собою параллельно, то эта обмотка оказывается соединенной в обыкновенную звезду для напряжения 220/125 V.

Эксплуатационный инженер обычно не заинтересован в этих возможных комбинациях. Если он все же останавливается на этом соеди-

нении, то исключительно по своим особым соображениям. Он не хочет останавливать подачу энергии при каждой порче обмотки высокого напряжения, он хочет обеспечить возможность дальнейшей работы при подобных авариях. Он вынужден подумать о V-образном соединении.

Обе точки зрения еще и потому резко противостоят одна другой, что вопрос о возможности дальнейшей нормальной работы остался открытым. Большие предприятия ремонтируют сами свои маломощные трансформаторы. Так как обычно заводы возражают против ремонта трансформаторов самими предприятиями, то эксплуатационному инженеру особенно важна конструкция, при которой он мог бы не слишком долго ждать и, кроме того, не платить высоких цен за срочные исправления.

Соединение «треугольник-звезда» является, безусловно, самым лучшим соединением в эксплуатации. Ненормальные низкие напряжения соответствуют ненормальным ценам. Возможность временной работы при авариях необходима. Кроме того соединение треугольником устраняет недостатки, свойственные европейским конструкциям и обнаруживаемые уже при холостом ходе.

Конструктор должен подумать над тем, что за последнее десятилетие он уступил в вопросе насыщения железа не под давлением эксплуатационного инженера, не потому, что возникали затруднения из-за тока холостого хода, а также и не потому, что трудно было справиться с потерями холостого хода, а лишь из-за однофазного добавочного потока третьей гармонической составляющей намагничивающего тока. Подумав над этим, он станет уступчивее в вопросе о предпочтении соединения треугольником соединению зигзагом. Соединение звездой с первичной стороны является тормозом для европейской конструкции. Оно ограничивает насыщение в железе, но не намагничивающий ток.

Новые электрические станции должны помнить о том, что им вероятно придется со временем повысить напряжение передачи. Они в этом случае безусловно закажут и для силовых трансформаторов соединение треугольником, дабы потом путем пересоединения треугольника на звезду иметь возможность повысить напряжение на 73%. Также и это обстоятельство говорит в пользу соединения треугольником как пригодного при унификации европейских конструкций.

33. АМЕРИКАНСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ.

В Америке принято составлять трехфазные трансформаторы из трех однофазных единиц, т.-е. трансформируют каждую фазу в самостоятельном однофазном трансформаторе. Вопрос о способе соединения из-за этого, конечно, не отпадает. Разумеется отделение фаз не распространяется на сеть.

Так как все три обмотки высокого напряжения трехфазовых трансформаторов соединены или в треугольник или в звезду, и так как эти три трансформатора в электрическом отношении составляют одно целое, а в магнитном — самостоятельные единицы, то возникает и проблема о способе соединения.

Со стороны низкого напряжения для американского типа не возникает сомнения относительно способа соединения так же как и для европейского. Для питания силовых установок требуется треугольник напряжений, для осветительных — необходимы нулевая точка и нулевой провод. Попрежнему остается вопрос лишь о соединении первичной обмотки.

Магнитное взаимодействие, наблюдаемое в европейских конструкциях, имеет свои недостатки, но полная независимость магнитных потоков исключает возможность всякой взаимной поддержки фаз. Нагрузка какой-либо фазы должна быть уравновешена нагрузкой первичной обмотки той же фазы, иначе говоря, нагрузка одного из трех фазовых трансформаторов сказывается на работе лишь этого трансформатора.

Поэтому для американского трехфазного осветительного трансформатора недопустимо соединение первичной обмотки звездой без нулевого провода. При подобном соединении ток нагрузки одной первичной фазы вынужден был бы за неимением другого пути пройти через обмотку второго фазового трансформатора. Так как в последнем не оказалось бы уравновешивающего тока, то магнитное равновесие полностью нарушилось бы. Лишь соединение треугольником дает току возможность проходить непосредственно из фазовой обмотки трансформатора в провода сети, минуя при этом обмотки других фазовых трансформаторов.

Но при наличии нулевого провода первичная звезда при американских типах становится соединением вполне приемлемым для осветительного дела. Это соединение соответствует сущности сложного трехфазного трансформатора больше, чем соединение треугольником, так как наряду с устранением магнитной зависимости сохранена и полная электрическая независимость.

Легко заметить, что в случае наличия самостоятельных трансформаторов для каждой фазы первичная звезда без нулевого провода непригодна и для обслуживания силовых установок. Неравномерности, как бы они ни были малы, все же возможны. Ни на одну из электрических неравномерностей фазовые трансформаторы не в состоянии без вредных последствий реагировать в магнитном отношении.

На деле в Америке принято применять нулевой провод также и со стороны высокого напряжения. Вопрос о способе соединения этим самым значительно упрощается. Соединение «звезда-звезда» с двусторонним нулевым проводом является простым и дешевым решением вопроса. Оно было бы пригодно и для европейского типа.

Магнитная независимость влечет за собой и электрическую. Сложные соединения при американском сложном трехфазном трансформаторе невозможны. Его проблема соединений проста. Это — преимущество, которым европейский трехфазный трансформатор не отличается.

У. Чрезмерные токи.

34. ЗАЩИТА ОТ ЧРЕЗМЕРНЫХ ТОКОВ И ЕЕ ПРОБЛЕМЫ.

При длительной работе трансформатор выносит определенные напряжения и ток нагрузки. Если бы в нашем распоряжении были идеальные строительные материалы, если бы медь не имела электрического сопротивления, а железо — ни магнитного сопротивления, ни электрического и никаких потерь на гистерезис, то каждый трансформатор можно было бы подвергнуть любой нагрузке.

Тепловые потери в меди и железе кладут известные пределы нагрузкам. Собственно говоря, мы строим трансформаторы не по мощности, а по потерям. Изоляционный материал и в первую очередь хлопчатая бумага боится перегрева. Начиная со 110° С хлопчатобумажная оплетка проводов начинает быстро портиться.

Конструктор заботливо следит за тем, чтобы при максимальной мощности нагрев не выходил из рамок допустимого. При построении трансформатора он будет руководствоваться существующими нормами нагрева. На заводской табличке он укажет допустимую длительную нагрузку, характеризуемую допустимым нагревом.

В эксплуатации напряжение будет подвергаться лишь незначительным изменениям. Сила тока является единственной мерой нагрузки. Поэтому эксплуатационный инженер учитывает не допустимую мощность, а допустимую силу тока нагрузки. Последняя указана на заводской табличке наряду с допустимой мощностью.

При этом положении вещей конструктор считает свой долг выполненным. Он предусмотрел все: он рассчитывал для худшего случая, а именно, случая длительной полной нагрузки, он предупредил также и эксплуатационного инженера о его возможных ошибках. Однако, для эксплуатационного инженера вопрос о допустимом максимальном токе этим не исчерпывается. Он желает, да он и обязан, использовать все преимущества конструкции и он их должен знать. Он часто вынужден допускать токи нагрузки значительно большие, чем это указано на заводской табличке. Поэтому проблема токов перегрузки является также немаловажной проблемой учения об эксплуатации.

На деле токи перегрузки допустимы. Проблема осветительного трансформатора, рассмотренная во II главе, показывает, что можно без всяких опасений допускать значительные токи перегрузки. Они не должны лишь быть длительными. Конструктор строит, так сказать, на долго, а эксплуатационный инженер подвергает сравнительно кратковременным нагрузкам

Номинальный ток трансформатора является лишь особым случаем допустимого тока нагрузки. Без труда можно убедиться в том, что действительный допустимый ток нагрузки является функцией длитель-

НТБ
ДНУЗТ

ности нагрузки. Номинальный ток является наименьшим допустимым током нагрузки, так как он соответствует максимальной длительности нагрузки. Из всего сказанного ясно, что проблема чрезмерных токов теоретически представляет собою проблему зависимости тока нагрузки от длительности последней.

С первого взгляда может показаться, что с решением специфических вопросов осветительного дела, проблема чрезмерных токов практически исчерпана. Но вопросы питания силовых установок требуют таких же исследований, как и для осветительного дела. Особенное теоретическое сходство с последним обнаруживает прокатное дело. И здесь после периода нагрузки регулярно следует работа вхолостую, однако, нагрузки и разгрузки чередуются здесь гораздо чаще. Проблему чрезмерных токов для неравномерного производства можно, безусловно, считать аналогичной проблеме осветительного дела.

Нежелательные токи перегрузки неизбежны и во всяком производстве. Толчки пока могут возникнуть и в самой лучшей установке. Эти толчки — небольшой длительности, но их следует принимать во внимание. Известно, что при включении необходимо рассчитывать на двойной номинальный ток. Допустимая длительная мощность практически недостижима без проходящих токов перегрузки.

Наконец бывают более или менее крупные аварии, бывают короткие замыкания. Короткие замыкания это — самый большой ток нагрузки. Он должен быть максимальным допустимым током нагрузки, не причиняющим вреда трансформатору.

Конечно, и конструктор не забывает о возможности чрезмерных токов в том числе и короткого замыкания, но если нет соглашения с эксплуатационным инженером, если последний не знает, какие требования можно предъявлять трансформатору, то самая безукоризненно выполненная конструкция будет подвержена постоянной опасности. Все практически зависит от того, в какой мере трансформатор предохранен в эксплуатации.

Чрезвычайно стара в электротехнике идея предохранителя, этого искусственно ослабленного отрезка замкнутой цепи, плавящегося под влиянием чрезмерного тока, прежде чем развиваемая теплота успеет подвергнуть трансформатор опасности сгорания. Однако плавкий предохранитель давно уже стал недостаточным для предохранения трансформатора. Дело в том, что этот предохранитель слишком быстро действует. Чрезмерные токи неизбежны они должны быть допущены, не должны быть только длительными. Правильно действующий предохранитель должен действовать лишь через определенный промежуток времени, он должен дать возможность чрезмерному току уменьшиться.

Нет ничего более нарушающего правильность работы предприятия, как часто повторяющиеся перерывы в подаче тока при более или менее значительных токах перегрузки. Это, конечно, защищает трансформатор, но, как сказано, делает нормальную работу невозможной. Плавкий предохранитель в этом случае должен быть заменен автоматом с выдержкой времени.

С точки зрения учения об эксплуатации проблема чрезмерных токов распадается на множество частичных проблем. Первой из них является, конечно, определение величины возможных чрезмерных токов и соответствующей им допустимой длительности. Второй частичной проблемой следует считать исследование возможности применения плавких предохранителей, а третьей — правильное применение автомата с выдержкой времени.

Нет сомнения, что на практике еще до сих пор происходят недоразумения с вопросом о предохранении трансформатора от чрезмерных токов. Плавкие предохранители можно встретить и теперь довольно часто на трансформаторных станциях. Именно вследствие своей недостаточности они создают большие опасности производству. Дежурный постепенно увеличивает сечение предохранителя, пока он не перестанет совершенно действовать.

Также и реле времени не всегда устанавливаются правильно. Желание избежать частых беспокойств, вызываемых действием реле, влечет к неправильной его установке.

Проблема чрезмерных токов может быть решена лишь при ясном понимании опасностей и при дружной, совместной работе эксплуатационного инженера с конструктором над построением такого трансформатора, который в максимальной мере удовлетворял бы требованиям эксплуатации.

35. ВЫДЕРЖКА ВРЕМЕНИ АВТОМАТА.

Не требует большого труда доказать как конструктору, так и эксплуатационному инженеру, что выдержка времени предохранителя или автомата при трансформаторе должно быть не больше допустимой длительности максимальной перегрузки. С другой стороны ток, при котором выключается автомат, должен быть не меньше, чем самый меньший чрезмерный ток, встречающийся в нормальной эксплуатации.

Это вполне естественная формула, учитывающая как нужды эксплуатации так и особенности конструкции, дает ясное решение проблемы чрезмерных токов. Но решение этим еще не обеспечено. Учение об эксплуатации должно кроме того рассмотреть, возможно ли вообще решение этой проблемы.

На первых порах это кажется безнадежным. Чрезмерные токи, особенно токи короткого замыкания могут возникнуть в любой момент и тогда, когда нагревание трансформатора достигло своих допустимых пределов. Отсюда следует, что каждый чрезмерный ток, возникающий у трансформатора, до этого работавшего с полной нагрузкой, должен был бы рассматриваться как недопустимый чрезмерный ток, так как нагрев изоляционных материалов обмотки уже переходит допустимые пределы.

Однако и понятие допустимой температуры является растяжимым. При длительной нагрузке недопустима температура выше 105°C , так как она относительно быстро разрушает хлопчатобумажную оплетку проводов обмотки. Но время все же играет важную роль. Что становится опасным спустя 100 часов, то лишь намечается по истечении первых 10 секунд. Поэтому с точки зрения проблемы чрезмерных токов к рассмотрению вопроса о допустимом нагревании трансформатора следует применить другой масштаб.

При самых больших токах, а именно при коротком замыкании допускают предельное значение температуры, иначе говоря, температуру сгорания или воспламенения изоляции. Полезно рассмотреть внимательнее эту предельную температуру.

Хлопчатая бумага и обыкновенная бумага, — эти главнейшие твердые изоляционные материалы современного трансформаторостроения — обугливаются при температуре выше 200°C . При 175°C хлопчатая бумага начинает желтеть, что является признаком наступления остаточных тяжелых повреждений. Картонные цилиндры выдерживают 150°C и при длительной мощности, следовательно, к ним можно предъявить те же требования, что и к хлопчатой бумаге.

НТБ
ДНУЗТ

Масло чувствительней. Температура воспламенения трансформаторного масла приблизительно 170°C . Конечно не следует допускать высоких температур масла, так как это подвергло бы опасности весь трансформатор.

При нормальной работе обмотка трансформатора имеет на своей поверхности, соприкасающейся с маслом, превышение температуры в 60 до 65°C над температурой воздуха, при температуре последнего равной 35°C , т.-е. температуру в 95 до 100°C . В исключительных случаях она может быть повышена приблизительно на 60°C , не подвергая опасности масляную ванну. Это было бы исходной точкой для практического решения проблемы чрезмерных токов.

Ясно, что при длительности чрезмерного тока в несколько секунд, отдача тепла обмоткой маслу или воздуху ничтожна. Речь идет просто о теплоемкости всей обмотки.

Расчет, следовательно, относительно прост. Теплота, возникающая в обмотке, растет пропорционально квадрату тока нагрузки. При чрезмерном токе I' который больше номинального тока в

$$k = \frac{I'}{I} \text{ раз,}$$

выделяемая теплота будет в k^2 раз больше, чем при номинальной мощности (при которой теплота соответствует $V_{\text{н}}$ ваттам). Как указано в параграфе 15, теплоемкость обмотки можно подсчитать так, как-будто бы обмотка состояла из сплошной меди. Наружные размеры изолированных катушек дают нам кажущийся вес меди обмоток G'_m , который больше действительного веса меди G_m . Отношение

$$\frac{G'_m}{G_m},$$

является мерой объемного использования меди.

Теплоемкость меди равна

$$C_w = 390 \frac{\text{Watt/sek}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}}$$

так что температура обмотки повысится на допустимые 60°C в продолжение

$$t_w = \frac{390 \cdot G'_m \cdot 60}{k^2 \cdot V_m} \text{ сек.}$$

Выразим теперь теплоту при номинальной мощности через вес меди и нормальную плотность тока

$$i \text{ [A/mm}^2\text{]}$$

$$V_m = 2,5 G_m i^2.$$

Тогда получаем выражение для выдержки времени автомата

$$t_w = \frac{G'_m}{G_m} \cdot \frac{10^4}{k^2 \cdot i^2} \quad (20)$$

Уравнение для расчета выдержки времени содержит в себе наряду с конструктивными величинами G'_m , G_m и i также и коэффициент перегрузки k . Последний является решающим для проблемы чрезмерных токов, а потому следует им заняться в первую очередь.

ИТЬ
ДНУЗТ

36. ВЫДЕРЖКА ВРЕМЕНИ И ТОК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.

Несомненно самым опасным чрезмерным током является ток короткого замыкания. Если на зажимах вторичной обмотки происходит соединение двух фаз или фазы с землей без какого-либо промежуточного сопротивления, то в этом случае трансформатор будет находиться под максимально возможной нагрузкой. Таким образом короткое замыкание на зажимах вторичной обмотки должно быть решающим в вопросе об определении выдержки времени автомата. Ток короткого замыкания трансформатора был бы бесконечно велик, если бы отсутствовали омическое и индуктивное сопротивление обмоток. На деле все рабочее напряжение расходуется в обоих сопротивлениях.

Заводская табличка трансформатора дает указание по поводу величины длительного тока короткого замыкания. На ней отмечается так называемое напряжение короткого замыкания в процентах от рабочего напряжения. Напряжения короткого замыкания достаточно для прохождения номинального тока при коротком замыкании на зажимах вторичной обмотки. Ясно, что действительно возможный ток короткого замыкания во столько раз больше номинального тока, во сколько раз рабочее напряжение больше напряжения короткого замыкания.

Обозначим через:

e_k — напряжение короткого замыкания в процентах от номинального напряжения,

I — номинальный ток в амперах,

I_k — длительный ток короткого замыкания в А.

Тогда получим

$$I_k = I \frac{100}{e_k} \quad (21)$$

а коэффициент перегрузки

$$k = \frac{I_k}{I} = \frac{100}{e_k}$$

Соединив два уравнения (20) и (21), получаем новое, дающее наглядное выражение для максимально допустимого времени выдержки

$$t_w = \frac{G'_m}{G_m} \left(\frac{e_k}{i} \right)^2 \text{ сек} \quad (20a)$$

Эта величина содержит не много секунд, однако больше одной секунды. Отношение

$$\frac{G'_m}{G_m}$$

больше единицы, так как оно равно отношению пространства занятого изолированными катушками к пространству, занятому одной лишь медью. Оно зависит от мощности трансформатора, а также и от конструкции. Наибольшим оно будет у сухого трансформатора, построенного с большим расходом изоляционного материала. У трансформаторов с масляным охлаждением малых и средних мощностей изоляционного материала относительно больше, чем у мощных трансформаторов, хорошо заполняющих пространство своими плоскими проводниками. Коэффициент заполнения катушки изменяется с изменением мощности в пределах

$$4 > \frac{G'_m}{G_m} > 1,2.$$

Отношение напряжения короткого замыкания e_k к плотности тока i в меди при нормальной мощности также уменьшается пропорционально нагрузке, по крайней мере у трансформаторов малых и средних мощностей. Сухие трансформаторы редко имеют величину плотности тока большей чем 2 A/mm^2 , а величину напряжения короткого замыкания — большей чем 4%.

Трансформаторы с масляным охлаждением работают при плотностях тока от 2,5 до 3 A/mm^2 и имеют напряжения короткого замыкания лишь незначительно большие, чем у сухих трансформаторов.

У мощных трансформаторов с водяным охлаждением плотность тока может быть доведена до 5 A/mm^2 , но иногда строятся для напряжений короткого замыкания больших 7%. Таким образом квадрат отношения напряжения короткого замыкания к плотности тока будет колебаться в границах

$$4 > \left(\frac{e_k}{i} \right)^2 > 2.$$

В результате получим величину допустимого времени выдержки в пределах

$$16 > t_w > 2,4 \text{ сек.},$$

при чем малым мощностям будут соответствовать большие величины t и наоборот.

Полученные данные не могут удовлетворить эксплуатационного инженера. Установленная зависимость между допустимым временем выдержки мощностью трансформатора противоречит нуждам эксплуатации.

Для каждой крупной установки необходима селективная защита от чрезмерных токов. Защита обеспечена лишь тогда, когда время выдержки уменьшается по мере удаления от центральной станции. Мощные трансформаторы, как известно, расположены к центральной станции ближе других более мелких трансформаторов в местах погребления.

Опыт показывает, что по мере удаления от центральной станции время выдержки должно уменьшаться на 2 секунды с одной ступени трансформации на другую. Таким образом при двукратной трансформации получим времена выдержки 1,5 и 3,5 секунд, для трехкратной — 1,5, 3,5 и 5,5 секунд. Не рекомендуется выбирать минимальное время выдержки меньше 2 секунд.

37. ВЫДЕРЖКА ВРЕМЕНИ И НАПРЯЖЕНИЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.

Трудности проблемы чрезмерных токов в сущности не так велики, как это может показаться. Сухой трансформатор относительно нечувствителен к коротким замыканиям. Поэтому целесообразно заняться лишь исследованием трансформаторов с масляным и водяным охлаждением. Необходимо найти способ одновременного выполнения требований эксплуатации с одной стороны и безопасности трансформатора — с другой.

Малые трансформаторы с масляным охлаждением, приблизительно до 100 kVA , строятся преимущественно на напряжение короткого замыкания до 4%. При возможных плотностях тока до 3 A/mm^2 это напряжение короткого замыкания достаточно велико, чтобы допустить

НТБ
ДНУЗТ

время выдержки в 2 секунды. Мощный трансформатор должен был бы быть в состоянии выдержать короткое замыкание в продолжение 6 секунд для того, чтобы при трехкратной трансформации оказалось возможным выполнить указанные выше ступени для времени выдержки.

Таким образом проблема чрезмерных токов сводится к вопросу о «тепловой безопасности» короткого замыкания. Она разрешима, но не путем уменьшения величин плотностей. Водяное охлаждение ведь имеет смысл лишь тогда, когда оно окупается большими нагрузками в меди. Остается лишь одна возможность — увеличение напряжения короткого замыкания мощного трансформатора.

При 10% напряжения короткого замыкания в мощном трансформаторе с водяным охлаждением эксплуатационные трудности, пожалуй, будут устранены. Этот трансформатор выдержит короткое замыкание в продолжение 6 секунд при плотности тока в $4,5 \text{ A/mm}^2$. Мощные трансформаторы без водяного охлаждения вообще не создают трудностей, так как в них медь может быть подвергнута умеренной нагрузке.

Каждый конструктор сочтет это для себя весьма приемлемым. Он и без того при высоких напряжениях вынужден заполнять большие промежутки маслом и он нередко сталкивается с затруднениями из-за необходимости выполнять трансформаторы с малыми напряжениями короткого замыкания. Повышением значений напряжения короткого замыкания облегчается, главным образом, решение вопроса о механической безопасности короткого замыкания.

Напряжение короткого замыкания может вызвать значительное падение напряжения. Верно также и то, что именно мощный трансформатор в первую очередь вызывает падение напряжения, так как через него передается вся мощность установки. Однако вопрос о безопасности в эксплуатации имеет большее значение. Обязательно следует предохранить мощный трансформатор, находящийся на месте производства энергии. Его следует строить на большое напряжение короткого замыкания. На конце же линии передачи можно ограничиться меньшими напряжениями короткого замыкания.

Конструктор издавна стремится к большим напряжениям короткого замыкания, а эксплуатационный инженер — к малым. Конструктора в первую очередь интересует вопрос о механической безопасности короткого замыкания, эксплуатационного инженера — вопрос о падении напряжения. Проблема чрезмерных токов способствует соглашению между ними.

У малых трансформаторов с масляным охлаждением напряжение короткого замыкания не должно превосходить 4%. Малые трансформаторы в этом отношении хорошо построены. При заказе мощных трансформаторов эксплуатационный инженер не должен забывать ни о напряжениях короткого замыкания, ни о своих эксплуатационных нуждах. На этот раз он в виде исключения будет прав, задаваясь определенным весом меди. Зная потери в меди и ее вес, он сможет подсчитать плотность тока и при помощи уравнения (20а), получить ясное представление об электрической безопасности короткого замыкания трансформатора.

Пример. Предлагают мощный трансформатор в 16 000 kVA, имеющий 134 kW потерь в меди, т.-е. 0,84% падения напряжения при полной нагрузке, $\cos \varphi = 1$ и напряжение короткого замыкания в 5,6%. При запросе сообщают дополнительно, что обмотка содержит 2 515 kg меди.

НТБ
ДНУЗТ

Так как при 1 A/mm^2 1 kg меди развивает теплоту в $2,5 \text{ W}$, то из потерь в меди и ее веса получаем среднюю плотность тока

$$i = \sqrt{\frac{134\,000}{2,5 \cdot 2\,515}} = 4,62 \text{ A/mm}^2.$$

Следовательно трансформатор может выдержать время выключения лишь немного больше, чем

$$\left(\frac{5,6}{4,62}\right)^2 = 1,5 \text{ сек.}$$

Ясно, что напряжение короткого замыкания трансформатора слишком мало. Даже при двухкратной трансформации ее необходимо было бы повысить приблизительно на 9%.

38. ЗАВИСИМАЯ ВЫДЕРЖКА ВРЕМЕНИ. ЗАМЫКАНИЕ ВИТКОВ.

Это предварительное решение вопроса о времени выдержки требует защиты от возможных возражений.

Эксплуатационный инженер будет сначала сослаться на то, что в основу определения пределов допустимого времени выдержки следует положить температуру воспламенения масла, так как оно не горит без доступа воздуха и следовательно большие предосторожности излишни.

Масло горит лишь при достаточном доступе воздуха. Лишь при нагреве масла ниже точки воспламенения можно быть вполне уверенным, что оно не загорится. Кроме того нельзя допускать температур выше 170°C из-за возможности повреждения хлопчатобумажной оплетки. Как бы редко ни случалось короткое замыкание, оно не должно ни в какой мере обугливать оплетку.

Независимая установка времени может встретить еще одно возражение. Так существуют еще автоматические выключатели, выдержка времени которых тем меньше чем больше чрезмерный ток. Конструктор не будет возражать против зависимой установки времени и даже допустит, чтобы выдержка времени была обратно пропорциональна квадрату чрезмерного тока. Подобный автоматический выключатель не будет удовлетворять только эксплуатационного инженера.

Зависимая установка времени плохо согласуется с требованием селективной защиты от чрезмерных токов.

Некоторые утверждают, что способ защиты трансформатора от сгорания вследствие короткого замыкания отсутствует, что трансформаторы продолжают гибнуть и при правильной установке времени и что требования больших напряжений короткого замыкания ни к чему не приведут. Подобные утверждения основаны на незнании с вопросом.

Рассматриваемое до сих пор короткое замыкание со стороны вторичной обмотки, или непосредственно у ее зажимов, существенно отличается от внутреннего короткого замыкания и в первую очередь от замыкания витков. Против замыкания витков часто бессильны все существующие средства защиты от чрезмерных токов. Необходимо в этом разобраться.

Короткозамкнутый виток, независимо от того принадлежит ли он первичной или вторичной обмотке, в момент короткого замыкания превращается в самостоятельную, вторичную обмотку. Протекающий по ней ток короткого замыкания должен быть в магнитном отношении уравновешен первичной обмоткой, так как трансформатор продолжает

НТЬ
ДНУЗТ

работать до момента перегорания витка, или выключения трансформатора.

Вся трудность в том, что короткое замыкание одного витка вызывает в первичной обмотке ток, протекающий по всем ее виткам. Этот ток меньше во столько раз, сколько витков в первичной обмотке. Таким образом это замыкание витка вызовет вне трансформатора лишь незначительный чрезмерный ток.

Пример. Пусть дан трансформатор с масляным охлаждением мощностью в 75 kVA, 35 000/400/231 V, 50 периодов, соединение — двусторонняя звезда, число витков первичной обмотки 5 000, вторичной 57. Напряжение короткого замыкания этого трансформатора составляет 4%.

При номинальной мощности ток нагрузки с первичной стороны будет

$$\frac{75\,000}{\sqrt{3} \cdot 35\,000} = 1,25 \text{ A},$$

с вторичной

$$\frac{75\,000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 113,5 \text{ A}.$$

Если в первичной обмотке произошло замыкание витка, то по этому витку пройдет ток приблизительно в

$$1,25 \frac{100}{4} = 31,3 \text{ A}.$$

По оставшимся неповрежденными 4 999 виткам для установления магнитного равновесия пройдет ток величиной

$$\frac{31,3}{4\,999} = 0,00625 \text{ A},$$

т.е. первичный ток трансформатора увеличивается при этом на 5%. Никакое приспособление для защиты от чрезмерных токов не может обнаружить эту аварию, и виток беспрепятственно продолжает гореть.

Вследствие замыкания витка загорятся и соседние витки. Короткое замыкание при этом разрастается, охватывает все большее число витков, компенсирующий ток в неповрежденных витках постепенно увеличивается, пока авария не обнаруживается выключением автомата.

Чем меньше трансформатор, чем выше первичное напряжение, тем опаснее замыкания его витков. Но и для мощных трансформаторов внутреннее короткое замыкание весьма опасно. Против замыкания витков защиты пока не найдено.

Проблема чрезмерных токов может главным образом заняться лишь такими аварийными случаями, которые возможны, допустимы и неизбежны. Замыкания витков возникают лишь при определенных недостатках в конструкции. Конечно было бы опасно снять с конструктора ответственность за недостатки в конструкциях. Не плохо и то, что короткое замыкание витка выводит из строя негодный по конструкции, или отслуживший свой век трансформатор.

Наряду с возражениями эксплуатационного инженера против строгого регулирования чрезмерных токов будет высказывать свои соображения и конструктор. Заботясь о предохранении своей конструкции, он обратит внимание на тот факт, что длительные короткие замыкания еще не являются худшим злом и что следует учитывать также и явления нестационарного характера, вызываемые внезапно возникающим коротким замыканием.

НТБ
ДНУЗТ

С этого-то и начинается вся проблема короткого замыкания, подробнейшее исследование которого совершенно необходимо. Как конструктору, так и эксплуатационному инженеру в одинаковой мере важно иметь ясное представление о явлениях при коротком замыкании.

Механическая безопасность короткого замыкания в мощных трансформаторах имеет большое значение для каждого эксплуатационного инженера. Конструктор часто попадает в затруднительное положение, давая разъяснения заказчику, не имеющему ясного представления о явлениях короткого замыкания, по поводу механической безопасности короткого замыкания в данном трансформаторе.

К счастью, проблему короткого замыкания не трудно разрешить без особо сложных расчетов. При этом не трудно и доказать, что опасности внезапного короткого замыкания в трансформаторе не так велики, как это представляют неточные теории. Благодарной задачей учения об эксплуатации является решение вопроса о том, какие приспособления и в какой мере нужны для борьбы с электрическими и механическими последствиями короткого замыкания в трансформаторе.

39. ДЛИТЕЛЬНОЕ И ВНЕЗАПНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ.

При описании явлений короткого замыкания трансформатора полезно начать с рассмотрения длительного короткого замыкания. Внезапное короткое замыкание вызывает лишь добавочные явления, исчезающие с наступлением длительного короткого замыкания.

И при длительном коротком замыкании в трансформаторе будет устанавливаться электрическое равновесие напряжений с одной стороны, и магнитное равновесие токов с другой. Индуктированное главным потоком напряжение во вторичной обмотке достаточно для того, чтобы заставить ток короткого замыкания пройти через омическое и индуктивное сопротивления обмотки. Напряжение обмотки и суммарное падение напряжения находятся, таким образом, в равновесии во вторичной обмотке.

К первичной обмотке и в случае длительного короткого, как и обычно, приложено полное напряжение сети. Последнее при токе короткого замыкания преодолевает не только омическое и индуктивное напряжение обмотки, но и напряжение обмотки, индуктированное главным магнитным потоком. Следовательно, с первичной стороны приложенное напряжение находится в равновесии с напряжением обмотки плюс суммарное падение напряжения.

При магнитном равновесии должно существовать равенство ампервитков первичной и вторичной обмоток. И при длительном коротком замыкании главный магнитный поток возбуждается намагничивающим током, протекающим вместе с током короткого замыкания по первичной обмотке.

Главный поток при длительном коротком замыкании сильно ослабляется. При передаточном числе 1:1 напряжения в первичной и вторичной обмотках, индуктированные главным магнитным потоком, равны между собой. Падения напряжений также приблизительно равны между собой. Так как с вторичной стороны, разность напряжения обмотки и суммарного падения напряжения равно нулю, а с первичной — их сумма равна приложенному напряжению, то напряжение обмотки, индуктированное главным магнитным потоком, будет равно лишь половине приложенного напряжения.

При нормальной работе суммарное падение напряжения первичной обмотки составляет лишь несколько процентов от приложенного напряжения. В этом случае напряжение обмотки почти равно приложенному напряжению. При длительном коротком замыкании главный магнитный поток, как мы знаем, уменьшается почти в два раза, потоки же рассеяния сильно возрастают. Величина каждого из последних равна почти величине главного потока (в случае, если омические падения напряжения обеих обмоток, как это обычно и бывает, значительно меньше их индуктивных падений напряжения).

Все вышесказанное дает нам картину длительного короткого замыкания, положенную в основание учения о чрезмерных токах. Приложенное напряжение расходуется наполовину в первичной обмотке, наполовину во вторичной, при чем только в их омическом и индуктивном сопротивлениях.

Внезапное короткое замыкание вносит большие осложнения. При нем возникает ряд добавочных явлений, которые легко поддаются изучению при условии, если пренебречь омическим сопротивлением обмоток.

Внезапное короткое замыкание может наступить в трансформаторе в любой момент. Но при этом далеко не безразлично, какова величина магнитного потока в момент короткого замыкания. Самые неблагоприятные явления возникают именно тогда, когда главный магнитный поток достиг своей максимальной величины.

С момента короткого замыкания, при отсутствии омического сопротивления вся сумма индукционных линий, связанных со вторичной обмоткой, должна остаться абсолютно неизменившейся. Главный магнитный поток и поток рассеяния должны индуктировать во вторичной обмотке напряжения, сумма которых равна нулю, в противном случае ток короткого замыкания бесконечно возрастает. Если короткое замыкание произошло при максимальном значении главного магнитного потока, а вторичный поток рассеяния при этом составляет (как и всегда при нормальной работе) лишь несколько процентов от главного потока, то с момента короткого замыкания сумма главного потока и вторичного потока рассеяния все время будут, приблизительно, равными максимальному значению главного магнитного потока.

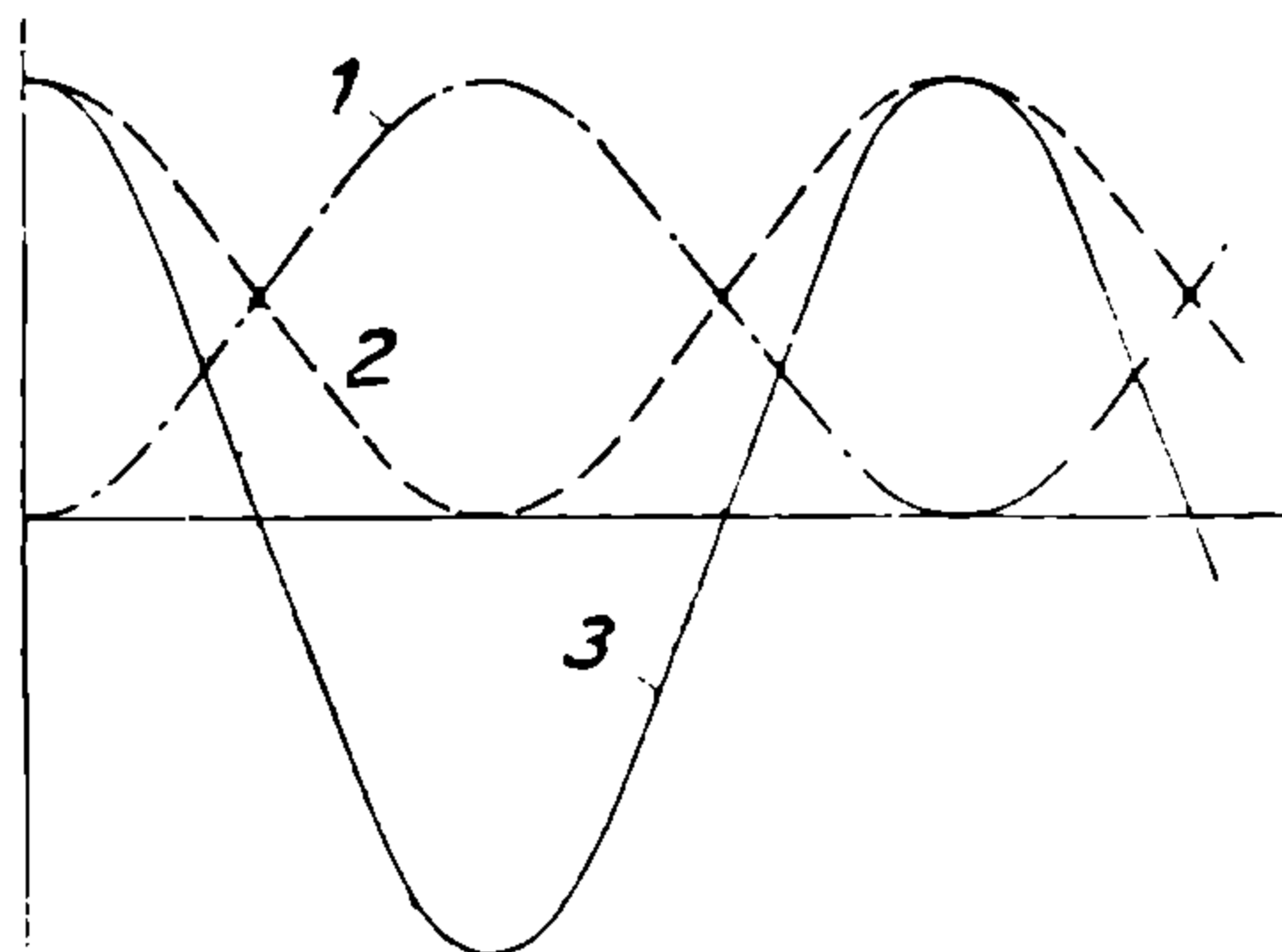
Подобную же картину мы получим и том случае, если будем считать, что с момента наступления короткого замыкания (при омическом сопротивлении равном нулю) напряжение вторичной обмотки должно уравновесить вторичное напряжение рассеяния. Главный магнитный поток и поток рассеяния должны быть одинаковы по величине и противоположны по фазе.

Но главный поток при коротком замыкании не может сохранить свою полную величину. Последняя понизится наполовину, как показано выше. Лишь таким путем можно сохранить повсюду электрическое равновесие. Главный магнитный поток, имевший в начале короткого замыкания свое нормальное максимальное значение, будет уменьшаться лишь с половинной скоростью. В качестве минимальной величины он достигнет нулевого значения и будет в дальнейшем изменяться по синусоиде, но лишь между начальным максимальным значением и нулем (а отнюдь не между максимальным положительным и минимальным отрицательным значениями, как в случае нормального магнитного потока) (см. фиг. 48). Точно также, но со сдвигом фаз в 180° , изменяется вторичный поток рассеяния. Первичный же поток рассеяния, наоборот, совпадает по величине и фазе с главным потоком.

НТБ
ДНУЗТ

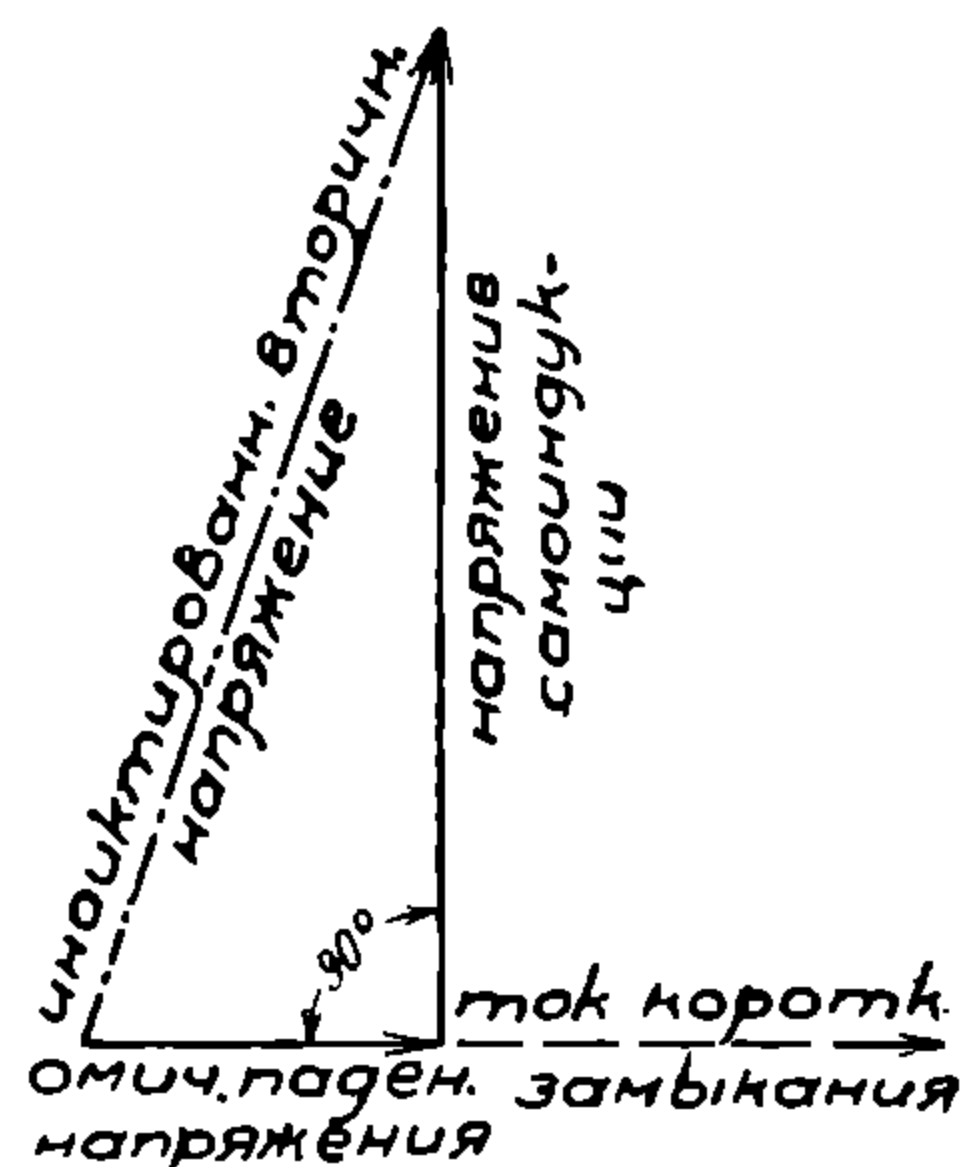
Не трудно отделить добавочные явления внезапного короткого замыкания от уже знакомых явлений длительного короткого замыкания. Из фиг. 48 видим, что как главный поток, так и оба потока рассеяния возрастают на неизменяющуюся величину добавочных потоков. Это возрастание к тому же происходит в зависимости от начальной величины главного потока в момент внезапно наступившего короткого замыкания. Все три добавочных потока в этом рассматриваемом невыгоднейшем случае равны максимальным значениям потоков при длительном коротком замыкании.

Добавочные потоки должны, конечно, быть как-то возбуждены. Добавочный главный поток уже имеется в момент наступления короткого замыкания. Еще не возбуждены добавочные потоки рассеяния. Токи короткого замыкания должны быть увеличены «постоянными» токами. Ток внезапно наступающего короткого замыкания в трансформаторе должен быть больше тока длительного короткого замыкания. В исследованном выше невыгоднейшем случае первый доводится добавочным постоянным током до двойной величины.



Фиг. 48.

1. Вторичный поток рассеяния.
2. Главный поток короткого замыкания.
3. Нормальный главный поток.



Фиг. 49.

Внезапное короткое замыкание лишь тогда не вызывает добавочных явлений, когда оно наступит в момент прохождения главного потока через нулевое значение.

Следует рассчитывать не на подобные счастливые случайности, а, наоборот, на самые невыгодные случаи. Конструктор таким образом прав, утверждая, что проблема чрезмерных токов была бы решена неудовлетворительно, если бы принимались во внимание лишь длительные токи короткого замыкания. Полезно внимательнее рассмотреть этот вопрос.

40. ВНЕЗАПНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ И ВЫДЕРЖКА ВРЕМЕНИ.

Мы определили выдержку времени автомата трансформатора с учетом теплоты, выделяемой при длительном коротком замыкании. В особо невыгодном случае добавочный ток короткого замыкания может достигнуть максимального значения длительного тока короткого замы-

кания. Возникает опасность трехкратного возрастания теплоты, так как этот добавочный ток в качестве постоянного выделит теплоты вдвое больше, чем переменный ток, имеющий то же максимальное значение.

Выделение джоулева тепла предполагает наличие омического сопротивления, но, как известно, в предыдущем параграфе омическое сопротивление именно и не рассматривается. Однако, это не меняет значительно результатов нашего исследования. Вторичный поток рассеяния при наличии сопротивления обмотки должен, конечно, быть слабее главного потока, но все же незначительно.

Напряжение, возбуждаемое главным потоком во вторичной обмотке, должно всегда быть равно сумме напряжения, возникшего от самоиндукции и омического падения напряжения. Векторная диаграмма фиг. 49 дает ясную картину зависимости между величинами. При возрастающей мощности трансформатора действительная картина внезапного короткого замыкания приближается к представленной выше идеальной картине.

Так как именно при мощных трансформаторах приходится принимать во внимание удвоение длительного тока короткого замыкания и кроме того, утроение джоулева тепла, выделяемого при коротком замыкании, то вопрос о времени выключения снова представляется неразрешимым. Возникают худшие опасения. Необходимо поэтому обосновать, почему, несмотря на возможность удвоения величины тока, величина выделенного тепла при коротком замыкании все же в четыре раза не увеличится.

Длительный ток короткого замыкания и добавочный постоянный ток являются, конечно, токами различного числа периодов. Каждый из них поэтому дает свое количество джоулева тепла так, как будто бы они были независимы друг от друга. Это можно получить также и из выражения

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [I_k + I_k \sin \omega t]^2 r d(\omega t) = I_k^2 r + \frac{I_k^2 r}{2},$$

в котором I_k — максимальное значение длительного тока короткого замыкания и, следовательно, постоянный ток внезапного, наименее выгоднейшего короткого замыкания, r — сопротивление обмотки.

Столь опасное с виду тепло, выделяемое добавочным, постоянным током короткого замыкания, оказывается не столь вредным. Оно имеет строго определенное предельное значение. Оно не может израсходовать энергии больше, чем ее запасено в добавочном потоке рассеяния.

Постоянный ток короткого замыкания на деле не может сохранить свое первоначальное значение. Недостает напряжения, способствующего прохождению этого тока через сопротивление обмотки. Он начинает уменьшаться и вместе с ним уменьшается и величина потока рассеяния. При этом именно вследствие уменьшения потока рассеяния индуктируется то напряжение, которое поддерживает «постоянный» ток короткого замыкания.

С исчезновением постоянного тока короткого замыкания исчезает и постоянный поток рассеяния. Этот уменьшающийся постоянный поток рассеяния отдает свою энергию для образования тепла от постоянного тока короткого замыкания. При отсутствии постоянного потока рассеяния будет отсутствовать и тепло от добавочного тока короткого замыкания.

НТБ
ДНУЗТ

Не трудно подсчитать магнитную энергию постоянного потока рассеяния. Этот поток можно определить, зная коэффициент самоиндукции обмотки L и постоянный ток короткого замыкания I_{gl} в начале явления. Таким образом получим

$$\frac{L I_{gl}^2}{2} \text{ ватт-сек.}$$

Кроме того, известно, что в трансформаторах индуктивное сопротивление обмотки $2\pi fL$ (где f — число периодов) значительно больше омического сопротивления r .

Ясно, что при длительности короткого замыкания в t_k секунд величина

$$L \cdot I_{gl}^2,$$

будет во много раз меньше величины

$$r \cdot I_{gl}^2 \cdot t_k$$

Если например

$$2\pi fL = 4r,$$

а время выключения определено в 2 секунды, то получаем отношение

$$\frac{L}{2} I_{gl}^2 = \frac{4r}{4\pi f} I_{gl}^2 = \frac{1}{2\pi f} r I_{gl}^2 \cdot 2.$$

Тепло, выделяемое постоянной составляющей тока короткого замыкания, здесь не учитывается. Последствия от этого тока вопреки всяким ожиданиям оказались ничтожными. Поток рассеяния имеет относительно небольшую энергию, тогда как тепло, выделяемое током короткого замыкания очень велико.

Магнитная энергия потока трансформатора очень часто сильно переоценивается. Эта энергия главного потока при коротком замыкании значительно меньше энергии потока рассеяния. Главный поток имеет то же число индукционных линий, что и поток рассеяния, но первый возникает от тока, составляющего лишь несколько процентов от номинального тока трансформатора, тогда как поток рассеяния возникает от тока короткого замыкания в 20 до 30 раз большего, чем номинальный ток. Таким образом если индуктивность главного магнитного потока, допустим, в 50 раз больше индуктивности потока рассеяния, а ток первого в 50 раз меньше тока последнего, то магнитная энергия главного потока окажется в 50 раз меньше энергии потока рассеяния.

Внезапное короткое замыкание интенсивно расходует магнитную энергию постоянных добавочных потоков и в результате быстро переходит в состояние длительного короткого замыкания. И главный постоянный добавочный поток постепенно исчезает. Он создает постоянные токи намагничивания, нагревающие омические сопротивления обеих обмоток.

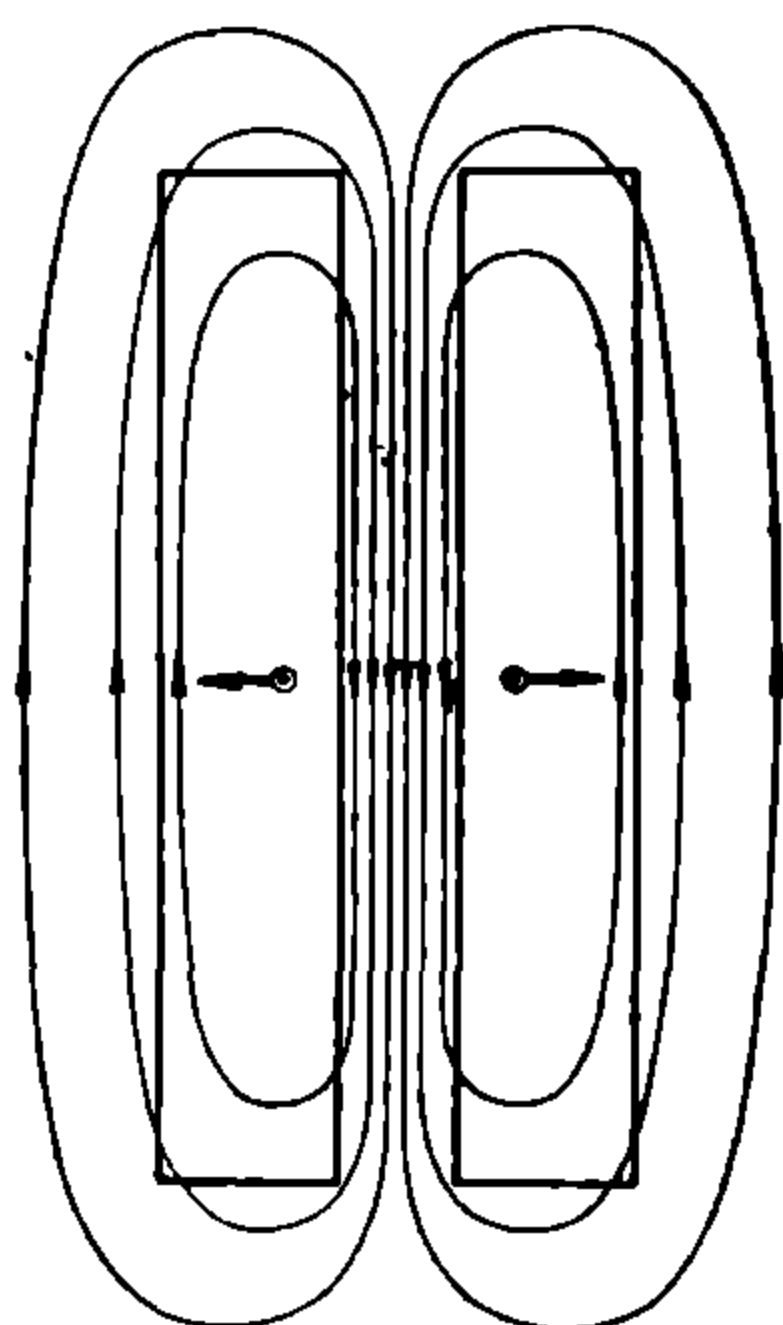
Существенным результатом исследования является доказательство того, что добавочные явления внезапного короткого замыкания играют ничтожную роль при решении вопроса о защите трансформатора от чрезмерных токов. Этим самым дается ясное представление о действительных размерах опасностей короткого замыкания с точки зрения проблемы чрезмерных токов. Вопрос о времени выключения, таким образом, исчерпан. Однако, прежде чем приступить к решению следующей проблемы — вопроса о токах выключения, полезно попутно рассмотреть связанный с только-что разобранными явлениями короткого замыкания вопрос о механической безопасности короткого замыкания.

41. МЕХАНИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ ОТ ТОКА КОРотКОГО ЗАМЫКАНИЯ.

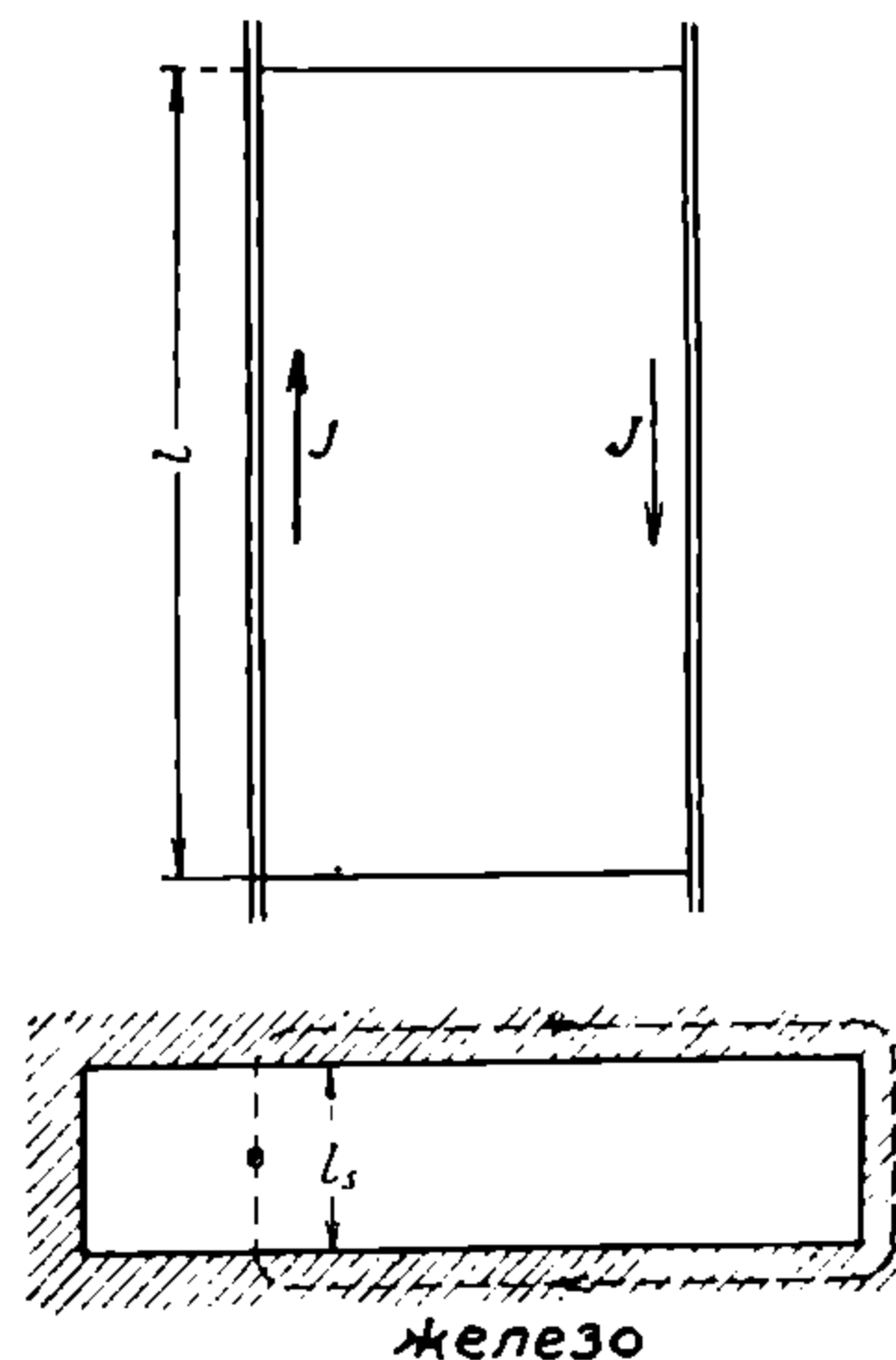
Значительные нагревания не являются единственной опасностью от короткого замыкания трансформатора. Не меньшую роль играют возникающие при коротком замыкании механические усилия, могущие сильно повредить конструкцию. Эксплуатационный инженер должен их изучить так же, как и тепловые явления короткого замыкания.

Известно, что два параллельных проводника, по которым течет ток, взаимно притягиваются или отталкиваются в зависимости от того, одинаково ли или противоположно направлены эти токи. Обычно эти механические усилия малы. Лишь при весьма больших токах это явление сильно сказывается.

В каждом трансформаторе витки одной из двух обмоток образуют ряд параллельных проводников, по которым текут равные и одинаково направленные токи. Как известно, они взаимно притягиваются. Таким образом, каждая обмотка представляет собою тело, подверженное дей-



Фиг. 50.



Фиг. 51.

ствию внутренних усилий. Кроме того, в каждом трансформаторе витки первичной обмотки с одной стороны, и вторичной обмотки с другой стороны образуют две системы параллельных проводников с противоположно направленными токами. Они взаимно отталкиваются.

Не трудно понять, почему первичная обмотка имеет стремление удалиться от вторичной. Оба потока рассеяния должны пройти через промежуток между обеими обмотками (фиг. 50). Они ищут путь наименьшего сопротивления и стремятся увеличить расстояние между обмотками. Накопленная в потоках рассеяния энергия готова в любой момент произвести эту работу отталкивания.

Полезно подробнее рассмотреть этот чрезвычайно простой случай с двумя проводниками, по которым текут токи в противоположных направлениях. Для точного подсчета будем считать оба проводника бесконечно длинными, после чего ограничимся рассмотрением определенного участка с длиной проводников l [см] (фиг. 51).

Сила тока в I [амп.] создает у второго проводника магнитный поток с индукцией

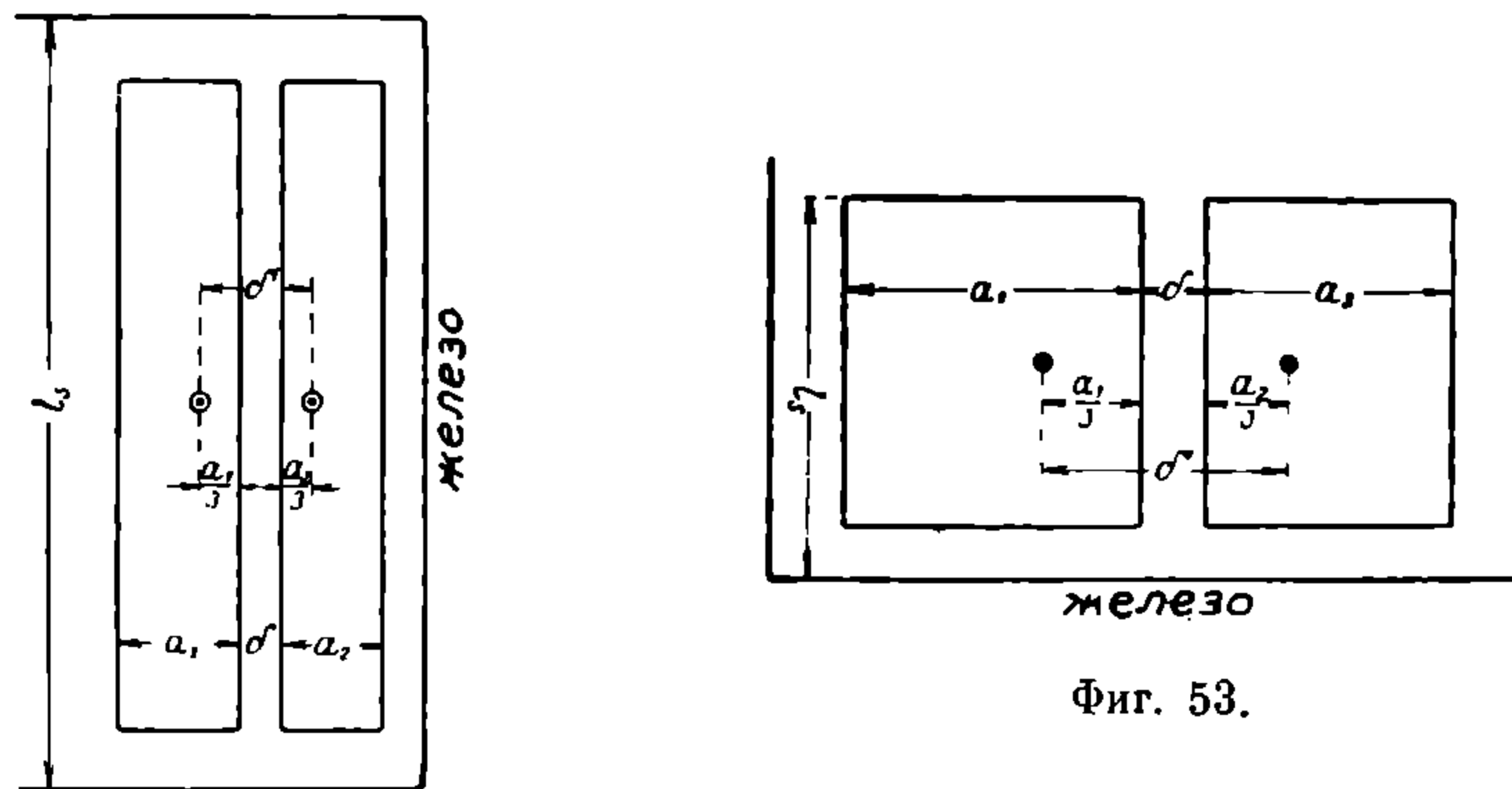
$$B = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{I}{l_s},$$

где l_s [см] — длина индукционной линии, пересекающей 2-й проводник. Отталкивающее усилие для проводников длиной l , как известно, равно

$$S = B \cdot l \cdot I \cdot 10^{-1} = 4 \pi \cdot I^2 \frac{l}{l_s} \cdot 10^{-2} D_{\text{лин}} = \frac{4 \pi}{9,81} I^2 \frac{l}{l_s} \cdot 10^{-7} \text{ kg.}$$

Эти данные можно непосредственно применить для случая усилия от тока короткого замыкания трансформатора. Каждую из взаимно отталкивающихся обмоток можно рассматривать как одиночный проводник, обтекаемый током, численно равным ампервиткам короткого замыкания обмотки. Так как ампервитки обеих обмоток всегда равны между собой, то этим самым выполняется предварительное условие проведенного расчета.

Расчет следует вести по максимальному мгновенному значению силы тока. Необходимо рассматривать явление не при эффективном значении длительного тока короткого замыкания I_k , также и не по его



Фиг. 52.

Фиг. 53.

максимальному значению, но по его двойному максимальному значению, так как при весьма малом омическом сопротивлении в обмотке ток внезапного короткого замыкания может достигнуть этой величины. Таким образом имеем для ампервитков обмотки с w витками выражение

$$2 I_k \sqrt{2} w \text{ ампер.}$$

За длину проводника примем среднюю длину витка U [см] обеих обмоток, за длину линии рассеяния l_s в трансформаторе при концентрических обмотках примем, приблизительно, длину керна (фиг. 52), а при дисковых обмотках — радиальную высоту обмотки (фиг. 53).

Тогда для усилия от внезапного короткого замыкания получим выражение

$$S = 8 \cdot 4 \pi \cdot w^2 I_k^2 \frac{U_c}{l_s} \cdot 10^{-8} \text{ kg.}$$

Из исследований потоков рассеяния известно, что первичную и вторичную обмотки можно заменить двумя витками, каждый из которых создает полное число ампервитков. За расчетное расстояние между витками принимается расстояние между обмотками, увеличенное на одну треть ширины соответствующей обмотки с каждой стороны (фиг. 52 и 53).

Оба потока рассеяния длительного короткого замыкания имеют в своем распоряжении, следовательно, в самом узком месте сечение

$$\delta' U,$$

которое используется ими поровну. Каждый из них, таким образом, достигает величины:

$$N_s = \frac{4\pi}{10} I_k \sqrt{2} \frac{w}{l_s} U_c \frac{\delta'}{2} \text{ индукц. линий.}$$

Такого же числа индукционных линий достигает и добавочный постоянный поток невыгоднейшего короткого замыкания.

Поток рассеяния длительного короткого замыкания индуцирует напряжение

$$\frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_s w f \cdot 10^{-8} \text{ эффект. вольт.}$$

Последнее, как известно, равно половине рабочего напряжения E (вольт). Таким образом, максимальное усилие определяется выражением

$$S = 12,6 \frac{EI_k}{f\delta'} \text{ кг.}$$

Длительный ток короткого замыкания определяется из значений нормального полного тока нагрузки I (амп.) и напряжения короткого замыкания e_k , выраженного в процентах следующим образом

$$I_k = I \frac{100}{e_k},$$

так что можно написать

$$S = 1,26 \frac{E \cdot I \cdot 10^3}{f\delta'e_k} \text{ кг} \quad (22)$$

В этом окончательном уравнении:

EI — номинальная мощность одного керна трансформатора [VA];

f — число периодов [сек.];

δ' — расчетное расстояние между витками [см];

e_k — напряжение короткого замыкания [%].

Пример. Дан 3-фазный трансформатор, мощность 16 000 kVA, 50 периодов, напряжение короткого замыкания 5,6%, расчетный воздушный зазор 5,4 см. При внезапном коротком замыкании он под действием усилия в

$$S = 1,26 \frac{16\,000\,000 \cdot 10^3}{3 \cdot 50 \cdot 5,4 \cdot 5,6} = 4,44 \cdot 10^6 \text{ кг}$$

выбыл из строя. Свыше 4 000 тонн! Если мы имеем дело с числом такого порядка, то ясно, что к вопросу о механической безопасности короткого замыкания следует подойти серьезно. При этих условиях трудно возразить против желания конструктора предварительно ослабить действия этих усилий конструктивными мероприятиями, прежде чем задуматься о последующих способах защиты.

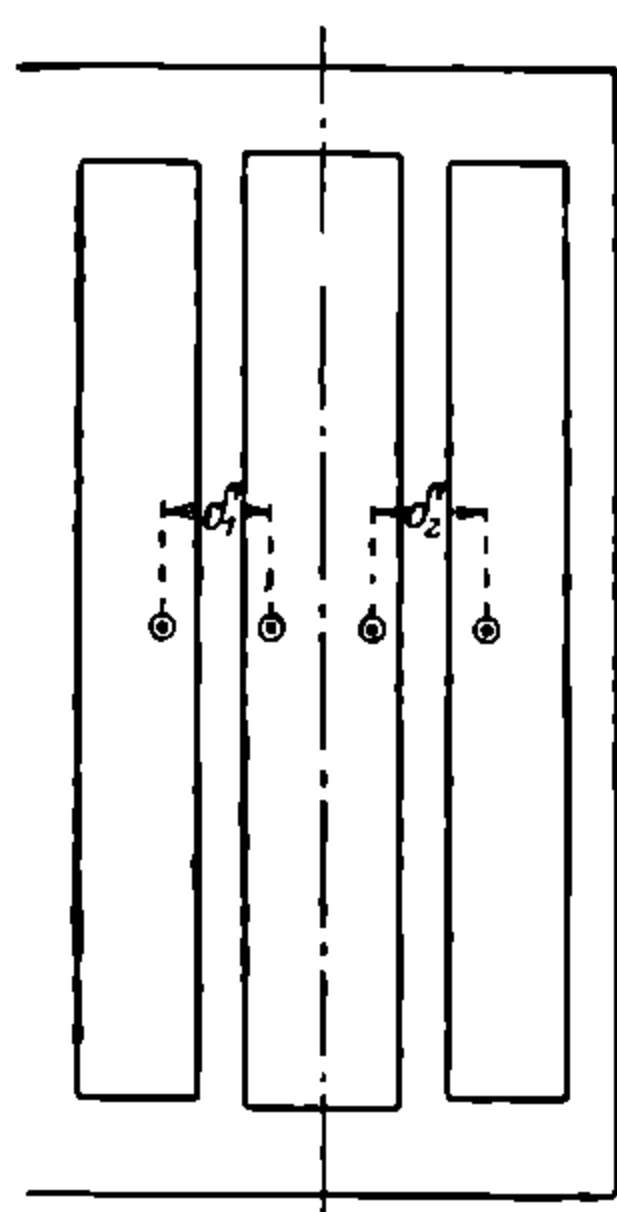
К числу конструктивных изменений, как это видно из уравнения (22), относится повышение напряжения короткого замыкания e_k . Это средство очень гибкое, так как большее напряжение короткого замыкания заранее предполагает увеличение расчетное расстояние между

обмотками δ' с удвоением напряжения короткого замыкания механическое усилие уменьшается на одну четверть первоначальной величины.

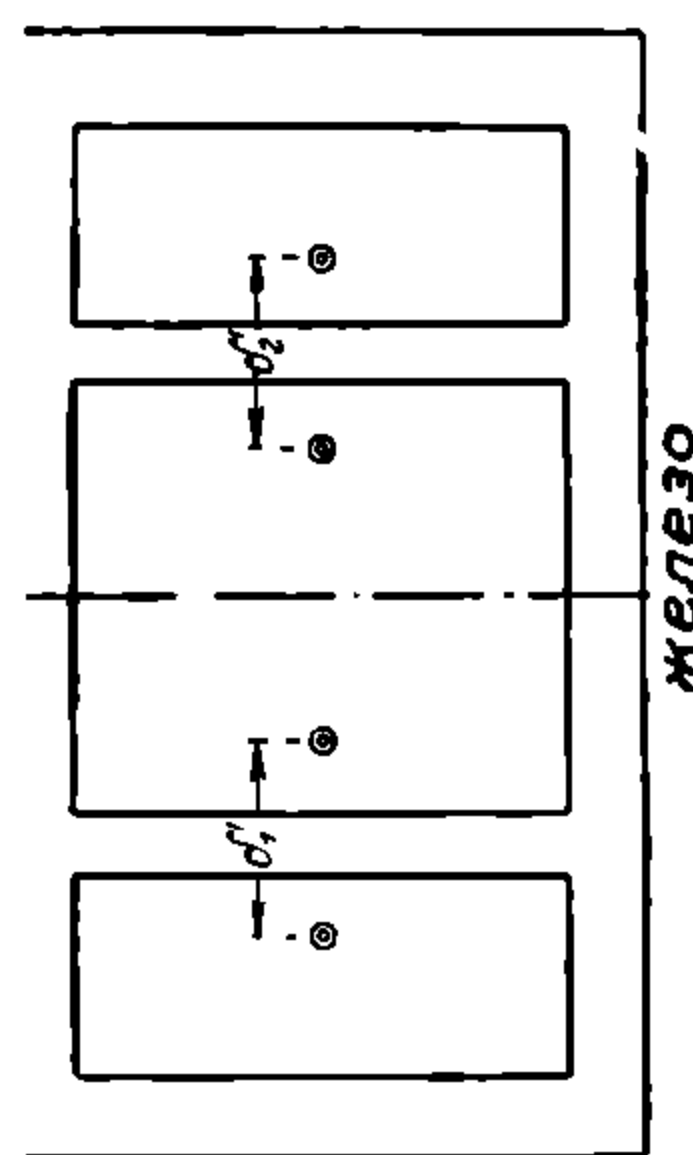
И тепловая, и механическая стороны вопроса о безопасности короткого замыкания приводят к решению проблемы чрезмерных токов путем увеличения значений напряжения короткого замыкания. Эксплуатационный инженер, которого больше всего интересует надежность в эксплуатации, не может противостоять давлению этих двух факторов. Он не может требовать невозможного. Большое напряжение короткого замыкания диктуется настолько насущной необходимостью, что перед нею вопрос о больших падениях напряжения отступает на второй план. Опасность усилий от токов короткого замыкания уменьшается с уменьшением мощности, так как поперечные сечения уменьшаются пропорционально лишь квадратному корню от мощности, тогда как само усилие уменьшается пропорционально мощности (конечно если принять, как и в параграфе 3, что мощность типового ряда изменяется пропорционально четвертой степени линейных измерений). Чем меньше трансформатор, тем меньше должно быть напряжение короткого замыкания. Это будет находиться в полном согласии с условиями тепловой безопасности короткого замыкания.

42. ОГРАНИЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ УСИЛИЙ ОТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.

Под давлением эксплуатационного инженера конструктор нашел и другие, правда, несколько сомнительные средства ограничивать величину механических усилий. Если нельзя увеличить напряжение короткого замыкания e_k и расчетное расстояние между обмотками, тогда остается, согласно уравнения (22), лишь уменьшить величину номинальной мощности EI одного керна.



Фиг. 54.



Фиг. 55

Эта мера кажется сначала невозможной и бессмысленной. Трансформатор в конечном счете все же должен иметь свою мощность. Однако, для этого нет необходимости разделять трансформатор на два отдельных; мощность можно разделить и в одной конструкции.

Выполнив, например, вместо обыкновенной концентрической обмотки (фиг. 54), двойную концентрическую, мы этим самым как бы разделяем механические усилия от токов на две половины. Одновре-

менно с этим (если воздушный зазор не увеличился) напряжение короткого замыкания уменьшается почти вдвое, так как теперь магнитный поток создается в каждом из двух промежутков между обмотками лишь половиной числа ампервитков обмотки. Точно к таким же результатам приводит и дисковая обмотка (фиг. 55), при которой будет сказываться основной ее недостаток — значительно более короткие индукционные линии, чем при концентрической обмотке.

Уравнение (22) можно применить и для общего случая, когда имеется не один, а n междукатушечных промежутков. Тогда это уравнение гласит

$$S = 1,26 \frac{EI \cdot 10^3}{nf \delta' e_k} \quad (23)$$

Деление обмотки является хорошим средством, но им нельзя злоупотреблять. Бесполезно понижать величину усилий путем создания большого числа междукатушечных промежутков, если при этом в такой же мере уменьшается и напряжение короткого замыкания, то растет опасность сгорания при коротком замыкании. Трансформатор мощностью в 2 000 kVA, имеющий лишь 3% напряжения короткого замыкания, является негодной конструкцией. Эксплуатационный инженер не должен требовать такого трансформатора, а конструктор — не должен его строить. Трансформатор при коротком замыкании не должен подвергаться опасности взрыва или сгорания.

Деление концентрической обмотки становится необходимым при очень больших мощностях. При 60 000 kVA нельзя удовлетвориться одним междуобмоточным промежутком. Для дисковых обмоток деление естественно, так как короткие индукционные линии при одном междуобмоточном промежутке вызвали бы слишком большие напряжения короткого замыкания.

Проблема механической безопасности короткого замыкания дает еще одно существенное принципиальное решение, которое должно быть известно как конструктору, так и эксплуатационному инженеру. Имеется одна существенная разница между концентрической и дисковой обмотками. При дисковой обмотке механическое усилие стремится раздвинуть катушки; здесь обмотка скрепляется в осевом направлении каркасом. При концентрической обмотке механическое усилие передается на наружный цилиндр обмотки, подобно тому как давление в котле — на его стенки. Здесь механическое усилие воздействует на медь обмотки, а в дисковой обмотке — на каркас.

Преимущество концентрической обмотки не только в экономии материалов. Вес меди весьма значителен, а поддерживающую конструкцию нелегко выполнять с достаточно большими сечениями. При больших мощностях и связанных с ними больших механических усилиях короткого замыкания концентрическая обмотка является правильным решением.

Все же в меди возникают значительные механические усилия. Числовой пример лучше всего осветит этот вопрос.

Пример. Трансформатор мощностью в 16 000 kVA имеет наружную обмотку в 540 витков. Поперечное сечение меди одного витка — $0,48 \text{ cm}^2$.

Механическое усилие невыгоднейшего короткого замыкания, составляющее $4,44 \cdot 10^6 \text{ kg}$, дает на поперечное сечение каждого витка нагрузку

$$\frac{4,44 \cdot 10^6}{540} = 8\,220 \text{ kg.}$$

Равномерно распределенное внутреннее давление, как известно, соответствует растягивающему напряжению, меньшему в π раз и действующему на 2 поперечных сечения витков, т.-е.

$$K_2 = \frac{8 \cdot 220}{2\pi \cdot 0,48} = 2720 \text{ kg/cm}^2.$$

Отсюда мы видим, что медь и в механическом отношении полностью использована. Концентрическая обмотка является простым и в то же время идеальным решением проблемы механической безопасности короткого замыкания. Приведенный выше расчет механического напряжения меди ставит снова вопрос об опасности короткого замыкания. Нелишне еще раз рассмотреть картину явлений короткого замыкания, так как в мощном трансформаторостроении приняты тяжелые поддерживающие устройства и при концентрическом расположении обмоток. Вызывается ли это необходимостью?

43. МЕХАНИЧЕСКОЕ УСИЛИЕ ПРИ ВНЕЗАПНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ.

Картина механического усилия короткого замыкания, нарисованная в предыдущих параграфах, вполне соответствует обычным представлениям. Она рисует явления с их самой невыгодной стороны. Конечно, эксплуатационный инженер тут же потребует, чтобы принимаемые меры защиты от механических повреждений при коротком замыкании полностью соответствовали усилиям, приведенным выше в расчете. Больше того. Он пожелает, чтобы конструктор рассматривал эти усилия как толчки. Кроме того, он потребует многократной степени надежности. Короче говоря, он предъявит ряд самых трудно выполнимых требований конструктору. Не столько излишнее расходование материала, сколько опасность вынужденного чрезмерного деления конструктором обмотки требует от учения об эксплуатации еще более подробного анализа явления. Правда ли, что добавочный постоянный ток короткого замыкания увеличивает ожидаемое усилие в четыре раза? Верно ли то, что усилие от тока короткого замыкания следует рассматривать как толчок? Правильно ли то, что механическая сторона проблемы исчерпывается определением допустимого напряжения на растяжение в меди?

При более внимательном рассмотрении первой половины периода короткого замыкания мы получим, не только практически, но и теоретически ценные данные. Существует правильный критерий для суждения о действительной опасности усилия от короткого замыкания. Эта опасность значительно меньше, но в то же время и больше, чем показали предыдущие исследования.

Омическое сопротивление обмотки играет подчиненную роль при определении величины длительного тока короткого замыкания, а потому этим сопротивлением мы пренебрегаем. Омическое падение напряжения составляет, правда, даже у очень мощных трансформаторов больше 10% от индуктивного, но угол сдвига фаз в 90° по отношению к индуктивному лишает это падение напряжения всякого значения.

Омическое сопротивление обмотки имеет все же большое значение для скорости исчезновения добавочного постоянного тока короткого замыкания и тем самым для величины максимального суммарного тока внезапного короткого замыкания.

Как уже установлено, в случае невыгоднейшего внезапного короткого замыкания наряду с длительным током короткого замыкания возникает еще и постоянный, имеющий в первый момент значение равное максимальному значению длительного тока короткого замыкания. Таким образом, добавочный постоянный поток рассеяния равен потоку рассеяния длительного короткого замыкания.

Этот добавочный постоянный поток постепенно исчезает. При этом он индуцирует напряжение, достаточное для прохождения добавочного постоянного тока по омическому сопротивлению обмотки.

Обозначим:

$\Phi_{\text{п}}$ — мгновенное значение постоянного потока к моменту t ;

w — число витков обмотки;

$I_{\text{п}}$ — мгновенное значение постоянного тока к моменту t ;

r — омическое сопротивление обмотки,

и получим выражение

$$-\frac{d\Phi_{\text{п}}}{dt} \cdot 10^{-8} w = I_{\text{п}} \cdot r.$$

Поток всегда пропорционален силе тока.

При начальных значениях Φ_0 и I_0 и постоянной времени T , получим

$$\Phi_{\text{п}} = \Phi_0 \varepsilon^{-\frac{t}{T}},$$

$$I_{\text{п}} = I_0 \varepsilon^{-\frac{t}{T}}.$$

Не трудно определить T

$$T = \frac{\Phi_0 w \cdot 10^{-8}}{I_0 r} \text{ сек.}$$

Так как выражение

$$\frac{|\Phi_0|}{I_0}$$

представляет собою поток рассеяния возбужденного одним ампером, то величина

$$\frac{\Phi_0 w \cdot 10^{-8}}{I_0} = L$$

представляет собой коэффициент самоиндукции обмотки. Таким образом, постоянная времени для постоянного тока короткого замыкания будет

$$T = \frac{L}{r} = \frac{2\pi f L}{r} \cdot \frac{1}{2\pi f} \text{ сек.}$$

Она зависит от отношения индуктивного и омического падения напряжений обмотки

$$\frac{2\pi f L}{r}$$

и для трансформаторов колеблется в пределах

$$\frac{1}{30} > T > \frac{1}{300} \text{ сек.,}$$

при чем большие величины соответствуют большим мощностям.

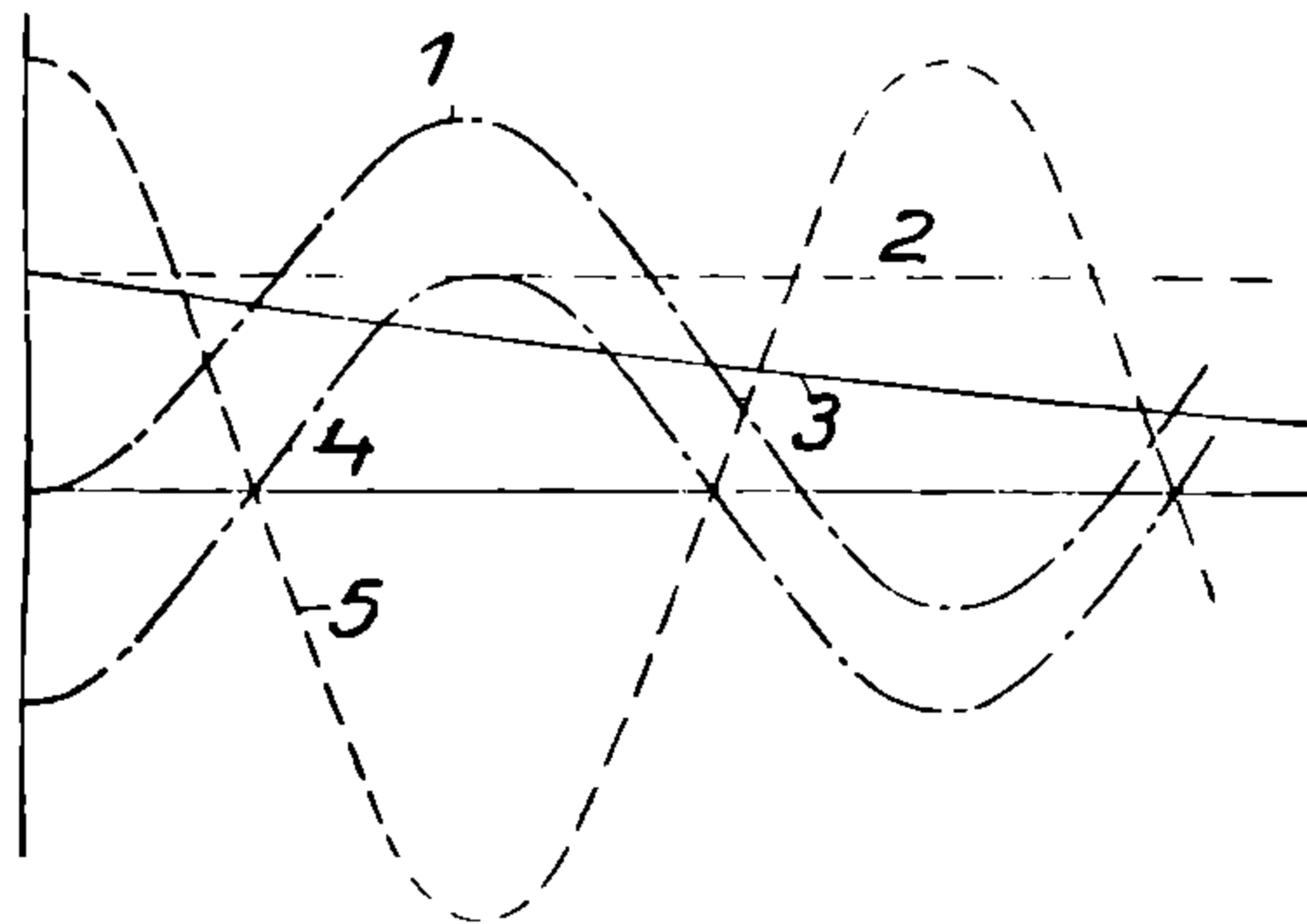
Во всяком случае мы видим, что постоянная времени для постоянного тока короткого замыкания даже у мощных трансформаторов не достигает длительности двух периодов; этот постоянный ток практически исчезает, самое большее, после 8 периодов.

Рассчитывая ради безопасности по максимальному значению

$$T = \frac{1}{25} \text{ сек.},$$

получим картину, изображенную на фиг. 56.

После первой половины периода постоянный ток уже понизился на $\frac{3}{4}$ своего первоначального значения. Суммарный ток внезапного короткого замыкания не увеличился больше до двойной величины максимального длительного тока, а лишь до 1,75-кратной его величины. Механическое усилие растет пропорционально квадрату силы тока. Оно было подсчитано раньше в $\frac{4}{3}$ раза больше действительного значения.



1. Действительный суммарный поток рассеяния.
2. Идеальный постоянный поток рассеяния.
3. Действительный постоянный поток рассеяния.
4. Переменный поток рассеяния.
5. Нормальный главный ток.

Фиг. 56.

Фиг. 56 кроме того показывает, что здесь не может быть речи о каком-либо толчке. Ток короткого замыкания возникает при мгновенном значении, равном нулю, а вместе с током и механическое усилие. Оба они возрастают в продолжение первого полупериода, после чего они падают и ко второму полупериоду уже не поднимаются до прежнего значения (второй «толчок» равен, приблизительно, лишь половине первого), а быстро затухают до размеров своих длительных значений.

Это простое исследование показывает, что опасность механического усилия от короткого замыкания была сильно преувеличена. Но этим вопрос не исчерпывается. Не учтено одно весьма важное обстоятельство. Под влиянием механических усилий материал «сдает», растягивается, расстояния между обмотками увеличиваются, возрастает и индуктивное сопротивление обмотки, что в свою очередь ведет к уменьшению тока короткого замыкания, а следовательно и механических усилий. Упругость материалов при концентрической обмотке должна быть учтена.

44. МЕХАНИЧЕСКОЕ УСИЛИЕ ОТ ТОКА И ДЕФОРМАЦИЯ ОБМОТКИ.

Надо удивляться тому, что до настоящего времени теория механических усилий при коротком замыкании проходила мимо вопросов об упругости рабочих материалов. Главную роль играют не усилия, а запас энергии.

Картина сильно изменится, если мы примем в расчет и деформацию тела обмотки, если наряду с магнитной энергией будет учитываться и энергия этой деформации. Проверочный расчет здесь не создаст много трудностей. Теория вопроса о механических усилиях при коротком замыкании поддается весьма простой разработке и тогда, когда при этом рассматривается упругая деформация.

Весьма существенным для анализа расширенной проблемы об усилиях при токе короткого замыкания является учет того факта, что при коротком замыкании в каждый момент главный поток трансформатора индуцирует во вторичной обмотке половину рабочего напряжения. При этом принимается, что процентное значение индуктивного и омического падения напряжений в первичной и вторичной обмотках одинаково.

Напряжение, индуцированное главным магнитным потоком при коротком замыкании во вторичной обмотке, изменяется, конечно, с нормальным числом периодов и в невыгоднейшем случае внезапного короткого замыкания. Это изменение начинается с нулевого значения, так как главный магнитный поток в этот момент проходит через свой максимум. Напряжение через t секунд достигнет величины

$$E_t = \frac{E}{2} \sqrt{2} \sin \omega t,$$

где E — эффективное значение нормального рабочего напряжения обмотки, а $\omega = 2\pi f$ — электрическая угловая скорость напряжения сети.

Это напряжение, индуцированное главным магнитным потоком, должно быть в любой момент уравновешено противодействующим напряжением, индуцированным суммарным потоком рассеяния N_s (конечно, пренебрегая как и раньше омическим падением напряжения).

Если обмотка содержит w витков, то имеем

$$E_t = \frac{dN_s}{dt} w \cdot 10^{-8}$$

Поток рассеяния N_s в любой момент пропорционален току короткого замыкания I . При прохождении 1-го ампера через обмотку этот поток будет равен

$$\frac{N_s}{I}.$$

Следовательно коэффициент самоиндукции обмотки равен

$$\frac{N_s}{I} w \cdot 10^{-8} = L.$$

Так что

$$\frac{E}{2} \sqrt{2} \sin \omega t = \frac{d(LI)}{dt}$$

Учитывая возможные деформации обмотки, мы должны рассматривать L как переменную величину. При постоянстве формы обмотки имеет место, конечно, нормальный коэффициент самоиндукции L_0 и максимальное значение длительного тока короткого замыкания I_k подсчитывается в этом случае по формуле

$$2\pi f L_0 I_k = \frac{E}{2} \sqrt{2}.$$

Вводя в расчет первоначальную величину коэффициента самоиндукции L , получим

$$-L_0 I_k d(\cos \omega t) = d(LI).$$

Решение этого уравнения будет

$$-L_0 I_k \cos \omega t = LI + C.$$

Не трудно определить и постоянную интегрирования C . Для величины

$$t = 0$$

имеем, естественно,

$$I = 0$$

и таким образом

$$C = -L_0 I_k,$$

что в конечном счете дает

$$I_k (1 - \cos \omega t) = I \frac{L}{L_0} \quad (24)$$

Уравнение (24) полностью соответствует данным параграфа 39 в случае пренебрежения деформацией обмотки, т.-е. когда

$$L = L_0.$$

В этом случае ток короткого замыкания I распадается на постоянный ток I_k и переменный

$$-I_k \cos \omega t.$$

Полную картину мы получим, установив зависимость коэффициента самоиндукции L от тока I , или от механического усилия, зависящего от тока I .

Для обыкновенной concentрической обмотки фиг. 52 мы можем сразу найти эту зависимость. Механическое усилие увеличивает первоначальное расчетное расстояние между обмотками δ_0 в двух направлениях. Оно, с одной стороны, растягивает наружную обмотку и этим увеличивает ее радиус на x см, а с другой стороны, сжимает внутреннюю обмотку так, что ее радиус уменьшается на x см. Речь идет об относительном изменении длины в обеих обмотках на величину

$$\frac{2\pi x}{U_c},$$

где U_c — средняя длина витка.

С увеличением расчетного расстояния между обмотками увеличивается и коэффициент самоиндукции. Тогда как длина индукционных линий потока рассеяния, а также и средняя длина витка всей обмотки остаются неизменными. Таким образом

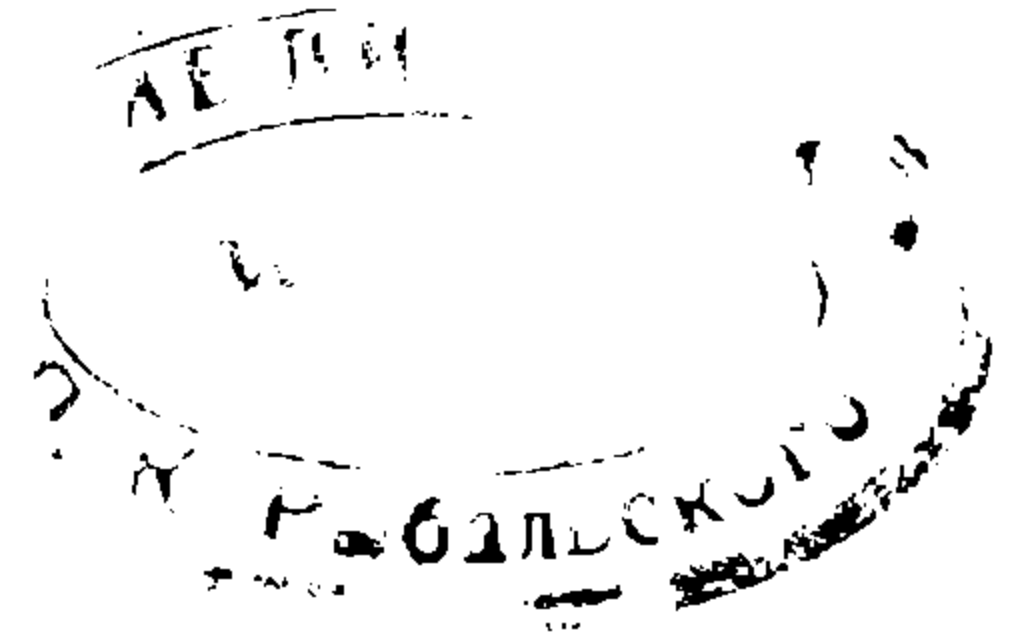
$$\frac{L}{L_0} = \frac{\delta_0 + 2x}{\delta_0} = 1 + \frac{2x}{\delta_0}$$

Установив эти электрические соотношения, не трудно вывести и механические. В пределах упругости растяжение и сжатие пропорциональны механическому напряжению σ kg/cm^2 .

Имеем

$$\frac{2\pi x}{U_c} = \frac{\sigma}{\mathcal{E}}$$

где \mathcal{E} — модуль упругости материала.



В параграфе 42 мы уже определили механическое напряжение σ через величину усилия S (kg) и поперечного сечения меди F_k (cm^2) одной обмотки

$$\sigma = \frac{S}{2\pi F_k}.$$

Мгновенное значение усилия S зависит лишь от квадрата силы тока, так как и при деформации обмотки длина индукционной линии потока рассеяния и средняя длина винта всей обмотки в целом не изменяются.

Имеем сначала

$$x = \frac{U_c}{2\pi \mathcal{E}} \cdot \frac{S}{2\pi F_x}$$

и затем

$$x = \frac{U_c}{2\pi \mathcal{E}} \cdot \frac{S_i}{2\pi F_x} \cdot \left(\frac{I}{2I_k}\right)^2, \quad (25)$$

где S_i — определенная в параграфе 42 из уравнения (23) величина расчетного, максимально возможного механического усилия от короткого замыкания.

Таким образом, пренебрегая омическим сопротивлением обмотки и учитывая деформацию обмотки, получаем для действительного тока короткого замыкания уравнение

$$I_k(1 - \cos \omega t) = I \left(1 + \frac{U_c}{\pi \mathcal{E}} \cdot \frac{S_i}{2\pi F_k} \cdot \frac{I^2}{2I_k^2} \right).$$

Отсюда не трудно с помощью уравнения (25) подсчитать и увеличение расчетного расстояния между витками, так как величина

$$\frac{S_i}{2\pi F_k}$$

представляет собой упомянутую в параграфе 42 расчетную силу, растягивающую наружную обмотку.

Пример. Трансформатор в примерах параграфов 41 и 42 имеет следующие величины

$$U_c = 220 \text{ см},$$

$$\mathcal{E} = 1\,150\,000 \text{ кг/см}^2,$$

$$k_z = 2\,720 \text{ кг/см}^2.$$

У него, следовательно, увеличение расчетного расстояния между обмотками будет равно

$$2x = \frac{2 \cdot 220}{\pi \cdot 1,15 \cdot 10^6} \cdot 2\,720 = 0,33 \text{ см},$$

т.-е.

$$\frac{0,33}{5,4} \cdot 100 = 6\%.$$

Это произойдет при двойном значении длительного тока короткого замыкания. Поэтому даже максимальное мгновенное значение тока короткого замыкания не будет равно удвоенному длительному значению, а будет на 6% ниже (при этом не учитывается затухание постоянного тока короткого замыкания).

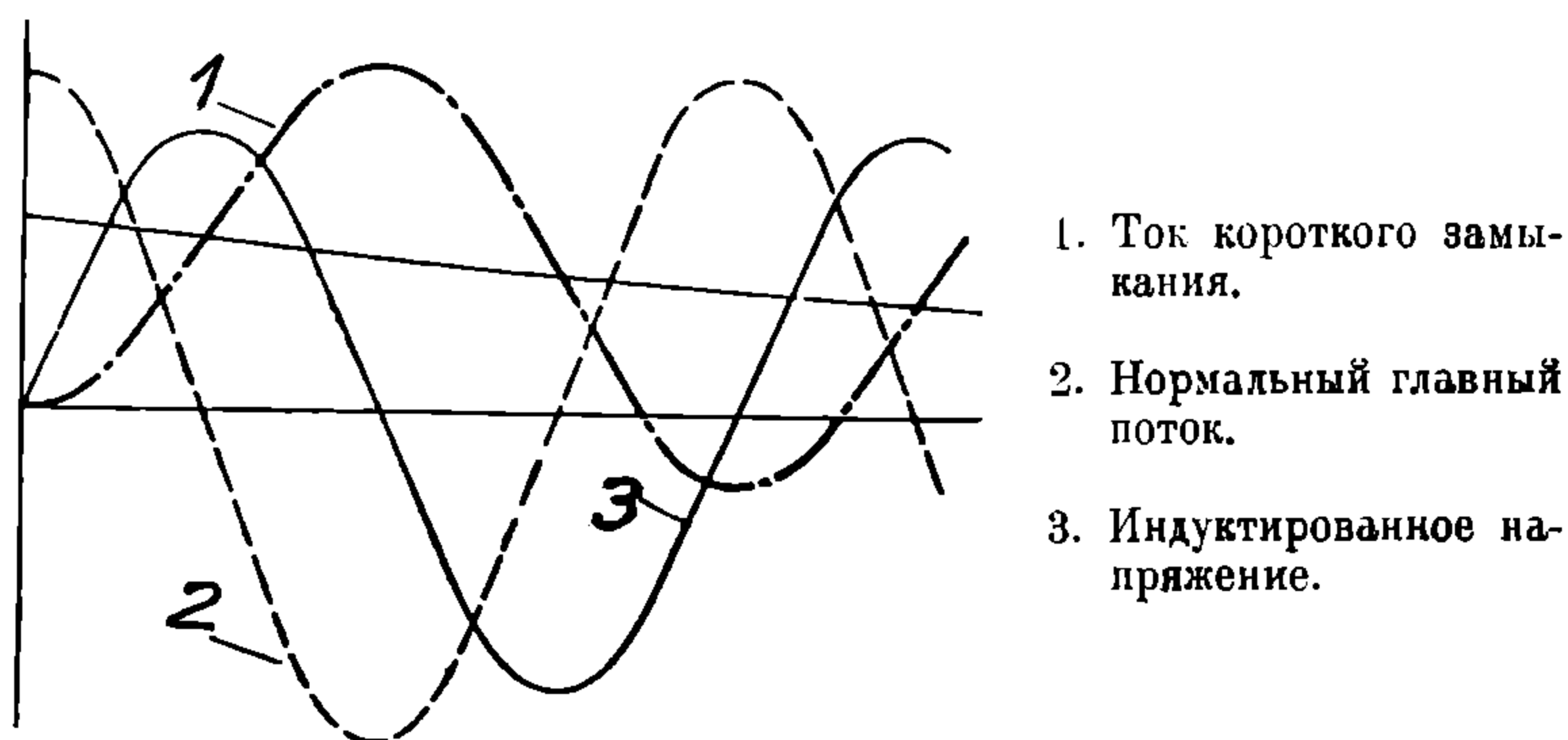
НТБ
ДНУЗТ

45. ДЕФОРМАЦИЯ ОБМОТКИ И БЕЗОПАСНОСТЬ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.

Учет деформации обмотки при коротком замыкании облегчил решение проблемы безопасности короткого замыкания. Однако, остается еще выявить практическое значение этого решения. Это можно сделать, занявшись изучением происходящих здесь перемещений энергии.

Ток короткого замыкания отстает почти на 90° от приложенного к трансформатору напряжения. Если бы обмотка не имела омического сопротивления, то сдвиг фаз составлял бы в точности четверть периода. При коротком замыкании сеть доставляет лишь ту энергию, которая расходуется в виде джоулева тепла.

Эта потеря энергии, как она ни существенна для вопроса об электрической безопасности короткого замыкания, нами в дальнейшем рассматриваться не будет, так как это было сделано в достаточной мере при определении допустимого времени выключения. Кроме того, она не является единственной энергией, угрожающей короткозамкнутому трансформатору.



Фиг. 57.

В пределах целого периода, т.-е. длительно, не наблюдается какого-либо другого притока энергии. Однако, рассматривая половину периода (лучше всего первую) после возникновения короткого замыкания, мы обнаруживаем громадный приток энергии из сети. В эту первую половину периода невыгоднейшего короткого замыкания напряжение, индуцированное главным магнитным потоком во вторичной обмотке (и извне приложенное напряжение), возрастает от нуля до своего максимального значения с тем, чтобы затем снова упасть до нуля. Одновременно с этим возрастает до своей максимальной величины и ток короткого замыкания. В пределах всего полупериода произведение из приложенного напряжения на ток короткого замыкания является величиной положительной. Следовательно из сети поступает громадное количество энергии (фиг. 57).

Куда идет эта энергия? Она, разумеется, сосредоточивается в виде магнитной энергии в потоке рассеяния. Конечно не надолго. В следующую половину периода ток короткого замыкания снова падает; вместе с ним уменьшается и энергия потока рассеяния; приложенное напряжение становится отрицательным, и трансформатор отдает энергию в сеть. Такая же картина получается и в первичной обмотке.

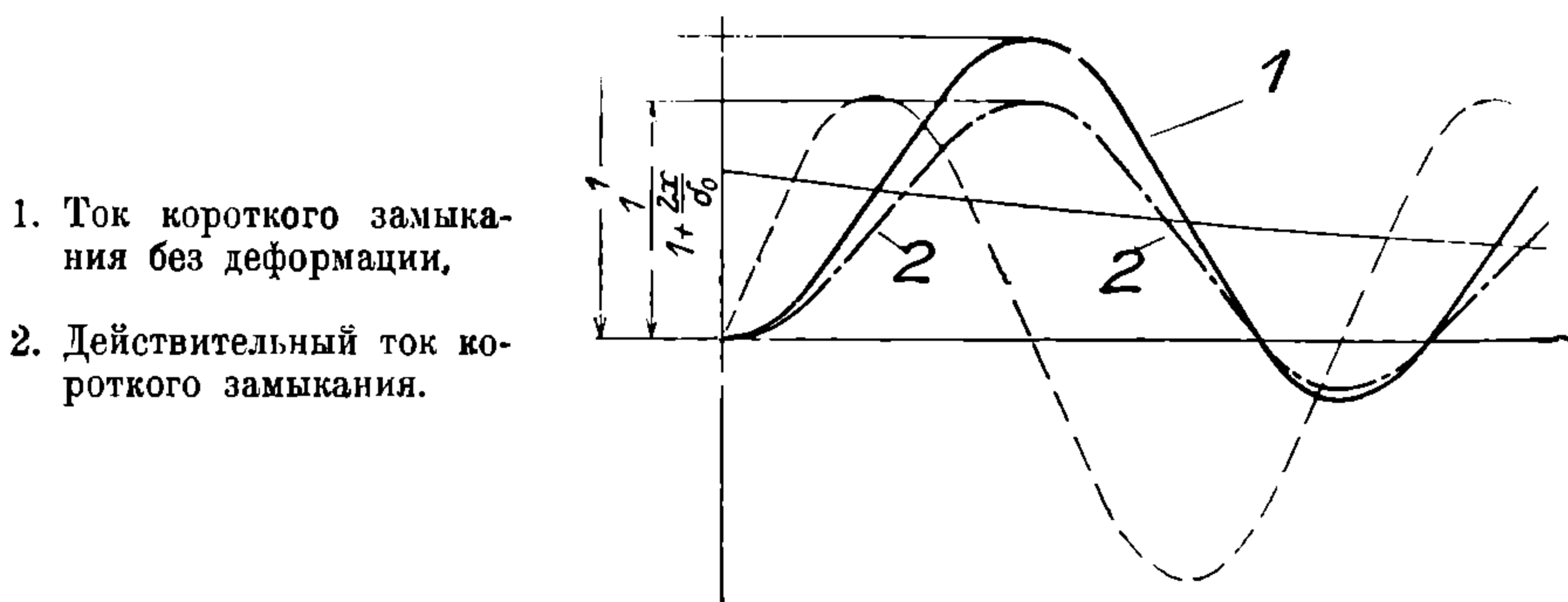
Но эта картина не учитывает деформации обмотки, а потому и не дает нам представления о влиянии этой деформации. Картина движения энергии при коротком замыкании имеет, однако, практическое значение лишь при учете влияния деформации обмотки.

Как указано в предыдущем параграфе, увеличение расстояния между обмотками оказывает реактивное действие на ток короткого замыкания (фиг. 58). Он уменьшается в $\left(1 + \frac{2x}{\delta_0}\right):1$ раз. Таким образом, энергия потока рассеяния в пределах первого полупериода составляет, несомненно, лишь

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{2x}{\delta_0}\right)^2} \text{ часть}$$

той энергии, которая подводилась бы при отсутствии какой-либо деформации обмотки.

Однако подводимая из сети энергия уменьшается не во все моменты времени в одинаковой мере. Приложенное напряжение не изменилось, лишь ток уменьшился в известное число раз.



Фиг. 58.

С некоторой небольшой неточностью можно допустить, что действительная подводимая энергия составит

$$\frac{1}{1 + \frac{2x}{\delta_0}} \text{ часть.}$$

Энергетический расчет дает разницу в

$$\frac{1}{1 + \frac{2x}{\delta_0}} - \frac{1}{\left(1 + \frac{2x}{\delta_0}\right)^2} = \frac{\frac{2x}{\delta_0}}{\left(1 + \frac{2x}{\delta_0}\right)^2},$$

соответствующую, конечно, работе деформации обмотки, отнесенной к единице теоретической энергии потока рассеяния.

Этот расчет, несмотря на свою неточность, имеет громадное значение. Он, во-первых, показывает, что в механическом отношении трансформатору угрожает лишь магнитная энергия потока рассеяния. Кроме того из расчета явствует, что лишь часть этой энергии расходуется на работу деформации.

НТБ
ДНУЗТ

Наихудший случай тот, когда величина

$$\frac{2x}{\delta_0} \left(1 + \frac{2x}{\delta_0}\right)^2$$

достигает своего максимума. Это произойдет при такой деформации, когда

$$2x = \delta_0.$$

Полезно точнее познакомиться с этим случаем. Максимальное значение тока короткого замыкания понижено наполовину. Поток рассеяния содержит в себе лишь четвертую часть той энергии, которая подводится к обмотке при отсутствии деформации обмотки. Такой же величины будет и работа деформации.

Проблема механической безопасности короткого замыкания таким образом приобретает полную ясность. Трансформатор обеспечен от взрыва в случае, если энергия, предоставленная для деформации меньше, чем работа разрыва наружной обмотки. Но это не предохраняет его от последствий короткого замыкания. Обмотка может выдерживать большие растяжения, не подвергаясь при этом разрыву. Однако, предохранение трансформатора от последствий короткого замыкания обеспечено лишь тогда, когда деформации упруги, когда первоначальное расстояние между обмотками восстанавливается после каждого полупериода, иначе говоря, когда энергия деформации возвращается обратно в сеть.

Как конструктор, так и эксплуатационный инженер будут согласны с тем, что короткое замыкание не должно вызывать остаточных деформаций. Возникающие усилия не должны выходить из так называемого предела пропорциональности. Было бы ошибкой подбирать механическое усилие только в зависимости от предела прочности нагруженного материала. Это — слишком много для обеспечения от разрыва, но слишком мало для предохранения от короткого замыкания.

Легко подсчитать условия безопасности от разрыва.

Длительный ток короткого замыкания в I'_k (в эффективных амперах) определяется из половины рабочего напряжения (в E эффективных вольт.) и величины индуктивного сопротивления ωL_0 неповрежденной обмотки следующим образом

$$I'_k = \frac{E}{2 \cdot 2 \pi f \cdot L_0}.$$

Его максимальная величина при внезапном коротком замыкании возрастает теоретически на 100%, а практически на 75%, как это было доказано в параграфе 43. Максимальное значение магнитной энергии, заключающейся в потоке рассеяния, таким образом будет равно

$$(\sqrt{2} \cdot 1,75 I'_k)^2 \frac{L_0}{2}$$

Не больше четверти этой величины составит энергия деформации. Приняв нормальную полную силу тока — I и напряжение короткого замыкания e_k (%), мы получим

$$I'_k = \frac{100 I}{e_k}.$$

Разрушающая энергия в зависимости от номинальной мощности EI одного ядра трансформатора будет таким образом составлять

$$\frac{6 EI}{f \cdot e_k} \text{ ватт-сек.}$$

Эта разрушающая энергия не должна доходить до 8 000 ватт-секунд для каждого килограмма меди наружной обмотки, в противном случае трансформатор взорвется. Таким образом, если медь наружной обмотки весит G_m *kg*, то

$$G_m > \frac{0,75 EI \cdot 10^{-3}}{f e_k}$$

Пример. Неоднократно нами рассмотренный трансформатор в 16 000 kVA, 50 периодов и с 5,6% напряжения короткого замыкания должен был бы иметь вес своей наружной обмотки не меньше, чем

$$\frac{0,75 \cdot 16\,000}{3 \cdot 50 \cdot 5,6} = 14 \text{ kg меди.}$$

Ясно, что этот трансформатор хорошо обеспечен от разрыва, однако в нем медь подвергается значительному растягивающему усилию.

46. ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ ОПАСНОСТЬ ОТ МЕХАНИЧЕСКОГО УСИЛИЯ.

Числовой пример последнего параграфа поразителен по своим результатам. Наличной разрушающей энергии достаточно лишь для $\frac{1}{40}$ части всей меди обмотки.

Картина изменится незначительно и при других практических случаях. Таким образом мы видим, что в трансформаторе с концентрической обмоткой опасность разрыва практически совершенно исключена.

Эти утверждения, как оказывается, не опровергаются опытными данными. Автору не известен ни один случай, при котором произошел бы разрыв концентрической обмотки трансформатора при коротком замыкании. Возможны, конечно, сильные перемещения масла, порча кожуха, увеличения расстояния между обмотками, однако до разрыва дело не доходит.

Иначе обстоит дело с дисковой обмоткой, части которой скреплены между собой болтами. В этом случае для разрыва потребна значительно меньшая энергия. Однако мощные трансформаторы строятся почти исключительно с цилиндрической обмоткой.

Обмотка, способная взорваться при коротком замыкании, отходит в область преданий. Однако опасность от механического усилия при коротком замыкании окончательно не пропадает. Если это усилие не может разорвать обмотки, то оно может ее изуродовать.

Механическое усилие, как известно, вызывает растягивающие напряжения в витках наружной обмотки. Эти напряжения (не учитывая деформации) могут, как это уже сказано, достигнуть пределов прочности меди и даже перешагнуть их, не разрывая при этом обмотки. Но они вызывают остающиеся растяжения в том случае, если не находятся ниже предела пропорциональности.

К несчастью медь, строго говоря, не имеет вообще никаких пределов пропорциональности. Остающиеся деформации образуются в ней уже при незначительных нагрузках. Допуская некоторую неточность, можно считать предел пропорциональности для меди около 500 kg/cm^2 (он падает с увеличением температуры).

НТБ
ДНУЗТ

Очень многие современные мощные трансформаторы в механическом отношении не отличаются безопасностью при коротком замыкании. Также и трансформатор в нашем примере. Эти трансформаторы работают при большой плотности тока в меди. Уравнение (23), принимая во внимание быстрое затухание постоянного тока короткого замыкания, может быть приведено к виду

$$S = \frac{E I 10^3}{nf \delta' e_k}, \quad (23a)$$

удобному для практических целей.

Однако механическая проблема короткого замыкания продолжает оставаться неразрешенной.

Если нагрузки меди при коротком замыкании превосходят величину 500 kg/cm^2 , то единственным выходом в этом случае оказывается — скрепление наружной обмотки крепкими бандажами, воспринимающими значительную часть механического усилия. Необходимо всеми мерами бороться с остаточными деформациями.

Внутренняя спираль цилиндрической обмотки находится под давлением. Она должна быть хорошо защищена от железа керна, в противном случае она может быть повреждена. Однако, чем меньше внутренняя спираль может деформироваться, тем в большей опасности находится наружная спираль. Мощные трансформаторы в настоящее время выполняются с крепкими бандажами на наружных обмотках. Существуют даже такие крепкие железные конструкции, которые окружают наружную обмотку как бы сплошным ящиком.

Однако следует предпочесть профилактические меры. Необходимо по возможности увеличить напряжение короткого замыкания. Это требование снова всплывает. Оно должно быть принято во внимание эксплуатационным инженером.

Довольно своеобразно сказывается малое расчетное расстояние между обмотками при их хотя бы и незначительном сдвиге друг относительно друга в направлении оси керна фиг. 59. У механического усилия оказывается при этом осевая составляющая, которой ничто в конструкции не противодействует. Она тем больше, чем меньше расстояние между обмотками.

Строгая симметрия, одинаковые осевые длины обеих обмоток являются обязательными требованиями в конструкции. Однако обмотки одинаковой длины в осевом направлении легко подвергаются опасности стать неодинаковыми по длине в случае наличия ответвлений. Ответвление выключает определенную часть обмотки.

Поэтому в мощных трансформаторах ответвления выполняются по середине керна. Выключенные части обмотки не должны нарушать симметрию междуобмоточных промежутков.

Для мощного трансформаторостроения большим облегчением служит тот факт, что мощные единицы составляют электрически самостоятельную группу вместе с питающим их генератором. Мощные генераторы включаются параллельно лишь с вторичной стороны питаемых ими трансформаторов. Таким образом короткое замыкание трансформатора вызывает и одновременное короткое замыкание генератора.

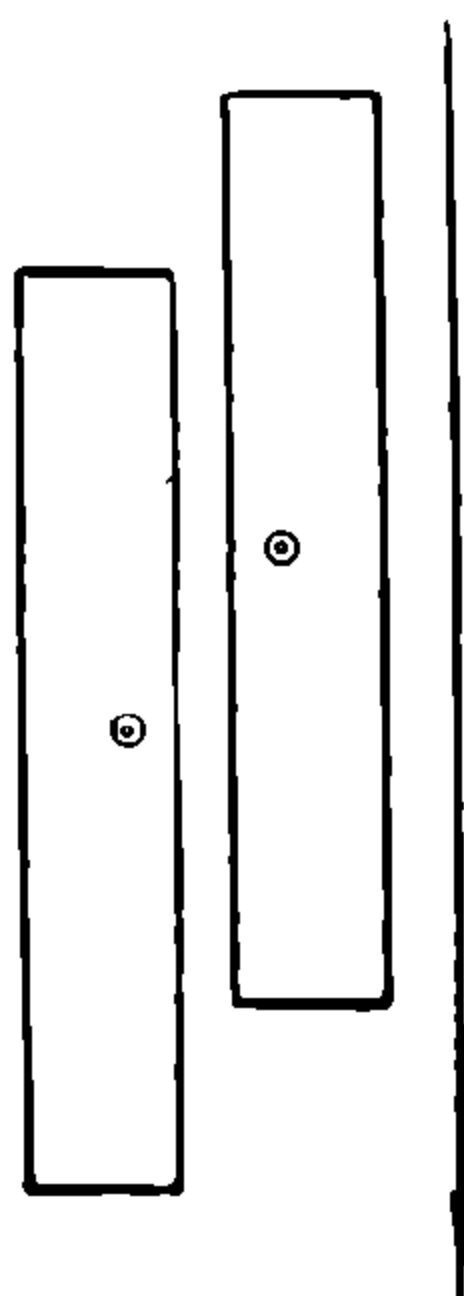
Разумеется, коротко замкнутый генератор в этом случае не будет поддерживать рабочего напряжения у зажимов первичной обмотки трансформатора. Этим самым ослабляется явление короткого замыкания. Вообще говоря, чем больше трансформатор, тем сильнее сказывается на сеть его короткое замыкание. Этот факт частично уменьшает трудности проблемы короткого замыкания.

47. ОДНОФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ.

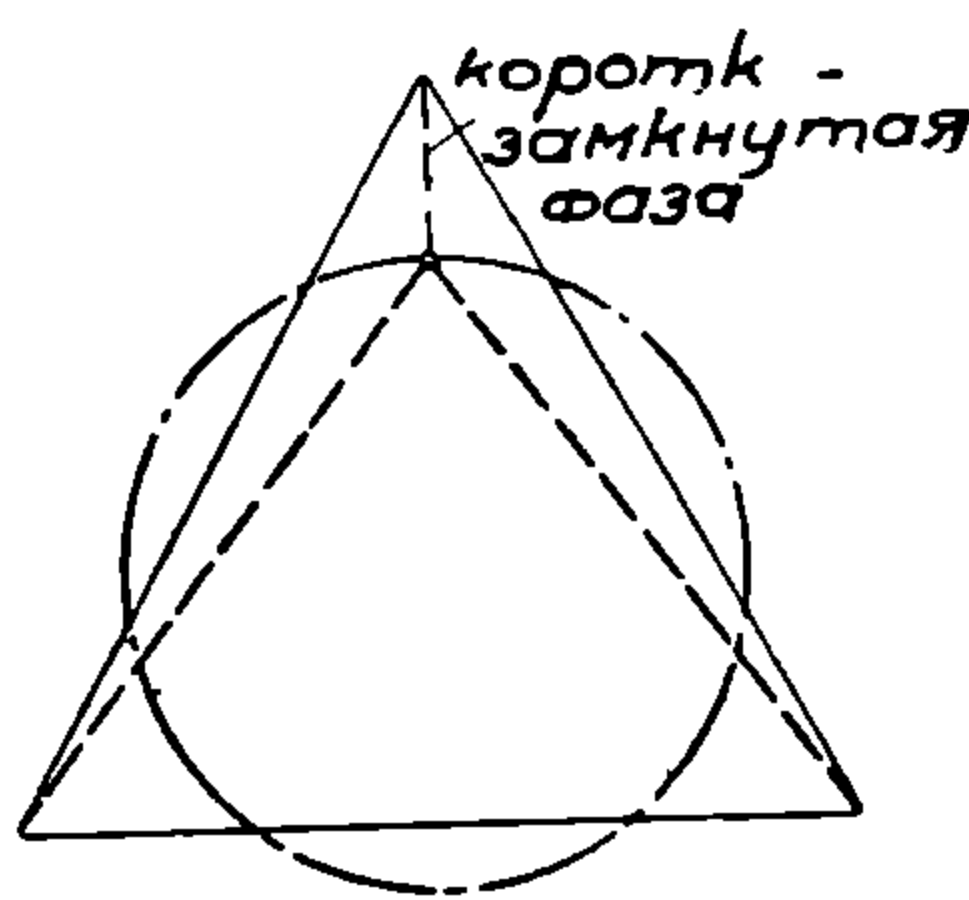
До сих пор мы рассматривали лишь случай трехфазного короткого замыкания трехфазного трансформатора. Однако трехфазные короткие замыкания — явление редкое. Наиболее частым случаем является однофазное короткое замыкание, т.-е. замыкание на землю.

При рассмотрении такого короткого замыкания надо иметь в виду следующее. Керн коротко замкнутой обмотки должен был бы заключать в себе лишь половину главного потока, однако это невозможно, так как и потоки кернов соединены в звезду.

Собственно говоря, однофазное короткое замыкание является лишь частным случаем однофазной нагрузки, рассмотренной в параграфе 27. Длительный однофазный ток короткого замыкания с первичной стороны передается на все три фазы. Согласно фиг. 10 на керне с коротко замкнутой обмоткой имеется в первичной обмотке $\frac{2}{3}$ числа ампервитков коротко замкнутой вторичной обмотки.



Фиг. 59.



Фиг. 60.

Остальные $\frac{2}{6}$ числа ампервитков короткого замыкания дадут в первичной обмотке одну часть отрицательную и другую положительную. Отрицательная $\frac{1}{6}$ имеет то же направление, что и ампервитки вторичной обмотки и вместе с последней создает притягивающее механическое усилие. Отталкивающее усилие создается $\frac{5}{6}$ ампервитков вторичной обмотки. В результате имеем отталкивающее усилие, соответствующее

$$\left(\frac{5}{6}\right)^2 - \left(\frac{1}{6}\right)^2 = \frac{2}{3}$$

от усилия при трехфазном коротком замыкании.

Что однофазное короткое замыкание лишь на одну треть менее опасно, чем трехфазное — это обстоятельство не исчерпывает полностью вопроса. Оно не учитывает ни (известных нам из исследования однофазных нагрузок) сильных однофазных добавочных магнитных потоков, ни распределения первичного падения напряжения по всем трем кернам, как это было описано в параграфе 27.

Фиг. 15 соответствует безындукционной однофазной нагрузке в случае соединения трансформатора «звезда-звезда». Короткое замыкание является почти чисто индуктивной нагрузкой. Ему соответствует векторная диаграмма фиг. 60.

Фазовое напряжение на керне коротко замкнутой обмотки непосредственно уменьшается, остальные два фазовых напряжения увеличиваются. Искажение системы напряжений должно быть значительным, так как уже при номинальном токе мы имеем большую величину добавочного потока.

В первый момент может показаться, что фазовое напряжение коротко замкнутого керна должно было бы попросту исчезнуть, так как однофазный добавочный поток нормального тока короткого замыкания очень велик. Но вместе с напряжением уменьшается, конечно, и ток короткого замыкания, а тем самым и добавочное падение напряжения. Окружность нулевых точек (фиг. 60), должна остаться внутри треугольника напряжения.

Это явление трудно поддается точному расчету. Одно лишь достоверно, что при соединении «звезда-звезда» однофазное короткое замыкание незначительно. Механическое усилие достигает приблизительно 30% усилия при трехфазном коротком замыкании. Во столько же раз уменьшится и джоулево тепло.

Соединение «звезда-звезда» без нулевого провода с первичной стороны является, таким образом, вполне удовлетворительным соединением на случай короткого замыкания одной фазы трансформатора, тогда как при осветительной нагрузке, как известно, оно было совершенно неприемлемо. По этой же причине на случай короткого замыкания неприемлемо соединение «треугольник-звезда», так как в этом случае короткое замыкание сосредоточивается на одном керне, в результате чего возникают приблизительно те же явления, что и при трехфазном коротком.

Из всего сказанного ясно, что однофазное короткое замыкание странным образом связано с осветительной нагрузкой, а потому безусловно полезно в нескольких словах сопоставить их друг с другом. Это сопоставление весьма существенно для эксплуатационного инженера, так как он должен все учесть еще при покупке трансформатора.

Каждая одноплечая нагрузка, в особенности нагрузка осветительная, вызывает добавочный однофазный магнитный поток, искажающий систему напряжений. В параграфах 27 и 28 были подробно рассмотрены последствия явления добавочного потока. Эксплуатационный инженер при нормальной эксплуатации старается, конечно, избегать этих явлений, а потому для осветительного дела выбирает соединение «треугольник-звезда» или «звезда-зигзаг».

Чисто однофазные нагрузки встречаются редко даже и в осветительном деле. Они тем более редки, чем больше сеть (или часть сети), питаемая трансформатором, и становятся невыносимыми при наличии в сети кроме ламп также и моторов. Таким образом по теории вероятностей с увеличивающейся мощностью трансформатора увеличивается равномерность распределения нагрузки на все три фазы.

С другой стороны при возрастающей мощности растет в тепловом и механическом отношении и опасность короткого замыкания. Опасность неравномерных нагрузок при растущей мощности трансформатора уступает место опасности коротких замыканий. Практически это должно выразиться в том, что для больших мощностей мы будем употреблять соединение «звезда-звезда» без нулевого провода с первичной стороны, а для малых — обычные осветительные соединения. Обо всем сказанном эксплуатационный инженер должен иметь ясное представление при покупке трансформатора.

Преобладание однофазных коротких замыканий над трехфазными является ценной защитой мощного трансформатора. Это в достаточной

мере объясняет факт относительно редких случаев повреждений трансформаторов вследствие короткого замыкания, несмотря на все еще плохо осуществляемые конструкции и защиты трансформаторов.

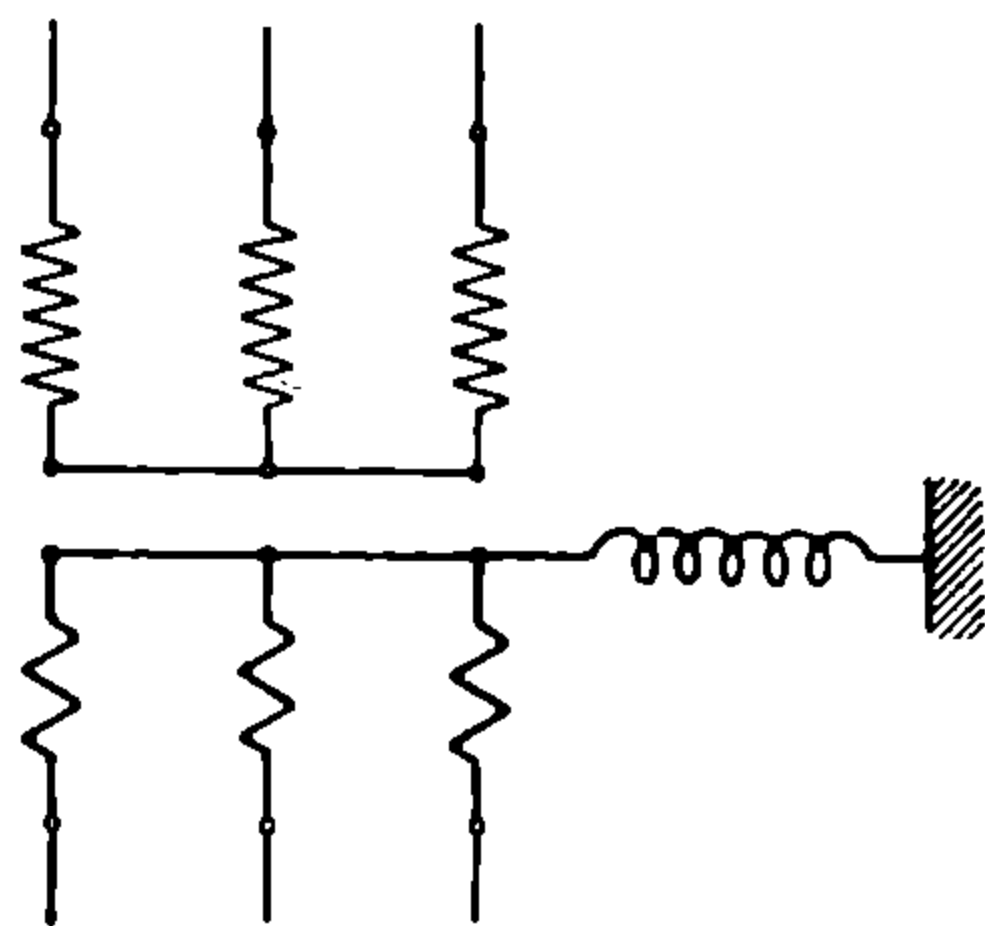
Следует указать еще на одно нерассмотренное явление при однофазном коротком замыкании (см. фиг. 60). Фазовые напряжения на кернах с некороткозамкнутыми обмотками возрастают до довольно значительных величин. Они могли бы вызвать тяжелые повреждения аппаратов. Однако через несколько секунд короткое замыкание ликвидируется, а потому практически повышение напряжения не имеет большого значения.

Вышеупомянутое явление распределения первичного падения напряжения поврежденного керна (см. параграф 27) отходит на задний план в сравнении с последствиями от добавочного однофазного потока, возникающего при однофазном коротком замыкании. Следует отметить, что это падение напряжения поддерживает силу тока короткого замыкания. Оно направлено в магнитном отношении против добавочного потока. Однако одновременно с этим оно ослабляет повышение напряжения в неповрежденных кернах, что безусловно является преимуществом.

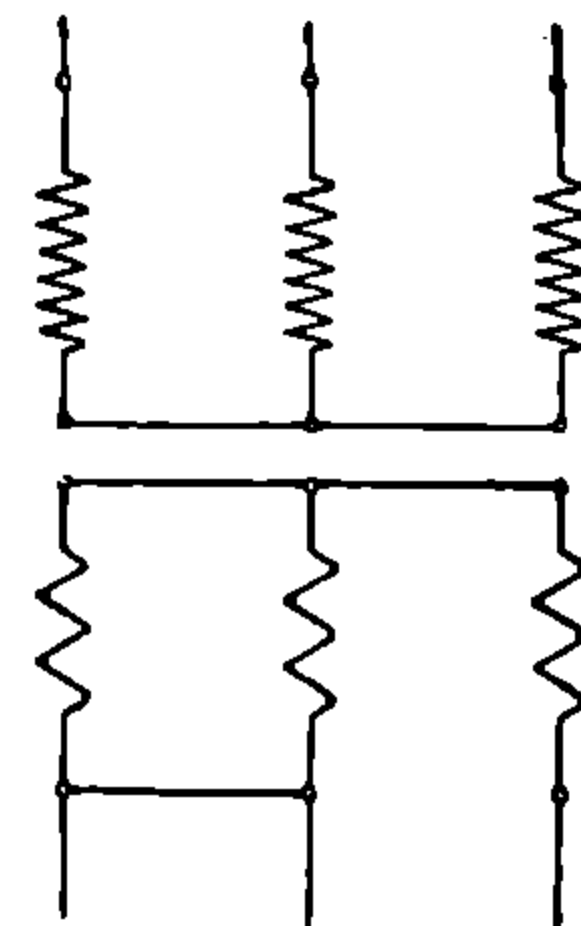
Картина в целом дает значительное ослабление короткого замыкания. Трансформатор, как бы из чувства самосохранения, отводит напряжение от поврежденной фазы. Его средства самозащиты более действительны, чем какие-либо другие в виде защитных аппаратов. Кроме того средством самозащиты является у него также и деформация обмотки.

48. ДВУХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ.

Опасность однофазного короткого замыкания уменьшается применением защитного аппарата (правда не назначенного для защиты от чрезмерных токов), именуемого заземляющей дроссельной катушкой. Основной ее задачей является, собственно говоря, защита от перенапряжений, а потому в связи с этим она в дальнейшем и будет подробнее рассмотрена.



Фиг. 61.



Фиг. 62.

Эта дроссельная катушка включается, согласно фиг. 61, между нулевой точкой обмотки и землей и не представляет собой никакой помехи при нормальной работе. При замыкании на землю какой-либо фазы она, являясь частью короткозамкнутой цепи, увеличивает индуктивное сопротивление.

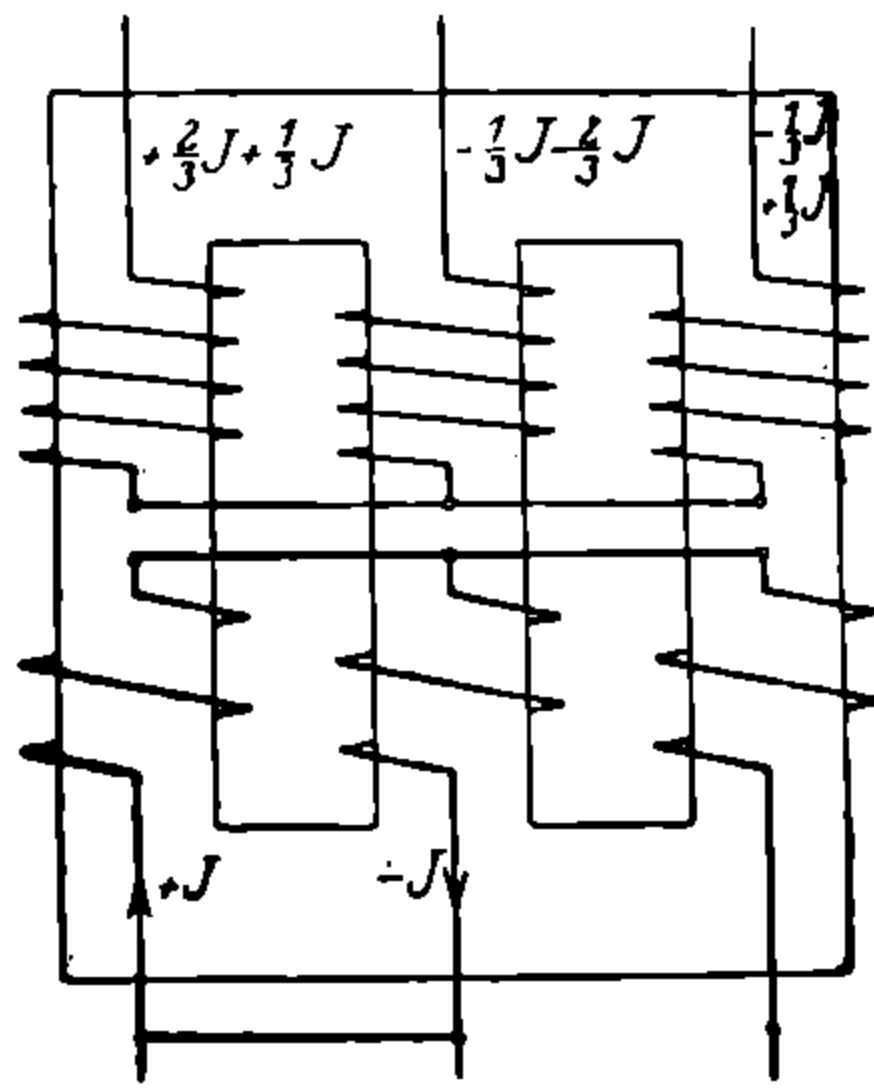
Последствия настолько очевидны, что нет смысла их подробно описывать. Каждое увеличение индуктивного сопротивления обмотки

НТБ
ДНУЗТ

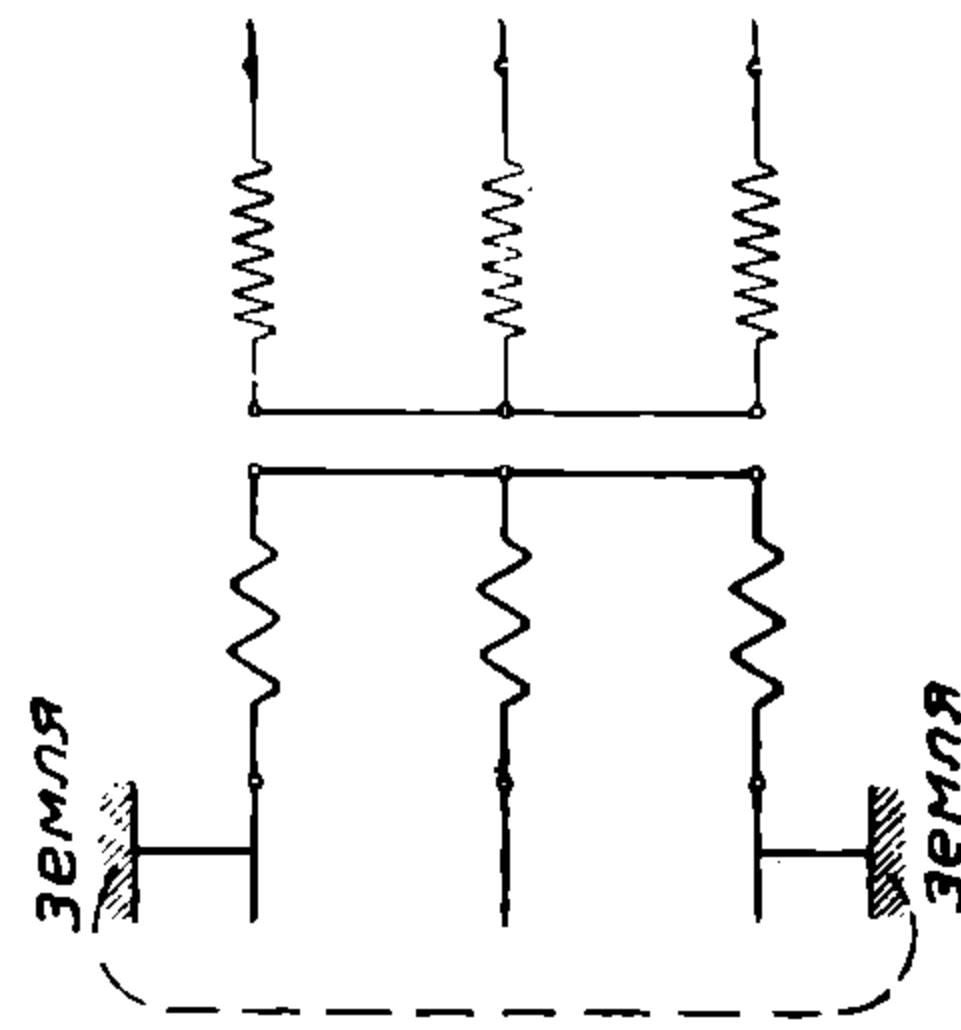
желательно, так как оно понижает величину тока короткого замыкания. Особенно желательно такое увеличение индуктивного сопротивления, которое возникает лишь в нужных случаях, при коротком замыкании, не внося искажений в расположении обмотки и не увеличивая при нормальной работе падения напряжения в трансформаторе.

Эта дроссельная катушка оправдывает свое назначение в качестве аппарата для защиты от чрезмерных токов лишь тогда, когда ее индуктивное сопротивление того же порядка, что и у обмотки трансформатора. Такое пожелание должно быть, по возможности, учтено при расчете дросселя. Однако это требование не может быть решающим, так как главное назначение дросселя, как уже было упомянуто, заключается совершенно в другом.

Наряду с вопросом об однофазном коротком замыкании следует рассмотреть и вопрос о двухфазном коротком, согласно фиг. 62. Целесообразно и на нем остановиться несколько подробнее. Оно не представляет особых трудностей для исследования, так как его можно просто свести к двум однофазным коротким замыканиям.



Фиг. 63.



Фиг. 64.

При непосредственном двухфазном коротком замыкании (фиг. 63) оба фазовых тока, конечно, равны и противоположны по фазе. Разделение двухфазного короткого замыкания на два однофазных и получающееся при этом токораспределение видно на фиг. 63 и 10.

Двухфазное короткое замыкание на зажимах вторичной обмотки оставляет третью фазу совершенно нетронутой. Несмотря на это оно не так опасно, как трехфазное короткое, так как в данном случае индуктивные сопротивления обеих фазовых обмоток включены последовательно, а напряжения, конечно, не совпадают по фазе. Вместо двойного фазового напряжения действует лишь междуфазовое напряжение.

Ясно, что сила тока при двухфазном коротком замыкании будет в

$$1 : \frac{\sqrt{3}}{2}$$

раза меньше силы тока при трехфазном коротком. Таким образом и джоулево тепло и механическое усилие составляют лишь 75% соответствующих величин при трехфазном коротком замыкании.

Менее вероятным, но все же мыслимым, является двухфазное короткое замыкание на землю, дающее картину несколько отличающуюся от двухфазного короткого замыкания у зажимов трансформатора (фиг. 64). Но и на этот раз оба тока короткого замыкания, конечно, про

НТБ
ДНУЗТ

тивоположны по фазе. Прибавилось лишь сопротивление земли. Оба эти вида двухфазных коротких замыканий следует рассматривать не иначе, как непосредственные двухфазные короткие замыкания на зажимах. Сопротивление земли представляет собою слишком незначительную величину для того, чтобы ее принимать в расчет.

Общий обзор различных случаев короткого замыкания дает возможность сделать следующие любопытные сопоставления. Однофазные короткие замыкания в эксплуатации неизбежны. Самый тщательный уход за предприятием бессилен против коротких замыканий на землю. Но они сравнительно безопасны.

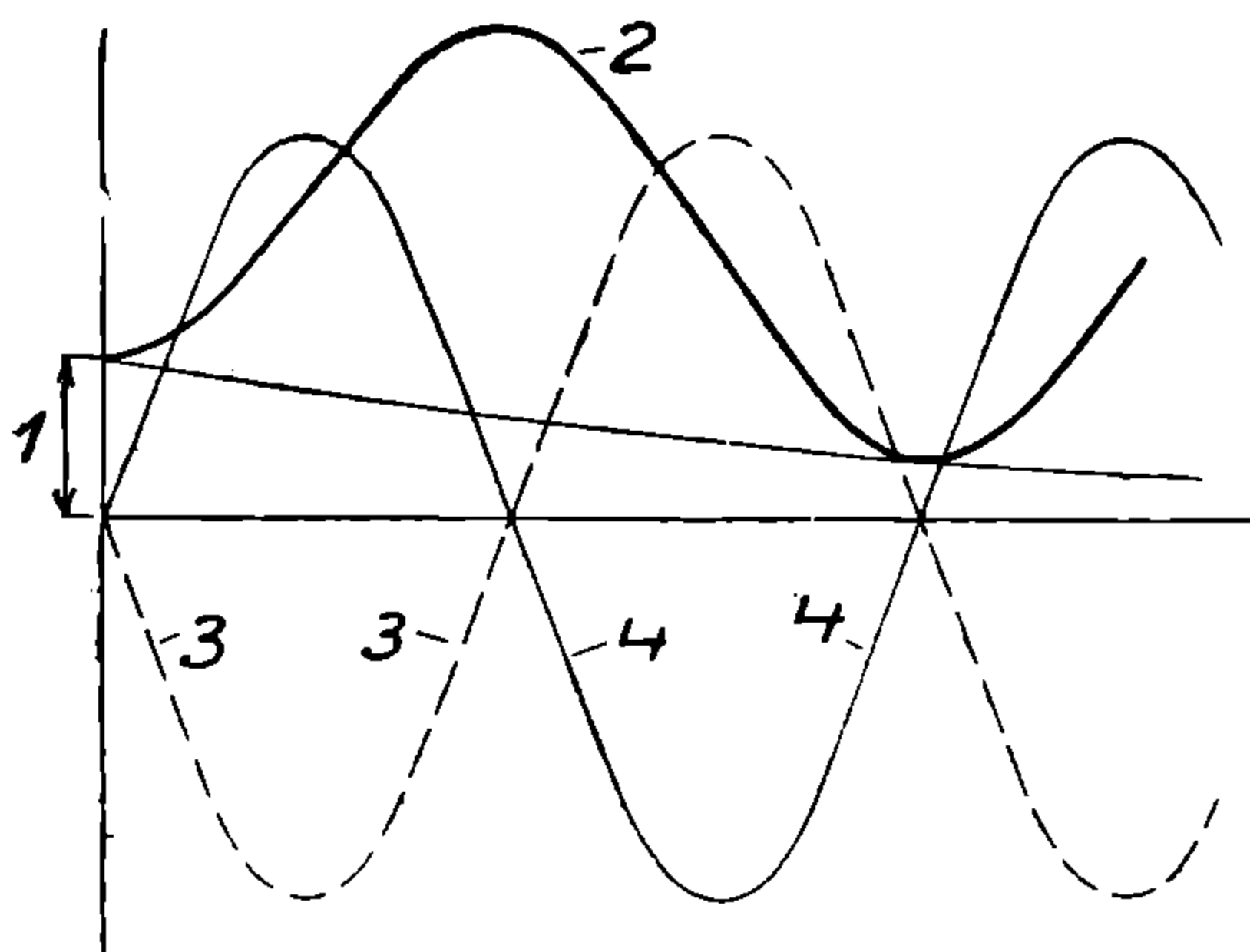
Двухфазное короткое замыкание в большинстве случаев является следствием невнимательности обслуживающего персонала. При достаточной заботливости можно избежать неправильных включений. Мы видели, что двухфазное короткое замыкание сопровождается последствиями более тяжелыми, чем при однофазном коротком.

Трехфазное короткое замыкание представляет собою редкое явление. Оно может возникнуть или в результате злонамеренной порчи оборудования, или мало вероятного совпадения других видов коротких замыканий.

Трехфазное короткое замыкание создает весьма тяжелые повреждения; оно является самым худшим видом короткого замыкания. Если эксплуатационный инженер своевременно позаботится о защите от такого тяжелого вида короткого замыкания, то этим самым он может считать свой долг выполненным.

49. ТОК ВКЛЮЧЕНИЯ.

Ток короткого замыкания, рассмотренный нами в предыдущих параграфах, является максимально возможным длительным током трансформатора. Этот ток определяет время выключения аппаратов, защищающих трансформатор от чрезмерных токов. Он вызывает потребность в коротких выдержках времени. Однако нельзя защиту от чрезмерных



1. Остаточный поток.
2. Главный магнитный поток.
3. Индуцированное напряжение.
4. Приложенное напряжение.

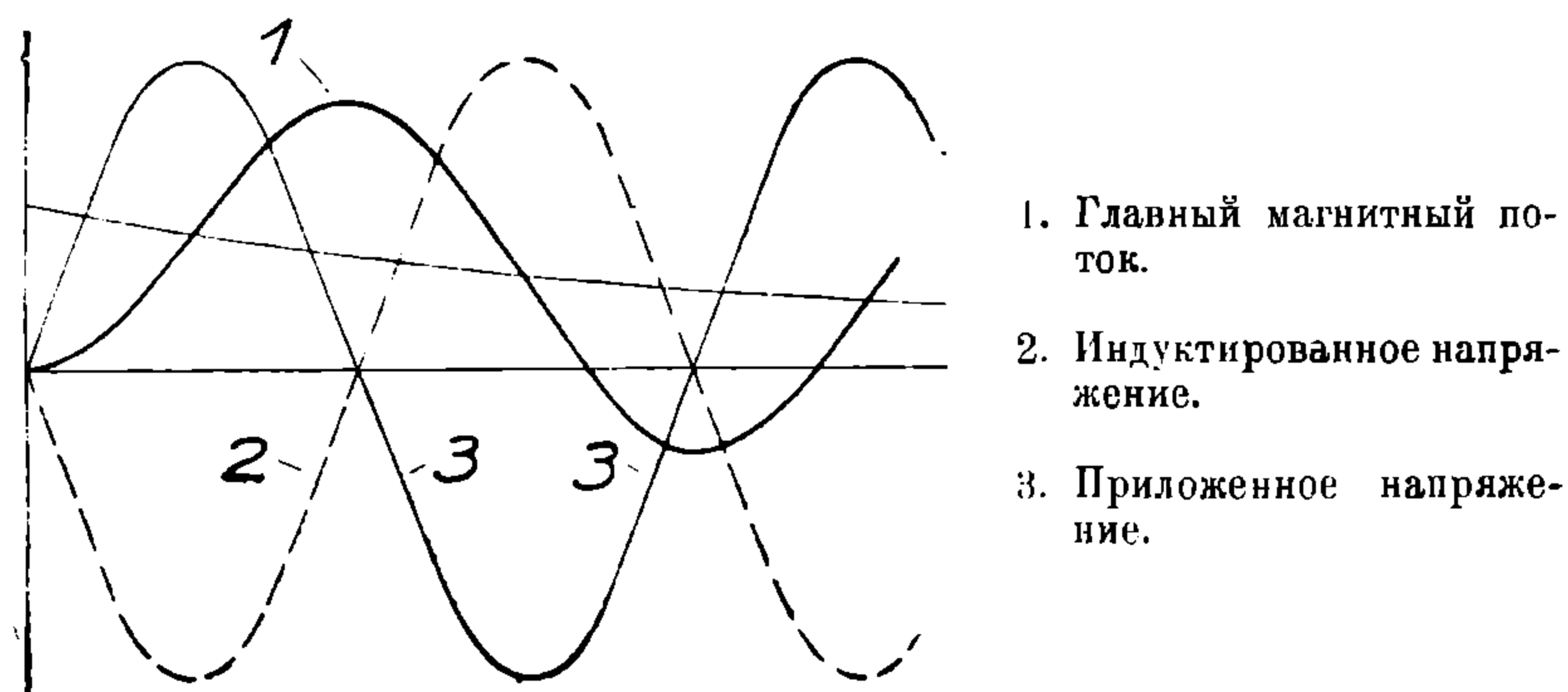
Фиг. 65.

токов выполнить так, чтобы каждый опасный ток сразу выключал автомат. Кроме повторяющихся, неизбежных в эксплуатации толчков тока, наблюдается еще один вид чрезмерных токов, свойственных трансформатору в момент его включения в первичную сеть.

Конечно в чрезмерный ток может, очевидно, превратиться лишь намагничивающий ток — единственный ток, протекающий по обмотке

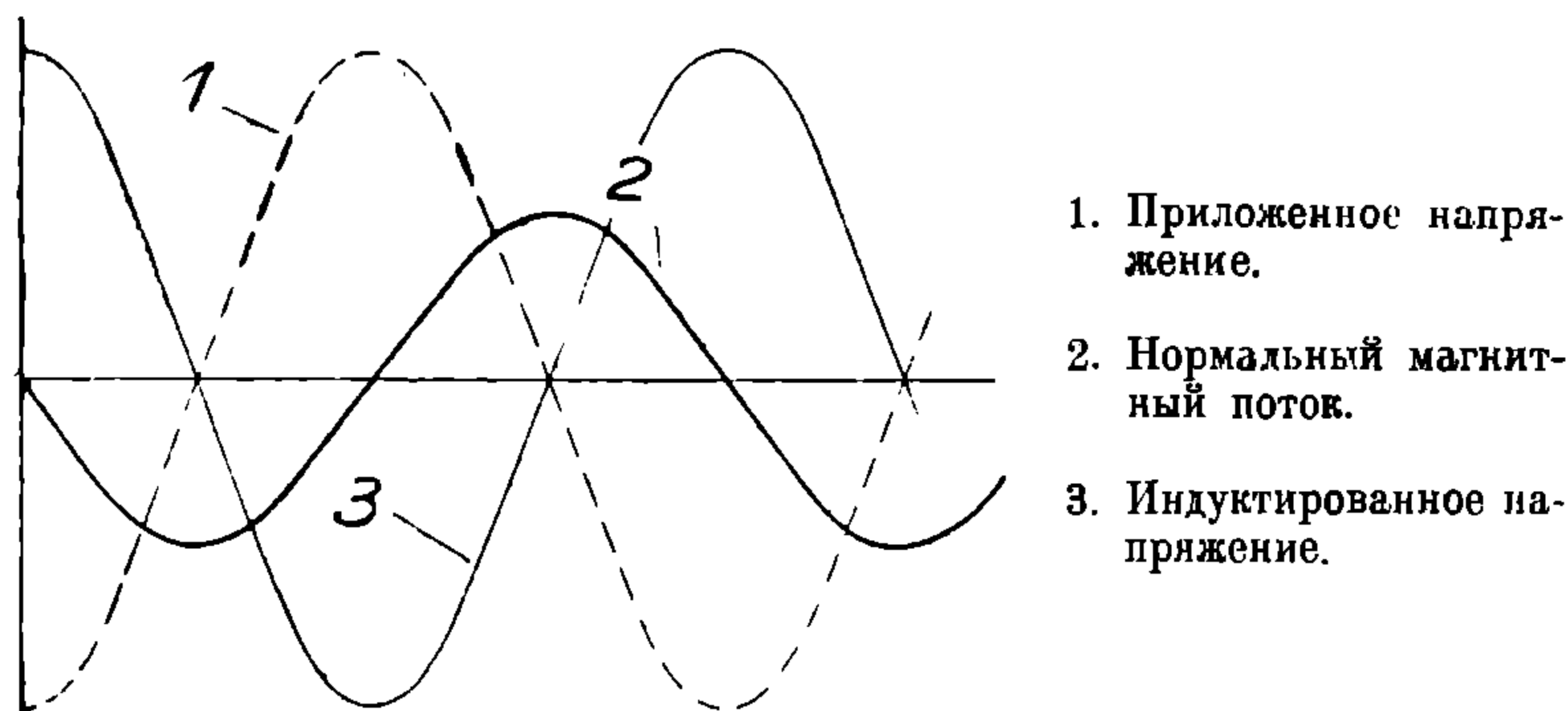
при отсутствии нагрузки. Поразительно то обстоятельство, что этот сравнительно малый ток, составляющий обычно не больше 10% от тока полной нагрузки трансформатора, этот ток при известных условиях в первый период после включения может превзойти не только силу тока при полной нагрузке, но даже и ток короткого замыкания.

Борьба с током включения при помощи обычной защиты от чрезмерных токов немислима. Не для этого включают трансформатор, чтобы



Фиг. 66.

его тут же выключил автомат. Трансформатор должен остаться включенным. Правда, величина тока включения зависит от случая. Мы в дальнейшем увидим, что характер возникающих трудностей зависит от мгновенного значения напряжения первичной обмотки при включении. Однако неудобно повторять включения с целью попадания на наиболее благоприятный момент. Проблема включения безусловно является проблемой чрезмерных токов и должна быть основательно изучена.



Фиг. 67.

Не трудно доказать, что в момент включения действительно возникают нежелательные явления. Картина чрезвычайно упрощается, если временно пренебречь омическим сопротивлением первичной обмотки.

Может показаться странным, что самым опасным является включение на сеть в момент, когда напряжение равно нулю. Поэтому рассмотрим сначала этот случай, полагая, что напряжение растет с момента включения.

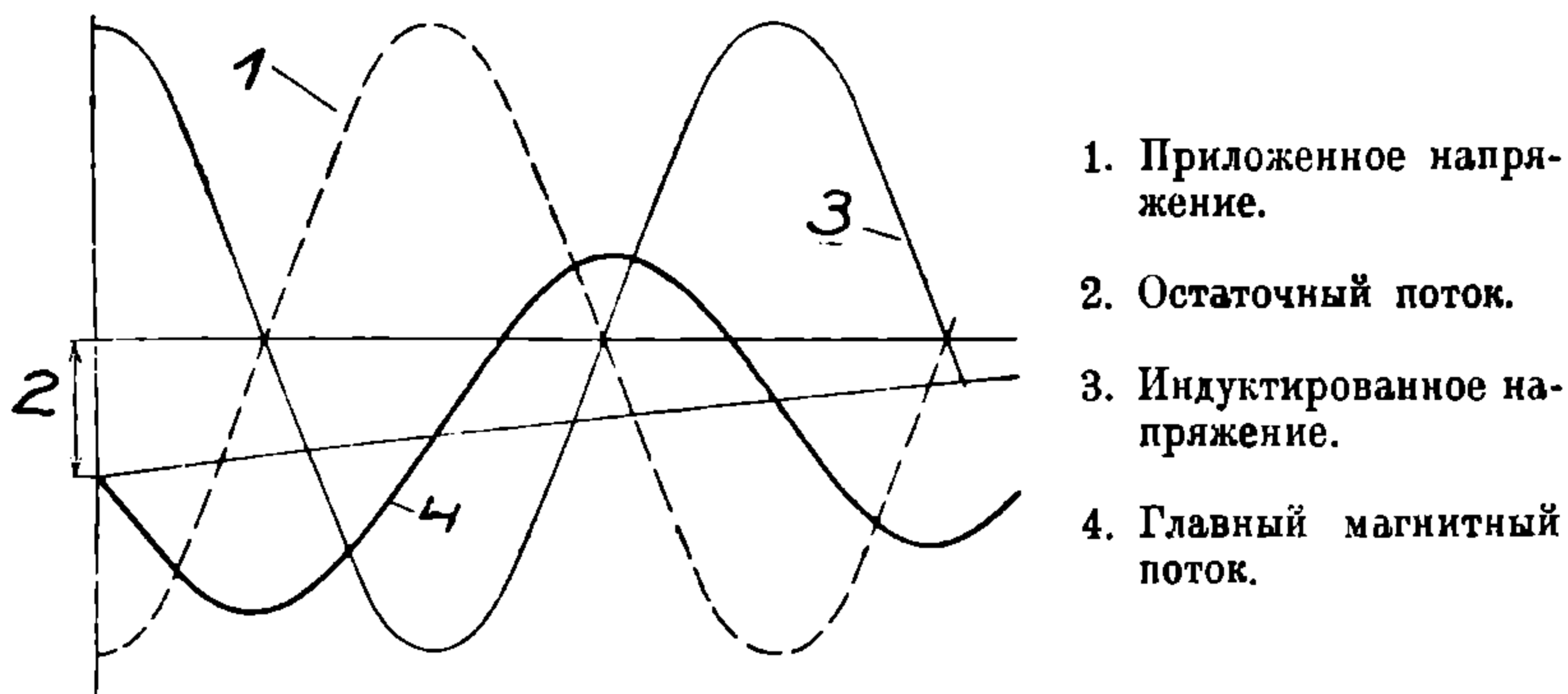
Приложенное напряжение должно в любой момент уравновешиваться противодействующим напряжением, индуктированным в первичной обмотке магнитным потоком. Это противодействующее напря-

жение должно иметь нулевое значение в начальный момент включения и в продолжение первой четверти периода стремиться к своему отрицательному максимальному значению. Магнитный поток, индуктирующий это напряжение, должен опережать последнее на четверть периода, т.е. он должен иметь в момент включения отрицательное максимальное значение и в продолжение первой четверти стремиться к нулю.

В момент включения отсутствует какой-либо поток, кроме потока от остаточного магнетизма. Направление этого потока зависит от случайных причин, а потому может оказаться и противоположно направленным.

Тем не менее изменение магнитного потока во времени строго определяется требованиями электрического равновесия. Для этого равновесия величина магнитного потока в момент включения играет меньшую роль, чем скорость возрастания магнитного потока. Таким образом единственно мыслимая картина этого явления изображена на фиг. 65.

Пренебрегая остаточным магнетизмом мы получим более простую картину фиг. 66, из которой видно, что вkerne мы имеем дело с удвоенной индукцией. Остаточный же магнетизм, в худшем случае, может довести индукцию до величины втрое большей, чем индукция при нормальной работе.



Фиг. 68.

Отсюда мы видим, что намагничивающий ток может сильно увеличиться. Уже двойной индукции соответствует увеличение необходимого намагничивающего тока, могущее вызвать большие осложнения. Намагничивающий ток должен создать соответствующую величину магнитного потока, в противном случае нарушится электрическое равновесие.

Легко убедиться в том, что случай может здесь сыграть крупную роль, так как мыслимы включения в различные моменты вплоть до максимального мгновенного значения напряжения. Разумеется в этом случае и индуктированное противодействующее напряжение первичной обмотки должно иметь максимальное значение. Ясно, что магнитный поток в момент включения будет проходить через нулевое значение.

Если остаточный магнетизм отсутствует, то перед нами картина длительной работы (фиг. 67). Магнитная индукция достигает своих нормальных значений, а намагничивающий ток, как это ему и свойственно, становится незначительным.

И в этом случае остаточный магнетизм может оказаться вредным. Он вызывает колебание потока на величину отличную от нуля. В невыгодном случае индукция может достигнуть двойной величины в сравнении с индукцией при нормальной работе (фиг. 63).

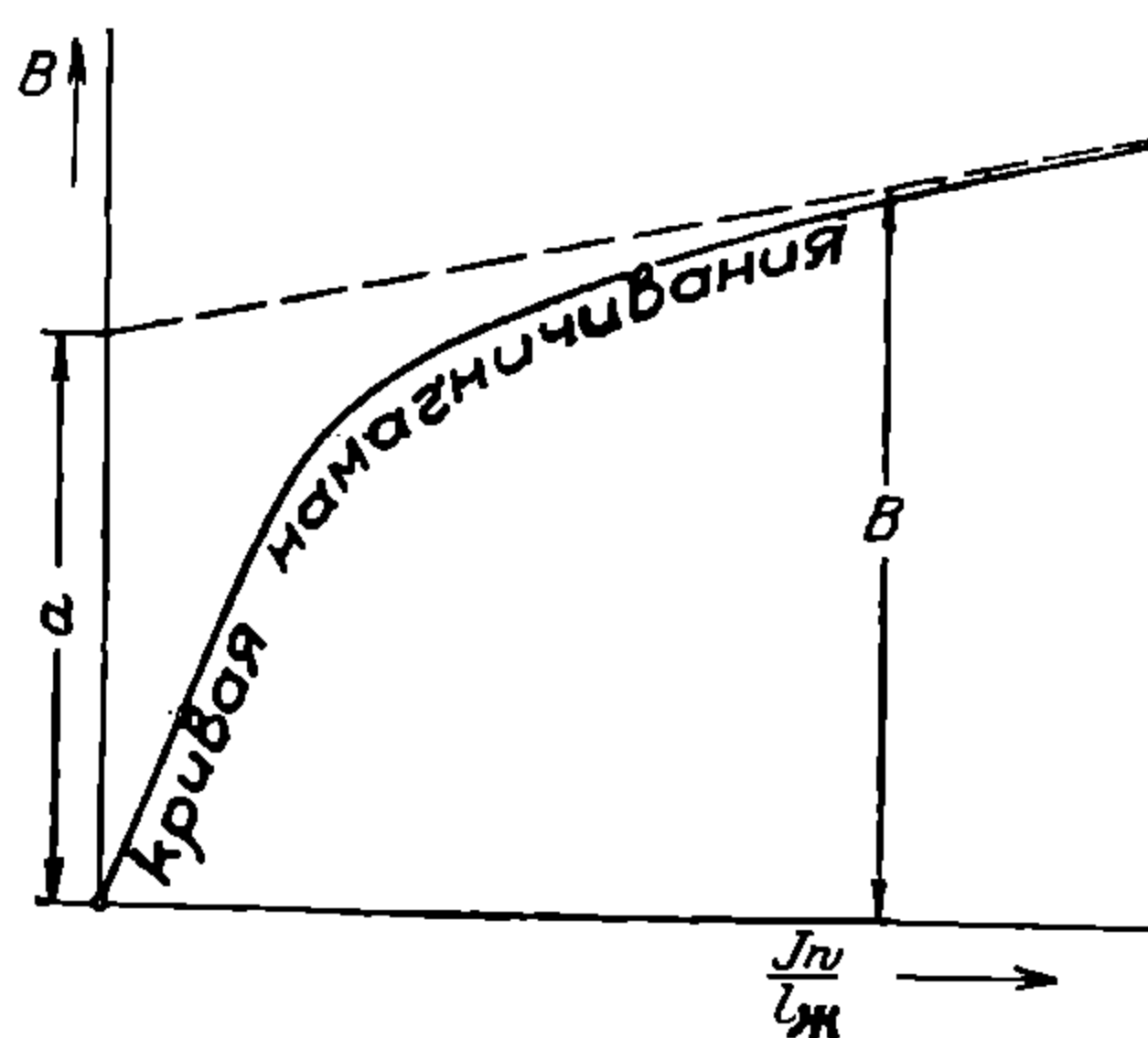
НТБ
ДНУЗТ

Явление включения тока было бы чрезвычайно вредным, если бы на помощь не приходило до сих пор не учтенное нами омическое сопротивление первичной обмотки. Последнее не играет никакой роли до тех пор, пока намагничивающий ток находится в рамках своих нормальных значений. Влияние омического сопротивления еще невелико и тогда, когда намагничивающий ток достигает величины тока полной нагрузки. Однако оно становится существенным в том случае, когда ток включения принимает угрожающие размеры 10 и даже 50-кратной величины тока при полной нагрузке.

50. РАСЧЕТ ТОКА ВКЛЮЧЕНИЯ.

Проблему включения нелегко выразить математическим языком. Намагничивающий ток совпадает по фазе с им созданным магнитным потоком, однако он не пропорционален последнему. Кривая намагничивания железа вносит большие осложнения даже и в неточные расчеты.

Возможно конечно в отдельных случаях подсчитать максимальное значение тока включения, приняв во внимание омическое сопротивление первичной обмотки. После некоторых попыток можно будет достигнуть приблизительных результатов. Однако суть проблемы чрезмерных токов заключается не только в исследовании явления при максимальном значении тока включения. Что это явление опасно — ясно без особых расчетов. Гораздо существенней — затухание чрезмерного тока, иначе говоря явление в своей длительности. Ток включения не должен вносить изменений в достигнутые результаты проблемы короткого замыкания.



Фиг. 69.

При исследовании проблемы включения недостаточно лишь знать, что в невыгодном случае наряду с нормальным магнитным потоком может возникнуть еще и постоянный поток двойной величины. Явление осложняется здесь магнитной проницаемостью железа. Мгновенный суммарный магнитный поток определяет величину этой проницаемости, а тем самым и мгновенное значение намагничивающего тока.

Придется удовлетвориться приближенным расчетом.

Для большей надежности будем производить расчет по самым невыгодным значениям остаточного магнетизма.

При этом кривую намагничивания можно заменить прямой (фиг. 69), дающей весьма простую зависимость индукции

$$B \left(\frac{\text{индукц. линии}}{\text{см}^2} \right)$$

от намагничивающих ампервитков lw и длины $l_{ж}$ [см] пути магнитного потока в железе

$$B = a + b \cdot \frac{Iw}{l_{ж}}$$

Не трудны и дальнейшие выводы. Спустя t секунд после включения приложенное напряжение имеет величину

$$E \sin(\alpha + \omega t),$$

где E [вольт] — максимальное значение приложенного напряжения, а угловая скорость

$$\omega = 2\pi f,$$

где f — число периодов в секунду.

Если омическое сопротивление первичной обмотки — r (ом), поперечное сечение керна — $F_{ж}$ (см²), то

$$E \sin(\alpha + \omega t) = w \cdot F_{ж} \frac{dB}{dt} 10^{-8} + Ir.$$

Это выражение справедливо для всякого мгновенного значения напряжения в момент включения, так как здесь предусмотрен угол начального момента времени α . Принимая приведенное выше приближенное уравнение для кривой намагничивания, получим

$$E \sin(\alpha + \omega t) = \frac{\omega^2 \cdot F_{ж} \cdot 10^{-8} b}{l_{ж}} \frac{dI}{dt} + Ir.$$

Если положить

$$\frac{\omega^2 \cdot F_{ж} \cdot 10^{-8}}{l_{ж}} \cdot b = L,$$

то в результате получим простое выражение

$$L \frac{dI}{dt} + Ir = E \sin(\alpha + \omega t) \quad (26)$$

Следует отметить, что при очень больших индукциях проницаемость стремится к пределу равному единице; так что для b мы имеем предельное значение

$$b = \frac{4\pi}{10}.$$

Соответственно этому L имеет характер коэффициента самоиндукции. Таким образом, если при нормальной работе для максимального значения магнитного потока проницаемость равна η , то первичная обмотка будет иметь нормальную индуктивность ηL . Это положение имеет громадное значение для оценки результатов нашего расчета.

Решение дифференциального уравнения (26) известно. Оно гласит

$$I = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} \left[e^{-\frac{r}{L} t} \cos \gamma - \cos(\gamma + \omega t) \right],$$

при чем

$$\operatorname{tg}(\gamma - \alpha) = \frac{r}{\omega L}$$

Можно ввести, хотя и не имеющий здесь практического значения, угол сдвига фаз φ между током и напряжением, соответствующий, как известно, уравнению

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{r}$$

Тогда решение выразится в следующем виде

$$I = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \varepsilon^{-\frac{r}{L} t} \sin(\alpha - \varphi) \right] \quad (27)$$

Мы видим, что ток включения распадается на переменный ток

$$I' = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

и на постоянный ток

$$I'' = - \frac{E}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\alpha - \varphi) \varepsilon^{-\frac{r}{L} t}$$

затухающий по экспоненциальной кривой, имеющей постоянную времени

$$T = \frac{L}{r}.$$

Энергия для постоянного тока подается постоянным потоком. Одновременно с постоянным током исчезает и постоянный поток и трансформатор постепенно переходит к состоянию нормальной работы.

Данные приближенного расчета тока включения следует принимать с большими предосторожностями. Не следует ни на одну минуту забывать, что L не является неизменной величиной. Одно лишь очевидно, что ток включения будет тем опаснее, чем меньше L .

Более внимательное рассмотрение фиг. 65 показывает, что малые значения α уменьшают влияние индуктивности L . Самое невыгодное значение величины силы тока мы получим при

$$\alpha = 0,$$

тогда уравнение (27) приобретет вид

$$I = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi \cdot \varepsilon^{-\frac{r}{L} t} \right] \quad (27a)$$

Кроме того легко установить, что даже в предельном случае влияние L все же не может уменьшиться настолько, чтобы величина ωL не оказалась того же порядка, что и омическое сопротивление.

Например, в трансформаторе мощностью в 100 kVA полному рабочему напряжению соответствует намагничивающий ток меньший, чем 10% от тока полной нагрузки. Однако для того, чтобы это рабочее напряжение терялось целиком в омическом сопротивлении первичной обмотки, необходим ток приблизительно в 100 раз больший тока полной нагрузки. При обычно принятых индукциях проницаемость составляет величину порядка 1 000. Если, в крайнем случае, проводимость уменьшается до единицы, тогда омическое и индуктивное сопротивление будут приблизительно равны между собой.

НТБ
ДНУЗТ

До таких крайностей дело все же не доходит. Постоянная времени для постоянного тока включения

$$T = \frac{L}{r} = \frac{\omega L}{\omega r}$$

была бы, в таком случае, настолько мала, что этот постоянный ток исчез бы уже за незначительную часть периода. Вместе с постоянным током исчез бы и постоянный магнитный поток, являющийся причиной малых значений L . Таким образом, угол сдвига фаз

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{r},$$

не может быть значительно меньше 90° .

Этим внесена определенная ясность. Максимальную величину тока включения мы получим, приблизительно, при

$$\omega t - \varphi = \frac{\pi}{2},$$

т.-е. почти по окончании первой половины периода. Он будет составлять около

$$I_{\max} = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} \left(1 + e^{-\frac{r}{L} t} \right) \text{ ампер} \quad (27b)$$

Следующий расчет покажет нам правильность вышеприведенных соображений. Ток включения, согласно уравнению (27), зависит от α . Он будет наибольшим при условии, если

$$\operatorname{tg}(\alpha - \varphi) = \frac{\cos(\omega t) - e^{-\frac{r}{L} t}}{\sin \omega t}.$$

Подставляя это значение в уравнение (27), мы получим

$$I = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} \sqrt{1 - 2e^{-\frac{r}{L} t} \cos \omega t + e^{-\frac{2r}{L} t}}$$

Максимальное значение тока окажется, приблизительно, при

$$\omega t = \pi,$$

после чего можно получить уравнение (27b). Фиг. 66 наглядно подтверждает правильность проведенного расчета.

Практически приемлемое предельное значение тока включения при

$$\omega L = r,$$

мы получим делением рабочего напряжения в эффективных вольтах на омическое сопротивление первичной обмотки, а именно

$$I_{\max} = \frac{E}{\sqrt{2} \cdot r}.$$

Это предельное значение играет вследствие своей простоты крупную роль именно для проблемы чрезмерных токов. Оно несколько велико, а потому следует пользоваться более точным выражением

$$I_{\max} = \frac{E}{r} \cdot \frac{1 + e^{-\frac{r}{L}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{r}\right)^2}} \quad (28)$$

В предыдущем параграфе был введен коэффициент самоиндукции L

$$L = \frac{w^2 F_{\text{ж}} 10^{-8}}{l_{\text{ж}}} \cdot b,$$

где: w — число витков первичной обмотки,

$F_{\text{ж}}$ — поперечное сечение железа керна [см^2],

$l_{\text{ж}}$ — длина индукционных линий в железе [см], и $b = \frac{4\pi}{10} \mu_0$, где μ_0 — проницаемость в момент включения.

Омическое сопротивление первичной обмотки удобно выразить также через число витков w следующим образом

$$r = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{w^2 l_{\text{м}}}{F_{\text{м}}} \cdot 10^{-4},$$

где: λ — проводимость меди $\left[\frac{\text{м}}{\text{мм ом}} \right]$

$l_{\text{м}}$ — средняя длина витка [см],

$F_{\text{м}}$ — суммарное сечение первичной обмотки [см^2].

Тогда получим

$$\frac{\omega L}{r} = 2 \pi f \frac{4 \pi F_{\text{ж}} \cdot F_{\text{м}}}{l_{\text{ж}} l_{\text{м}}} \mu_0 \lambda \cdot 10^{-5}$$

и

$$T = \frac{L}{r} = 4 \pi \frac{F_{\text{ж}} \cdot F_{\text{м}}}{l_{\text{ж}} \cdot l_{\text{м}}} \mu_0 \cdot \lambda \cdot 10^{-5} \quad (29)$$

Пример. Размеры трансформатора мощностью в 10 kVA приблизительно составляют

$$F_{\text{ж}} = 70 \text{ см}^2,$$

$$F_{\text{м}} = 10 \text{ см}^2,$$

$$l_{\text{ж}} = 50 \text{ см},$$

$$l_{\text{м}} = 50 \text{ см},$$

таким образом

$$\frac{\omega L}{r} = 2 \pi \cdot 50 \frac{4 \pi 70}{50} \frac{10}{50} \mu_0 \lambda \cdot 10^{-5} = 1105 \mu_0 \cdot \lambda \cdot 10$$

При

$$\lambda = 57 \quad \text{и} \quad \mu_0 = 1,$$

имеем

$$\frac{\omega L}{r} = 0,63 \quad \text{и} \quad \frac{L}{r} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

Чрезвычайно малая постоянная времени показывает, что не следует исходить из минимального значения магнитной проницаемости, тем более, что малые трансформаторы и без того работают при небольших насыщениях.

Размеры трансформатора мощностью в 16 000 kVA при 50 периодах составляют

$$\begin{aligned}F_{\text{ж}} &= 2000 \text{ см}^2, \\F_{\text{м}} &= 180 \text{ см}^2, \\l_{\text{ж}} &= 300 \text{ см}, \\l_{\text{м}} &= 250 \text{ см},\end{aligned}$$

таким образом

$$\frac{\omega L}{r} = 2 \pi \cdot 50 \frac{4 \pi \cdot 2000 \cdot 180}{300 \cdot 250} 1 \cdot 57 \cdot 10^{-5} = 3,2,$$

а постоянная времени

$$T = \frac{3,2}{2 \pi \cdot 50} = 10^{-2} \text{ сек.}$$

Мы видим, что при увеличивающейся мощности соотношения изменяются. Малый 10 kVA-й трансформатор имел омическое падение напряжения в первичной обмотке порядка 1,1%, а потому предельное значение его тока включения в

$$\frac{100 \cdot \sqrt{2} (1 + \varepsilon^{-50})}{1,1 \sqrt{1 + 0,63^2}} = 108 \text{ раз}$$

больший тока полной нагрузки.

Большой 16 000 kVA-й трансформатор имел в первичных обмотках омическое падение напряжения 0,35%.

В предельном случае включения в этом трансформаторе может возникнуть ток в

$$\frac{100 \sqrt{2}}{0,35 \sqrt{1 + 3,2^2}} (1 + \varepsilon^{-1}) = 120 \text{ раз}$$

больший тока полной нагрузки.

Считая в обоих случаях, что

$$\mu_0 = 3,$$

получим

$$\frac{100 \sqrt{2}}{1,1 \sqrt{1 + 1,89^2}} \left(1 + \varepsilon^{-\frac{5}{3}} \right) = 63\text{-кратный}$$

и

$$\frac{100 \sqrt{2}}{0,35 \sqrt{1 + 9,6^2}} \left(1 + \varepsilon^{-\frac{1}{3}} \right) = 72\text{-кратный}$$

тока полной нагрузки.

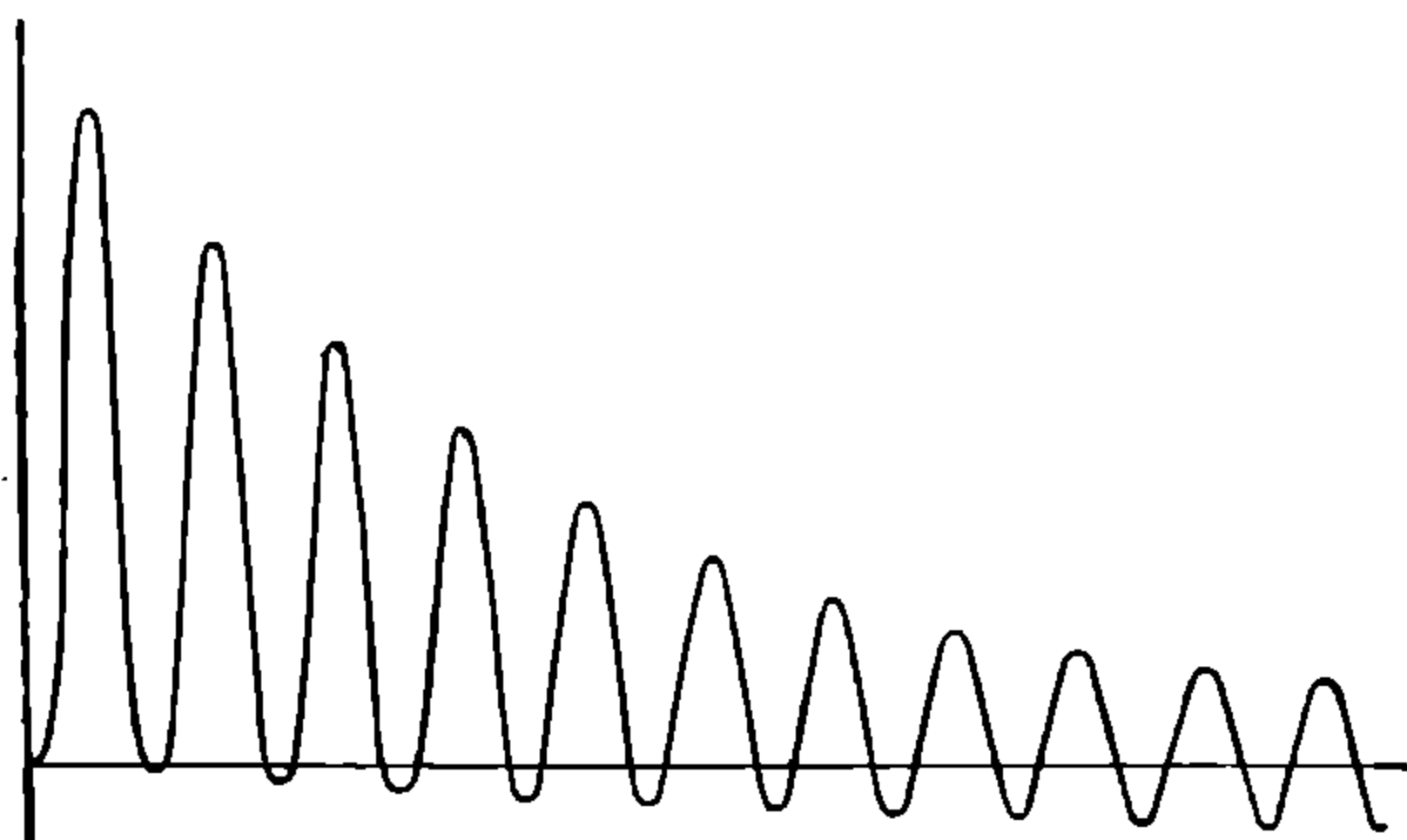
Числовой пример показывает, что ток включения как при малых, так и больших мощностях может принять большие размеры. При этом, однако, будет наблюдаться существенная разница. При больших мощностях постоянный ток включения сказывается сильнее. Он исчезает тем медленнее, чем мощнее трансформатор.

Это положение подтверждается уравнением (28). Постоянная времени затухания прямо пропорциональна произведению обоих поперечных сечений и обратно пропорциональна произведению обеих длин. Если увеличить все размеры трансформатора в x раз, сохранив неизменными нагрузку в железе и меди, то, как известно, мощность увеличится

в x^4 раза, а постоянная времени тока включения в x^2 раза. Таким образом в типовом ряде постоянная времени постоянного тока включения возрастает пропорционально корню квадратному из мощности.

Несмотря на это, даже в мощных трансформаторах постоянный ток включения затухает очень быстро, а именно спустя несколько периодов. Вместе с его затуханием исчезают и все связанные с ним затруднения, так как магнитная проницаемость, вследствие исчезновения магнитного потока, достигает своей нормальной величины. И переменный ток включения уменьшается до величины намагничивающего тока в весьма короткое время (хотя и не так быстро, как постоянный ток)

Небольшие остатки постоянного потока включения требуют еще относительно больших значений намагничивающего тока. Поэтому затухание переменного тока включения заметно дольше затухания постоянного тока включения. Природа намагниченного железа такова, что получают большие токи включения лишь в продолжение первого периода. По этим же причинам колебания тока, почти за все время явления при включении, расположены над осью абсцисс (осью времен) (фиг. 70).



Фиг. 70.



Фиг. 71.

Ток включения может значительно превысить ток короткого замыкания. Однако этот факт несущественен. Никаких механических явлений ток включения вызвать не может, так как при нем отсутствует ток в другой обмотке. Значительно большую роль играет то обстоятельство, что большая сила тока возникает лишь в первый период. Защиты от чрезмерных токов, предусмотренной для короткого замыкания, достаточно и для тока включения.

Небольшая длительность явлений при включении имеет свои отрицательные стороны. Большая сила тока, свойственная первому периоду после включения, не может повредить трансформатора, но она безусловно будет плавить предохранители. опыты показали, что большие силы тока выключаются плавкими предохранителями в тысячные доли секунды. Таким образом включение в сеть небольшого трансформатора, защищенного лишь плавкими предохранителями, будет сопряжено с большими трудностями.

В этом — глубокая разница между коротким замыканием и включением. При коротком замыкании плавление предохранителя желательное, при включении — нежелательное. Автомат был бы здесь более приемлем, чем плавкий предохранитель, но для малых трансформаторов он слишком дорог.

51. ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКА ВКЛЮЧЕНИЯ.

Как выяснено в предыдущем параграфе, достаточной защитой от тока включения является автоматический выключатель с выдержкой времени, предусмотренный для тока короткого замыкания. Однако основные трудности в том, что величина тока включения трудно поддается расчету. К тому же нередки и случаи совпадения тока включения с током короткого замыкания.

Подобные случаи включения на коротко замкнутую сеть в действительности очень часты. Зачастую дежурный не может сразу понять причину выскакивания автомата. Он его включает вновь.

Явление включения трансформатора, находящегося под нагрузкой, не вносит ничего нового. И в этом случае электрическое равновесие в первичной обмотке требует тех же изменений магнитного потока, а тем самым и возрастания намагничивающего тока. Кроме того должен в магнитном отношении уравниваться вторичный ток нагрузки, для чего потребуются соответствующий первичный ток.

Ток короткого замыкания и ток включения перекрывают друг друга. Это дает значительные суммарные токи в первый период после включения. Ток включения приобретает при этом особое значение, а потому вполне естественно стремление понизить его величину специальными приспособлениями.

Уравнение (28) указывает правильный путь решения этого вопроса. Ясно, что уменьшение величины тока включения можно достигнуть увеличением омического сопротивления первичной обмотки. Это добавочное сопротивление не должно находиться все время под током. Оно должно быть удалено тотчас же после исчезновения явлений, вызываемых включением.

Добавочное омическое сопротивление уменьшает непосредственно не только ток включения, но и постоянную времени постоянного тока включения. Для того, чтобы оказаться практически пригодным, это сопротивление должно быть того же порядка, что и кажущееся сопротивление при включении первичной обмотки. Для этого достаточно выбрать его от 4 до 5 раз больше полного сопротивления первичной обмотки.

Требование об удалении добавочного сопротивления тотчас же после включения трансформатора — легко выполнимо. Надо снабдить выключатель, присоединяющий трансформатор к сети, добавочными контактами, как это указано на фиг 71.

Добавочное сопротивление не должно иметь большого поперечного сечения. При данной длине l проводника сопротивление, как известно, обратно пропорционально поперечному сечению. Ток включения обратно пропорционален сопротивлению. Джоулево тепло таким образом увеличивается с увеличением сечения.

Существует еще один менее удобный способ для ограничения тока включения. Этот способ заключается в изменении величины напряжения при включении. Уменьшая напряжение, мы уменьшаем и силу тока, при чем последнее будет происходить быстрее первого, вследствие быстрого увеличения магнитной проницаемости железа.

Таким образом, защитой от чрезмерных токов при включении может быть также ступенчатый выключатель, подводящий по частям рабочее напряжение к зажимам трансформатора. Этот выключатель сложнее выключателя с добавочным сопротивлением.

НТБ
ДНУЗТ

Затруднения при включении мешают нормальной эксплуатации, особенно в маломощных трансформаторных станциях, работающих без автоматических выключателей. Плавкие предохранители высокого напряжения не дешевы и плавление их при включении нежелательно. Условия включения могут ухудшиться еще и тем, что начальный момент может оказаться невыгодным при нескольких последовательных включениях.

Маломощные трансформаторы должны поэтому иметь небольшие насыщения в железе.

52. ТОК ВЫКЛЮЧЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ.

После ознакомления с особенностями самых больших чрезмерных токов не трудно подвергнуть анализу и самую проблему чрезмерных токов.

Не рассматривая условий нормальной работы, которой также свойственны толчки тока, можно заключить, на основании исследования явлений при коротком замыкании и включении, что чрезмерные токи должны быть выключены лишь по истечении некоторого времени, и что эта выдержка времени должна длиться не более нескольких секунд.

За эти несколько секунд трансформатор может без вреда выдерживать короткое замыкание, для исчезновения же явлений, свойственных включению, этого времени также вполне достаточно. Возникает еще и дополнительный вопрос о том, насколько такая вынужденная выдержка времени приемлема при нормальной работе. С решением этого вопроса исчерпывается и проблема чрезмерных токов.

Решив вопрос о выдержке времени автомата, можно установить (предполагается независимая выдержка времени) ток выключения согласно потребностям эксплуатации. Во всяком случае ток выключения должен быть значительно меньше тока короткого замыкания.

Можно легко обнаружить, что определение тока выключения сопряжено с некоторыми трудностями. Автоматический выключатель действует лишь при токах, превосходящих ток выключения. Меньшие и даже незначительно меньшие токи могут и не выключить автомата, подвергая трансформатор длительной перегрузке.

Из этого следует вывод, что ток выключения не должен значительно отклоняться от тока полной нагрузки трансформатора. Однако выполнение такого простого с виду требования ведет к недопустимым условиям эксплуатации.

Совершенно неизбежный толчок тока появляется при каждом включении новой замкнутой цепи, нового потребителя, новой нагрузки трансформатора. Как известно, следует рассчитывать по двойному току. В большинстве случаев такой чрезмерный ток быстро затухает, однако он может быть еще значительным и по истечении времени выключения.

Эти токи перегрузки все же менее вредны чем пусковые токи в моторах. И в моторах мы имеем дело с быстро затухающими, а потому сравнительно безопасными токами включения. Пусковые же токи, хотя и ослабляются пусковыми реостатами, все же являются чрезмерными токами. Вращающиеся массы при пуске должны получить соответствующие скорости.

Время пуска не исчерпывается ни 2, ни 6 секундами. Невозможно уложить это время в рамки времени соответствующего явлению короткого замыкания. Таким образом остается единственный выход, при котором ток выключения трансформатора, питающего мотор, устанавливается выше тока полной нагрузки.

Этим вопрос не исчерпывается. И уже вращающийся мотор подвергается опасности от чрезмерных токов. Он не должен «сдавать» при некотором увеличении механической нагрузки сверх нормального. Иначе говоря он должен быть в состоянии развить, по меньшей мере, двойной вращающий момент. Приспособляемость мотора к быстро проходящим, но все же длящимся несколько секунд, перегрузкам не должна быть уничтожена работой автоматического выключателя трансформатора. Таким образом вопрос снова сводится к установлению токов выключения, превосходящих ток полной нагрузки.

Каждый эксплуатационный инженер может убедиться из собственного опыта, что работа при автоматическом выключателе, установленном на ток полной нагрузки трансформатора, немыслима. При такой установке неизбежны частые перерывы в эксплуатации. Поэтому эксплуатационный инженер устанавливает автомат на больший ток выключения, руководствуясь при этом лишь стремлением к спокойной и бесперебойной эксплуатации.

На деле каждый трансформатор имеет свой определенный, единственно правильный ток выключения, вернее определенное отношение тока автоматического выключения к номинальному току. Это отношение зависит исключительно от потребителей, присоединенных ко вторичной сети. Оно изменяется при каждом изменении и каждом расширении круга потребителей и, в первую очередь, силовых установок.

Самым невыгодным случаем является питание одного мощного мотора. В этом случае неизбежен ток выключения, больший тока полной нагрузки приблизительно на 100%. Значительно более выгодным окажется силовая установка со многими моторами. Чем больше число моторов, тем равномернее во времени распределяются толчки тока и тем меньшую роль последние играют для питающего трансформатора.

Смешанные установки работают в еще более выгодных условиях. Чисто осветительные установки, несомненно, требуют самый меньший ток выключения. Осветительная нагрузка увеличивается такими малыми степенями, что практически не может быть и речи о чрезмерных токах.

Мощность трансформатора оказывает, конечно, большое влияние на величину тока выключения. Чем больше трансформатор, тем больше число его потребителей, тем больше вероятность равномерного распределения во времени толчков тока, каждый из которых становится относительно ничтожным.

53. ПОТРЕБНОСТЬ В АМПЕРМЕТРАХ НА ТРАНСФОРМАТОРНЫХ СТАНЦИЯХ.

Так как установлено, что ток выключения автомата в некоторых случаях доходит до величин на 100% (чаще всего на 30%) больших допустимого полного тока нагрузки, то трансформатор подвергается опасности от чрезмерных токов, от которых автоматический выключатель его как-будто не защищает.

С другой стороны, непригодны и плавкие предохранители. Чрезмерные токи неизбежны, они должны быть допущены, но не должны лишь быть длительными. Даже двойной ток полной нагрузки неопасен, если он длится лишь несколько минут. Неопасно и нагревание обмотки небольшим током перегрузки в продолжение нескольких часов. Однако необходимо, чтобы недопустимые длительные чрезмерные токи были через соответствующее время замечены.

Эта задача не может быть разрешена ни автоматическим выключателем, ни плавким предохранителем. Удовлетворительное решение мы получим лишь при помощи измерителей тока и мощности. Как ни невзыскателен трансформатор в эксплуатации, его все же не следует оставлять совершенно без наблюдения.

Для трансформаторов, расположенных непосредственно вблизи центральных станций и находящихся под постоянным наблюдением, достаточно одних амперметров. Дежурный в любой момент видит, в какой мере трансформатор нагружен. И осветительные трансформаторы, наблюдение за которыми почти отсутствует, будут довольствоваться амперметрами в случае наличия контрольных осмотров для послеобеденных и вечерних часов. Существование трансформаторных станций без измерителей тока и мощности недопустимо. Отсутствие таких существенных защитных приспособлений является сомнительной экономией.

Лучшей защитой для осветительных трансформаторов являются регистрирующие измерители тока и мощности. Они лучше всего рассказывают эксплуатационному инженеру о работе, сделанной за день трансформатором.

Для силовых трансформаторов ваттметр не является удовлетворительной защитой. Трансформатор в действительности построен не для мощности, а для определенного напряжения и определенной силы тока. Лучше поэтому применять не измеритель мощности, а измеритель тока или вольтамперметр.

Регистрирующие приборы являются и для силовых трансформаторов наилучшей аппаратурой. Только они позволяют не заботиться о бдительности дежурного. Без дежурного и регистрирующих приборов не должна быть ни одна трансформаторная станция.

Существует еще одна защита от чрезмерных токов, находящихся в пределах между током выключения и допустимым током полной нагрузки. Этой непосредственной защитой является температура масла.

Трансформатор при небольших чрезмерных токах подвергается опасности в том случае, если его нагревание начинает достигать недопустимых величин. Небольшие чрезмерные токи не могут причинить другого вреда трансформатору. Как известно, необходимо известное время для того, чтобы «насытить» масло теплом, прежде чем нагревание трансформатора станет недопустимым. Температуру масла нетрудно измерить. Для этого достаточно обыкновенный термометр погрузить в масло.

В крупных трансформаторах предусмотрены термометры для масла. Они являются хорошими аппаратами защиты от чрезмерных токов и даже лучшими, чем амперметры. По их показаниям можно судить о качестве масляной ванны и о всей охлаждающей установке трансформатора.

Поднимающийся столбик ртути в термометре на известной высоте может образовать вспомогательную замкнутую цепь. Ток в этой цепи может быть использован для сигнализационных целей или для выключения автомата, или для одного и другого одновременно.

Нетрудно заметить, что и термометр должен действовать лишь при температуре выключения большей, чем допустимая нормальная температура. Однако эта разница может быть значительно меньше разницы между током выключения и током полной нагрузки, так как масляная ванна в смысле нагревания следует за нагрузкой медленно.

Неудивительно, что аварии встречаются чаще у малых трансформаторов, чем у мощных. Без дежурного, без амперметра, без термометра

для масла, следовательно и без всякого наблюдения они безжалостно подвергаются случайностям эксплуатации. Так как, вдобавок для малых трансформаторов автоматический выключатель оказывается дорогим прибором, и вся защита трансформатора сводится к предохранителям высокого напряжения, то подобное устройство эксплуатационный инженер должен считать непригодным.

Важной задачей учения об эксплуатации является требование хорошей защиты также и для маломощных трансформаторов. Несомненно экономически выгоднее правильно защитить трансформатор, чем подвергать его частому ремонту. Нельзя отрицать того, что малый трансформатор подвергается большим опасностям, чем мощный. Хотя бы по одной этой причине его следовало бы защитить, по меньшей мере, не хуже мощного.

К сожалению даже и в хорошо обслуживаемых предприятиях малые трансформаторы продолжают пребывать без должной защиты от чрезмерных токов. В этом отношении в самом худшем положении находятся мачтовые трансформаторы. Однако, зная заранее тяжелые условия работы этих трансформаторов, конструктор будет строить их с достаточным запасом. В нормальных же малых трансформаторах из-за стремления к удешевлению конструкции он вынужден полностью использовать материал, что вызывает необходимость хорошей защиты от чрезмерных токов.

54. ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ.

Плавкий предохранитель, как показало исследование явлений при включении оказался неудовлетворительным. Он не плавится лишь при умеренных токах включения, что мыслимо только при малых индукциях до $10\,000 \frac{\text{индукц. линий}}{\text{см}^2}$ в керне.

С такими незначительными индукциями можно без излишней траты материала строить лишь малые трансформаторы. Таким образом область применения плавкого предохранителя ограничена малыми мощностями и не превышает 30 kVA . Кроме того при малых мощностях автоматический выключатель становится относительно дороже, и поэтому эксплуатационный инженер охотно заменяет его более дешевым плавким предохранителем.

Плавкий предохранитель, собственно говоря, является автоматическим выключателем с зависимой выдержкой времени. Эту зависимость выдержки времени от величины тока выключения легко установить. Полезно рассмотреть ее подробнее.

Плавающий провод предохранителя имеет определенные сечения и длину. Он содержит определенное количество металла и имеет определенное сопротивление. Это количество металла обладает способностью поглощать определенное количество тепла. При больших токах нагрузки такая способность является единственным фактором, определяющим повышение температуры, вызванное подведением тепла.

Плавкий проводник требует определенного количества теплоты для своего плавления. Время плавления будет обратно пропорционально количеству подведенной теплоты. Следовательно, время плавления (соответствующее выдержке времени) при больших чрезмерных токах будет обратно пропорционально квадрату тока нагрузки.

Увеличение времени плавления протекает значительно быстрее уменьшения квадрата тока, так как при малых нагрузках отдача тепла.

в окружающую среду сказывается очень сильно. При еще допустимом токе нагрузки все тепло будет поступать в окружающую среду.

После всего сказанного понятно, что ток короткого замыкания трансформатора расплавит предохранитель в тысячные доли секунды. Столь же опасным для предохранителя является и ток включения. Небольшие чрезмерные токи потребуют минуту и больше для плавления предохранителя.

Зависимость времени плавления предохранителя от силы тока не является его отрицательным свойством. Эта зависимость очень хорошо предохраняет обмотку от сгорания. Однако эта связь между величиной нагрузки и ее длительностью представляет собою также и недостаток не для самого трансформатора, а для эксплуатации. Автоматические выключатели с зависимой выдержкой времени вышли из употребления по этим же соображениям.

Вообще время выключения должно увеличиваться по мере приближения от периферийных частей распределительной сети к центральной станции. Проблема чрезмерных токов трансформатора должна отступить на задний план перед требованиями селективной защиты электрической сети. Также и по этой причине плавкий предохранитель недопустим при относительно больших мощностях.

Плавкий предохранитель имеет еще один большой недостаток. Предохранитель плавится при больших значениях тока, а именно при больших мгновенных значениях тока нагрузки. При этом в одно мгновение разрывается замкнутая цепь, в которой запасено большое количество магнитной энергии. Плавление предохранителя вызывает явления нестационарного характера, которые должны быть по возможности ослаблены.

При масляном выключателе эти явления отсутствуют. В следующей главе, посвященной проблеме перенапряжений, будет попутно выяснено различие между плавким предохранителем и автоматическим масляным выключателем.

VI. Перенапряжения.

55. ПРОБЛЕМА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ.

Чрезмерные токи представляются эксплуатационному инженеру менее опасными, чем перенапряжения. С точки зрения как эксплуатационного инженера, так и конструктора проблема перенапряжения существеннее и труднее проблемы чрезмерных токов. От последних трансформатор можно удовлетворительно защитить. Исключение составляют лишь чрезмерные токи в короткозамкнутых витках. От перенапряжений удовлетворительной защиты пока нет.

Причину значительных трудностей проблемы перенапряжения легко выявить. Чрезмерные токи возникают в самой установке и зависят от количества энергии в самой установке. Перенапряжения же лишь частично зависят от процессов в сети и в машинах. Они главным образом возникают от внешних причин. Магнитные поля в наших электрических установках являются исключительной принадлежностью последних, тогда как электрические поля благодаря полю земли представляют собой устойчивое и опасное природное явление.

Электрическое поле земли, в котором расположены все наши установки, трудно было преодолевать тогда, когда установки были еще незначительными. Поле земли перекрывало своими колебаниями все внутренние нестационарные процессы. По мере увеличения рабочего напряжения соотношения изменялись в пользу установки, и влияние поля земли уменьшилось. Однако последнее продолжает оставаться весьма сильным фактором, превращающим проблему перенапряжения в главную проблему трансформатора.

Однако не только в этом заключаются трудности проблемы перенапряжения. Как ни опасно поле земли, как бы неопределенно оно ни возрастало, его все же можно преодолеть. Волны напряжения, возникшие вследствие процесса включения (или выключения), аварии или же атмосферных явлений, поддаются до известных пределов ограничению, а следовательно и расчету. Однако до последнего времени все расчетные данные не подтверждались последующими измерениями.

В этом заключалась действительная трудность проблемы перенапряжения. Теория блуждающих волн чрезвычайно сложна. Она особенно осложнилась с тех пор, как при анализе явлений стали учитывать и собственные колебания в обмотках машины, а также и в аппаратах защиты от перенапряжения. Эти колебания затухают в чрезвычайно короткий промежуток времени; 100 000 периодов в секунду и больше для этих колебаний не являются необыкновенными. При такой растущей трудности теории волн возрасла и потребность в постановке соответствующих опытов.

Для этой цели мы пользуемся теперь собственно давно известным способом измерения. При помощи катодного осциллографа мы можем проследить чрезвычайно быстрые колебания перенапряжения и таким образом выяснить какие явления будут играть главную роль при защите от перенапряжений.

ИНТЬ
ДНУЗТ

Мы постепенно приближаемся к удовлетворительному разрешению вопроса о защите от перенапряжений. Давно пора. В последние годы в районных сетях происходили многочисленные случаи пробиваний трансформаторов. Предприятия зачастую останавливаются и терпят убыток лишь из-за недостаточной защиты от перенапряжений. Для трансформатора устанавливаются все более и более жесткие нормы безопасности. При этом конструктор не может полагаться на удовлетворительное строение защитных аппаратов, что ставит его перед неразрешимыми проблемами.

На многих предприятиях опыты с защитными дроссельными катушками этими единственными защитными приспособлениями против набегающих волн, оказались настолько неудачными, что их попросту изъяли из обращения. Одного этого однако недостаточно.

Опыт с дросселями является наглядным доказательством того, что неудовлетворительная теория перенапряжения может больше повредить делу, чем помочь ему. Для того чтобы теория могла быть признана удовлетворительной, необходимо, чтобы ее выводы оправдались при опытных измерениях.

Учение об эксплуатации должно взять под свою защиту конструктора, не имеющего возможности строить трансформаторы, которые не нуждались бы в защите от перенапряжений. Оно должно разъяснить эксплуатационному инженеру, оно должно указать ему правильный путь, ведущий одновременно как к нормальной эксплуатации, так и к недорогим конструкциям.

Эксплуатационные инженеры часто обнаруживают свою полную беспомощность в этом вопросе. Они уделяют весьма малое внимание вопросам защиты своих трансформаторных станций, так как из горького опыта убедились в нецелесообразности расходов на защитные приспособления. Такое положение вещей ненормально; оно должно измениться, в противном случае конструктор и эксплуатационный инженер никогда не придут к соглашению.

56. БЛУЖДАЮЩИЕ ВОЛНЫ И ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЕ.

Каждый проводник в электрической установке, как например провод сети или обмотка трансформатора, имеет определенное напряжение относительно соседних проводников, а следовательно и земли. Напряжение между двумя соседними проводниками немислимо без некоторого количества электричества на каждом из них. Последнее зависит от емкости системы, состоящей из двух проводников и разделяющего их диэлектрика.

В состоянии равновесия накопленные количества электричества, связанные благодаря наличию напряжения, образуют электрическое поле, силовые линии которого проходят от одного проводника к другому (фиг. 72). Это электрическое поле является таким же носителем известного количества энергии, как и магнитное поле.

Пусть Q [кулон] — связанное количество электричества, E — напряжение [вольт], C — емкость между проводами, тогда мы имеем

$$Q = C \cdot E$$

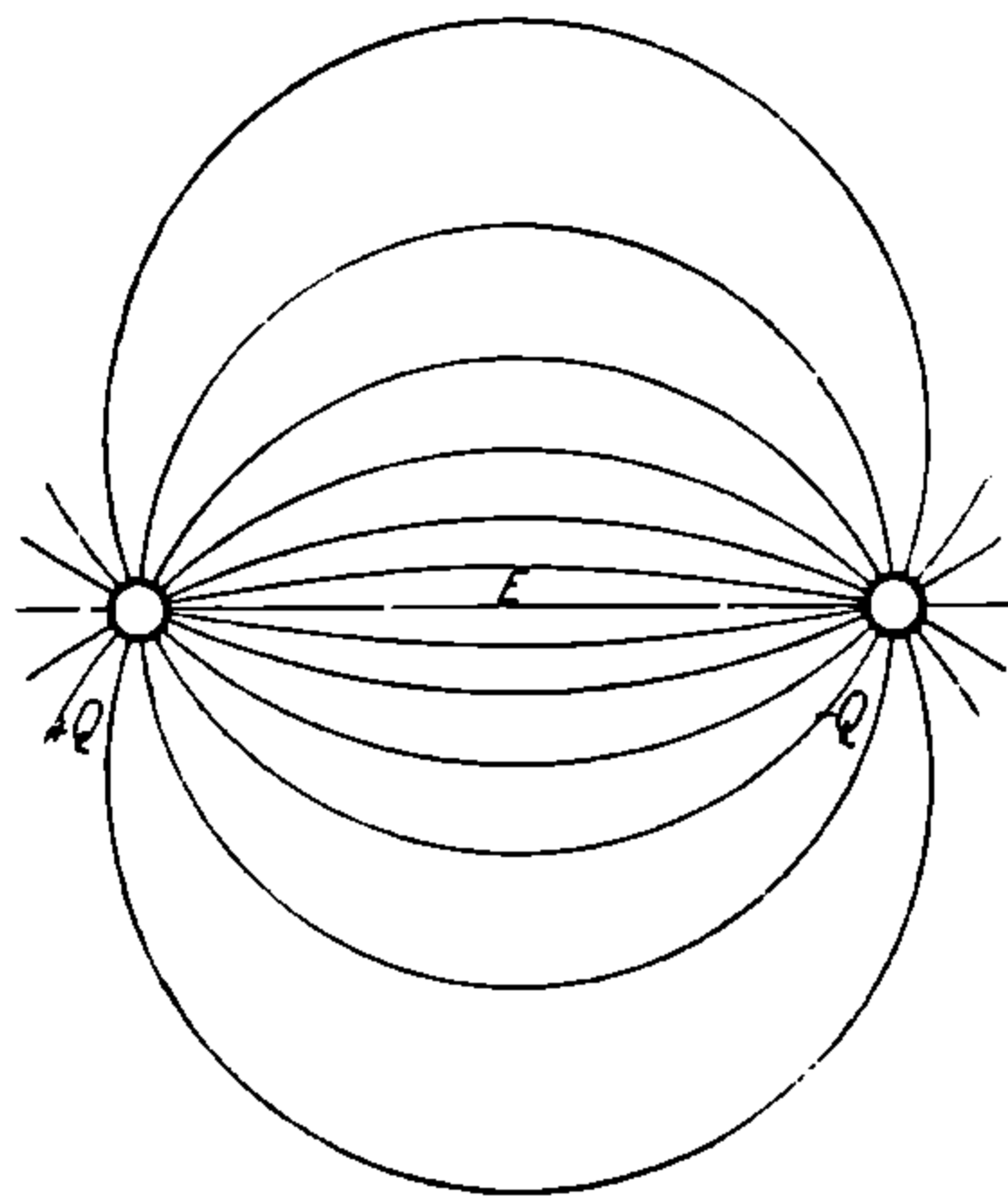
и энергия электрического поля будет равна

$$\frac{CE^2}{2} \text{ ватт—сек.}$$

В установках переменного тока напряжение непрерывно колеблется, а вместе с ним колеблется и количество электричества. Происходит непрерывное прибывание и убывание электричества. Это так называемые емкостные токи установки. Электрическая энергия также подвержена тем же колебаниям, что и магнитная энергия.

Эти колебания это прибывание и убывание освобождающихся количеств электричества и энергии представляют собою вполне естественное и неопасное явление. Оно неразрывно связано с природой переменных токов и переменных напряжений. Оно протекает плавно по закону синусоиды в промежутки времени, весьма малые с точки зрения наших восприятий, но относительно большие в сравнении с промежутками времени нежелательных колебаний, образующих перенапряжения.

Трудно представить себе установку, в которой соотношения между напряжениями остались бы неизменными во всех частях, или сеть, в которой напряжения изменялись бы исключительно по закону синуса. Включения сети неизбежны, а вместе с ними неизбежно и изменение



Фиг. 72.

напряжений. Перед включением в трансформаторе напряжение отсутствует. Актом включения мы внезапно подводим к нему напряжение. Провод длинной линии замыкается на землю. В месте замыкания исчезает существовавшее до этого напряжение относительно земли.

Внезапные изменения напряжений вызывают и внезапные изменения количеств электричества, находившихся раньше в связанном состоянии. В сети происходит непрерывное освобождение количеств электричества, распространяющихся во все стороны со скоростью света. Присутствие этих излишков в том месте, где совершаются изменения напряжения, становится невозможным. Но они нежелательны, конечно, и там, куда они устремляются, ибо являются причиной перенапряжений. И не только повышение напряжения делает эти освободившиеся количества электричества опасными. Так как они стали излишними после наступившего изменения в состоянии сети, то происходит их непрерывное перемещение от одного конца сети к другому. Они вызывают колебания во всех имеющихся колебательных контурах. Они повсюду возвращаются через определенные промежутки времени, так что возможны явления резонанса.

Процессы включения и выключения, заземление, короткие замыкания и, наконец, нередко и атмосферные разряды вызывают возникно-

вление блуждающих волн. При внезапном изменении поля земли вследствие грозового разряда меняется и напряжение провода относительно земли, а тем самым и связанное до того момента с проводом количество электричества.

Согласно этого обзора проблема перенапряжения распадается на две части. Первым является вопрос о величине перенапряжения. Ясно, что нельзя допустить неограниченных перенапряжений. Таким образом, первоочередной задачей защиты от перенапряжения является борьба с толчками напряжения выше определенной величины.

Второй частью проблемы перенапряжения является изучение собственных колебаний в замкнутой цепи обмотки трансформатора и в связанных с ним контурах.

Несомненно, что при всех этих исследованиях имеет большое значение в других вопросах не играющая почти никакой роли емкость обмотки. От этой емкости зависит и энергия электрического поля. Она особенно существенна потому, что определяет число собственных колебаний контура обмотки.

Последующие исследования возможны лишь при использовании давно известных данных теории блуждающих волн. Эти данные, конечно, частично выходят из рамок трансформаторостроения. Оно и понятно, ибо опасность в этом случае приходит извне. Но конструктор должен знать, что собственно происходит вне трансформатора в сети.

57. НАРУШЕНИЯ ПОЛЯ ЗЕМЛИ. ЗАЗЕМЛИТЕЛИ.

Летние месяцы — трудное время для эксплуатационного инженера. В эти месяцы ему приходится уделять много внимания борьбе с электрическими грозовыми разрядами.

Между поверхностью земли и тучей возникает электрическое поле. С обеих сторон накапливаются определенные количества электричества. Доказательством того, что при этом мы имеем дело с очень высокими напряжениями, является «длина» молнии.

В таком электрическом поле расположены провода передачи, приобретающие, таким образом, определенное добавочное напряжение относительно земли. Это напряжение зависит исключительно от силы поля земли и составляет часть напряжения между землей и тучей.

Если в самый момент пробоя молнией напряженность поля земли достигнет своего максимального значения, то напряжение провода относительно земли хотя и составит лишь часть всего напряжения поля, все же окажется слишком значительным для наших установок.

К счастью при наступлении грозы поле земли возрастает лишь постепенно. Напряжение проводов передачи относительно земли увеличивается постепенно, и с такой же постепенностью происходит накопление связанного электричества. Остается достаточно времени для того, чтобы это явление ограничить.

Дело, таким образом, сводится к первому пункту проблемы перенапряжения. Ясно, что не должно быть ни одной трансформаторной станции, не оборудованной приспособлениями, препятствующими возникновению слишком больших перенапряжений относительно земли в проводах, ведущих к зажимам трансформатора.

Этого можно достигнуть относительно простым путем. Если между проводом и землей непосредственно перед трансформатором поместить искровой разрядник с воздушным зазором, рассчитанным на пробивание при определенном напряжении, то возникновение в проводах на-

пряжения выше этого пробивного окажется невозможным. Особенности этих аппаратов, именуемых еще роговыми разрядниками, известна. В небольших установках такой разрядник выведен вследствие своей дешевизны. В подобных установках его нередко можно встретить.

Излишне говорить о том, что воздушный зазор в разряднике должен быть рассчитан на напряжения несравненно более высокие, чем напряжение трансформатора относительно земли, т. е. фазовое напряжение. При заземлении одной фазы в установке высокого напряжения, как известно, напряжение обеих других фаз относительно земли возрастает до величины междуфазового напряжения. Поэтому минимальную величину зазора устанавливают с расчетом на пробивание при двойном фазовом напряжении.

Имеется еще множество других способов предохранения от влияния поля земли. Вместо ограничения напряжения можно открыть путь в землю для электричества земного поля, соединив, например, каждый провод с землей посредством большого сопротивления. Эту идею можно осуществить как жидким сопротивлением водоструйного заземлителя, так и твердым омическим или даже индуктивным сопротивлениями.

Искровой разрядник является самым простым и дешевым решением вопроса. Он как и все перечисленные приспособления имеет свои недостатки, которые будут рассмотрены впоследствии. Покончим сначала с вопросом о поле земли.

Напряжение провода относительно земли легче всего поддается наблюдению при наличии заземленного нулевого провода в сети высокого напряжения. В Европе подобное заземление не принято, а потому нулевой провод наружу не выводится. Оно заменяется заземлением нулевой точки генератора через достаточно большое сопротивление. Трансформатор же не всегда имеет доступную нулевую точку, так как очень часто приходится выбирать соединение в треугольник.

Как мы видим, влияние поля земли все же можно ослабить. Мы будем иметь дело, следовательно, с меньшими, но все же довольно значительными перенапряжениями. Такой случай аналогичен случаю с автоматическим выключателем, при котором выключения любых чрезмерных токов возможны, однако не могут быть допустимы. И заземлитель решает проблему перенапряжения лишь частично.

Чем выше рабочее напряжение установки, а значит и трансформатора, тем меньше вероятности, что вызванное полем земли перенапряжение окажется опасным. Мощный трансформатор работает обычно при высоких напряжениях. Маломощные трансформаторы, находящиеся в сетях низкого напряжения, работают в условиях более опасных, чем мощные трансформаторы. Для них разрядник играет большую роль.

Совершенно очевидно, что и сети низкого напряжения подвержены опасности от электрического поля, как и сети высокого напряжения. Разрядник поэтому необходим и со стороны низкого напряжения. Однако сети низкого напряжения имеют еще и заземленный нулевой провод. Кроме того, силовые трансформаторы расположены близко к питаемым ими моторам. Таким образом, вопрос о защите со стороны низкого напряжения очень прост.

58. ИСКРОВОЙ РАЗРЯДНИК.

Все разрядники, за исключением искрового, обладают существенным недостатком: они все время поглощают энергию. Как жидкое, так и твердое сопротивления, соединяющие провод с землей, пропускают и при нормальном напряжении ток, нагревающий эти сопротивления.

НТБ
ДНУЗТ

Искровой разрядник пропускает ток лишь в момент своего действия. Он должен отвести в землю часть электричества, связанного с электрическим полем для того, чтобы понизить напряжение относительно земли. Однако этим действие разрядника не кончается. Через его воздушный промежуток, ставший проводником, начинает проходить ток, обусловленный рабочим напряжением.

Наконец дуга разрывается в верхней части рогов разрядника. Он устроен с таким расчетом, чтобы дуга, поднимаясь под действием нагретого воздуха, при этом одновременно удлинялась. Для ограничения силы тока во время действия разрядника приходится включать последовательно с воздушным промежутком соответствующее омическое сопротивление (фиг. 73).

Это сопротивление предназначено не только для того, чтобы защитить разрядник от слишком больших токов. На него возложена еще и другая обязанность. В месте проскакивания искры исчезает имевшееся здесь напряжение. Место присоединения разрядника к рабочему проводу внезапно приобретает потенциал земли, что вызывает возникновение волны, идущей в сеть и сопровождаемой соответствующей волной в земле.

Как мы видим, борьба с перенапряжениями при помощи искрового разрядника приносит с собою новые затруднения в виде блуждающих волн. В случае отсутствия последовательно включенного сопротивления напряжение вновь возникшей блуждающей волны равно полному напряжению провода относительно земли до начала действия разрядника.

Если блуждающая волна неизбежна в момент пробивания воздушного промежутка, то надо по крайней мере стремиться к тому, чтобы она не вызывала слишком больших перенапряжений. Очень существенно уменьшить ее вредность. Вопрос о том, как это успешно выполнить, является существенной частью проблемы перенапряжения, которую мы должны здесь рассмотреть.

Собственно говоря, каждая блуждающая волна является током, проходящим по проводу на его длине, равной длине этой волны. Обратный ток проходит по тому проводу, к которому до этого были направлены силовые линии исчезнувшего электрического поля. На обоих концах блуждающей волны цепь замыкается током смещения.

Исчезновение заряда на конце перемещающейся волны, понятно, создает ток в i ампер. Вместе с исчезновением заряда исчезает и напряжение E [вольт]. Если два провода имеют на единицу длины коэффициент самоиндукции L (генри) и емкость C (фарад), то на конце волны постоянно будет возникать некоторое количество магнитной энергии

$$\frac{i^2 L}{2},$$

равное исчезающей электрической энергии

$$\frac{E^2 C}{2}.$$

Вследствие этого равенства зависимость между напряжением и током выразится следующим образом

$$E = i \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Это равенство, как известно, представляет собой «закон Ома» для блуждающих волн.

Величина

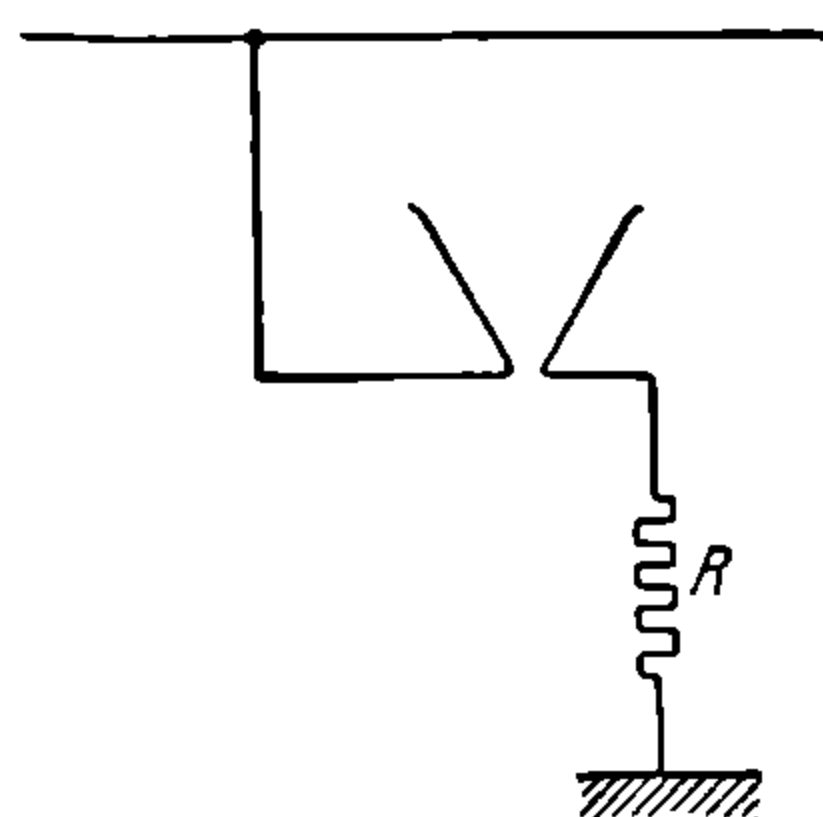
$$Z = i \sqrt{\frac{L}{C}},$$

называемая сопротивлением волны, играет роль, аналогичную роли омического сопротивления.

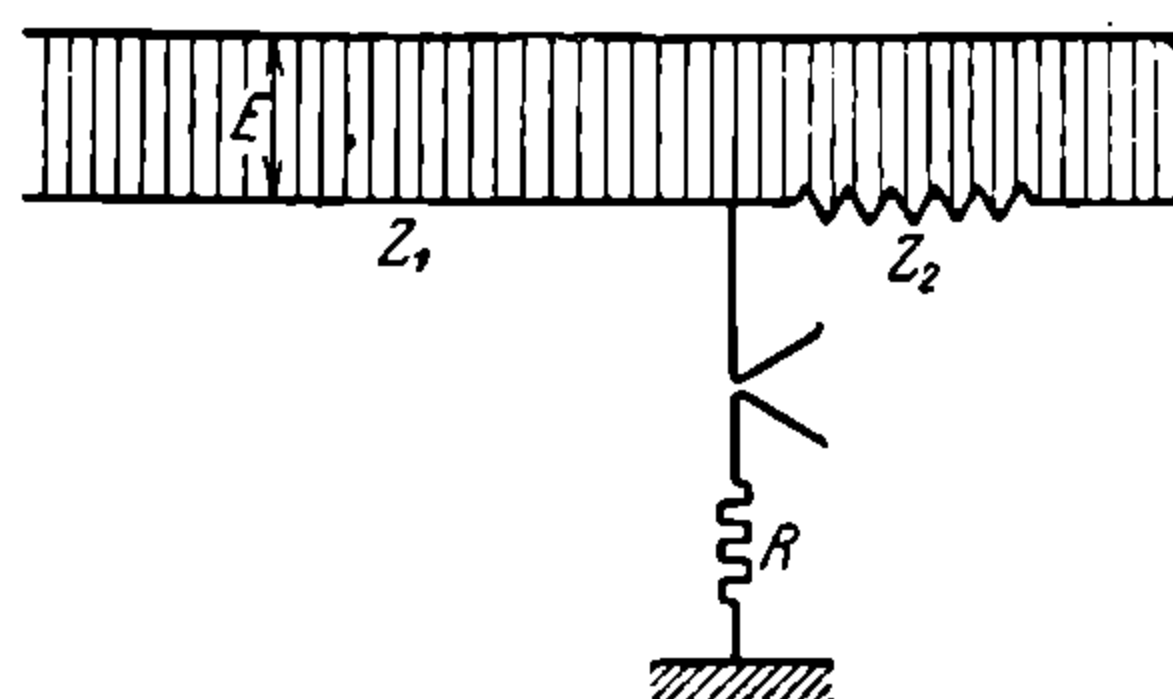
Следует отметить, что сопротивление волны в воздушных линиях передачи равно, приблизительно, 500 омам, тогда как волновое сопротивление обмоток трансформатора имеет значительно большую величину. Кабельные линии имеют сопротивление волны значительно меньшее, чем в воздушных линиях передачи.

Такими простыми средствами, вытекающими из теории блуждающих волн, разрешается вопрос об успокоительном сопротивлении разрядника.

Фиг. 74 дает схему последовательно включенных линий передачи с сопротивлением волны Z_1 и обмотки трансформатора с сопротивлением волны Z_2 до начала действия разрядника. Оба проводника находятся под напряжением E относительно земли.



Фиг. 73.



Фиг. 74.

При весьма малом успокоительном сопротивлении $R = 0$ напряжение в точке ответвления разрядника от провода передачи упадет до нуля, что в свою очередь вызовет возникновение новой блуждающей волны с полным напряжением E , которая устремится с одной стороны в обмотку и с другой — в линию передачи (фиг. 75).

По обмотке должен проходить ток волны

$$i_2 = \frac{E}{Z_2},$$

а в линии передачи —

$$i_1 = \frac{E}{Z_1}.$$

Оба эти тока должны уходить в землю.

Разрядный ток в воздушном промежутке составляет

$$i_a = i_1 + i_2 = E \cdot \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2} \cdot A.$$

При наличии успокоительного сопротивления R в нем будет теряться напряжение:

$$e_a = i_a \cdot R.$$

Это напряжение e_a относительно земли и сохранится в узловой точке фиг. 76, в начальный момент действия разрядника.

Величина же блуждающей волны, идущей в линию передачи и обмотку трансформатора, уменьшится до значения

$$e = E - e_a,$$

что можно проследить на фиг. 76.

В этом случае возникают следующие токи

$$i_2 = \frac{E - e_a}{Z_2},$$

$$i_1 = \frac{E - e_a}{Z_1},$$

а разрядный ток будет равен

$$i_a = i_1 + i_2 = (E - e_a) \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2 Z_1}.$$

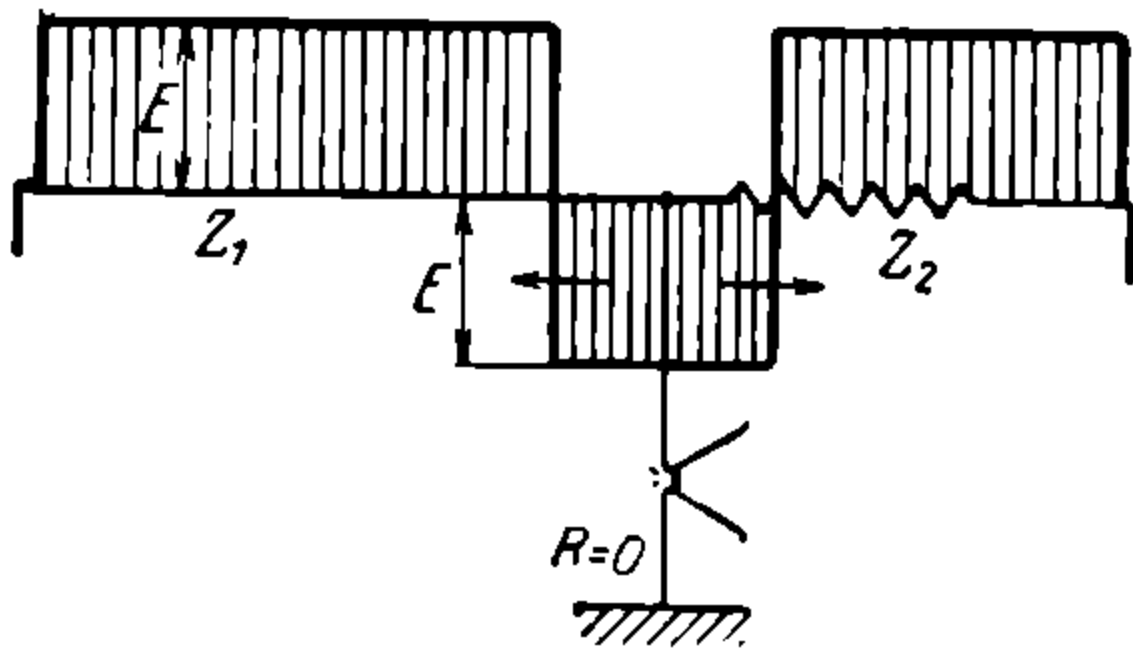
Подставляя вместо e_a его значение $R \cdot i_a$, получим, наконец

$$i_a = \frac{E}{R + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}}$$

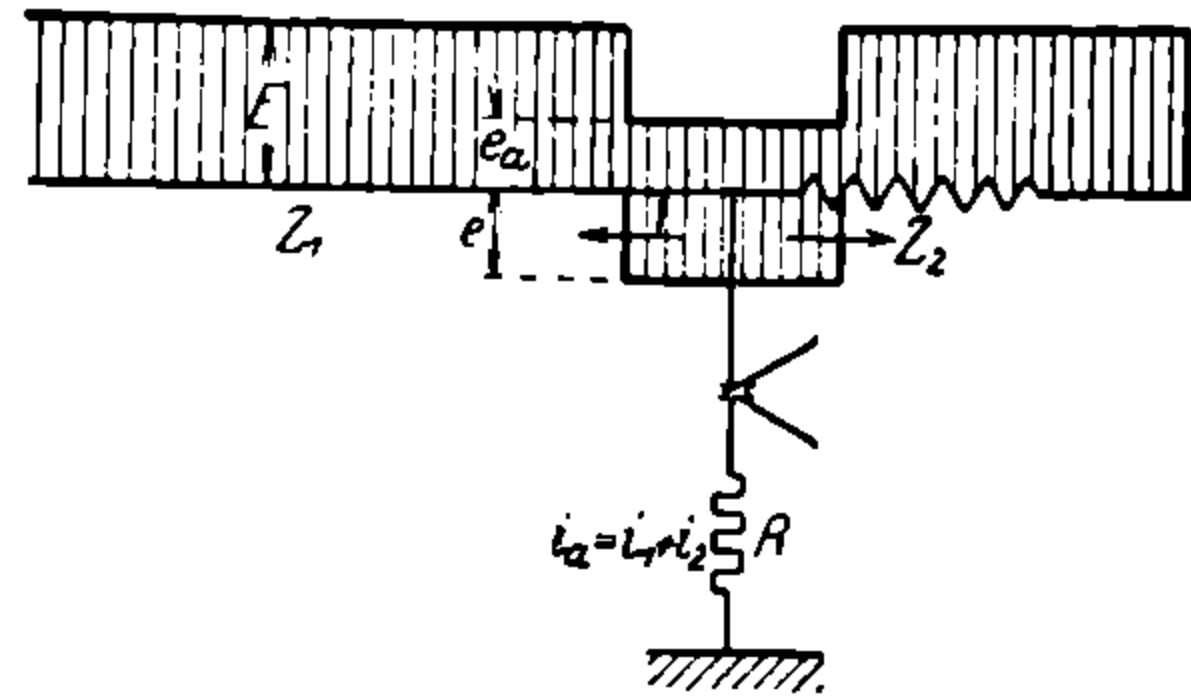
Блуждающая волна имеет напряжение

$$e = \frac{E}{1 + R \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2}}.$$

Из только что рассмотренных уравнений следует, что волну напряжения, возникающую в начальный момент действия разрядника, можно довести до сколь угодно малых значений. Чем больше сопротивление R , тем безопаснее волна. Сопротивление уменьшает и разрядный ток.



Фиг. 75.



Фиг. 76.

Но слишком большие разрядные сопротивления имеют свои недостатки. Основной задачей является отведение заряда в землю. До тех пор, пока существует дуга, увлекаемая все выше и выше вдоль рогов, будет существовать и возможность разряда линии. Но с уменьшением разрядного тока условия отвода электрических зарядов в землю, конечно, ухудшаются.

Решение проблемы следует искать между двумя необходимостями: уменьшить напряжение волны, с одной стороны, и ускорить разряд линии, с другой. Это решение будет тем легче, чем лучше линия передачи защищена разрядниками вне трансформаторных станций. Если можно быть уверенным в том, что разряд линии вблизи трансформатора обеспечен по нескольким путям одновременно, то это дает возможность

НТБ
ДНУЗТ

установить большее сопротивление в самой трансформаторной станции.

В крайнем случае можно согласиться с тем, чтобы напряжение разрядной волны составляло половину напряжения воздушного промежутка. В этом случае успокоительное сопротивление будет равно сопротивлению обоих параллельных ответвлений Z_1 и Z_2

$$R = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Для уяснения вопроса рассмотрим пример.

Пример. Трансформатор, обмотка высокого напряжения которого имеет волновое сопротивление в 3 000 омов, присоединен к линии передачи с волновым сопротивлением в 500 омов. Рабочее напряжение составляет 20 000 В. Воздушный промежуток установлен на 30 000 В.

Таким образом

$$E = 30\,000 \text{ В},$$

$$Z_1 = 500 \text{ омов}$$

$$Z_2 = 3\,000 \text{ „}$$

Без разрядного сопротивления в начальный момент действия воздушного промежутка проходил бы в землю ток, равный

$$I_a = 30\,000 \frac{500 + 3\,000}{500 \cdot 3\,000} = 70 \text{ А},$$

при этом напряжение разрядной волны составляло бы 30 000 В.

Для понижения напряжения разрядной волны до 15 000 В необходимо включить сопротивление R , равное

$$R = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{500 \cdot 3\,000}{500 + 3\,000} = 428 \text{ омов}.$$

При этом разрядный ток понизится до 35 А.

Если же известно, что вблизи трансформаторной станции имеются еще два хороших разрядника, то разрядный ток каждого разрядника можно уменьшить до одной трети. Тогда можно значительно увеличить разрядное сопротивление для того, чтобы понизить разрядную волну.

Таким образом, каждый эксплуатационный инженер имеет возможность бороться с полем земли и перенапряжениями, не подвергая при этом установку опасности от статических зарядов. Эта первая проблема перенапряжений оказывается в значительной мере вопросом оборудования установки. Однако этим она не исчерпывается.

Прежде всего, полноты ради необходимо учесть и тот случай, когда трансформатор присоединен не к линии передачи, а к кабелю. Значительно меньшее волновое сопротивление кабельной линии обуславливает, конечно, и меньшие разрядные сопротивления. Однако в кабельных линиях вообще не возникает зарядов от поля земли. Таким образом, если разрядники устанавливаются исключительно из соображений борьбы с зарядами от поля земли, то для трансформаторов, присоединенных к кабельной сети, их устанавливать не следует.

Проблема искрового разрядника имеет и еще одну существенную, до сих пор не рассмотренную сторону. Недостаточно одного лишь исследования начального момента действия искрового промежутка. Необходимо также уяснить себе и конец явления. Искра через некоторое время разрывается и тем самым прерывается и соединение с землей.

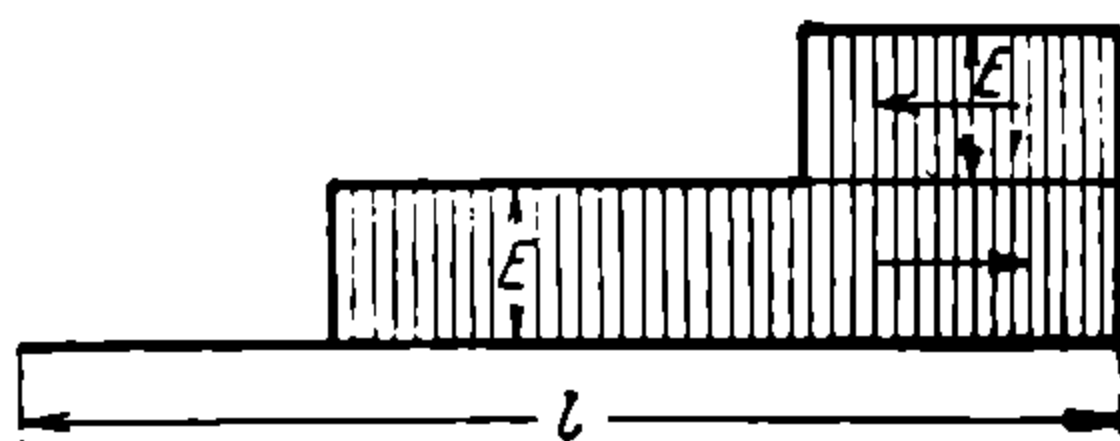
НТБ
ДНУЗТ

Задача искрового разрядника не исчерпывается одним лишь понижением напряжения поля земли до желательных размеров; он не должен создавать новых трудностей при разрыве искры. Внезапно прекратившийся ток, несомненно, вызывает внезапные изменения в состоянии напряжения, так как магнитная энергия не может просто исчезнуть.

Вопрос, возникающий при этом, имеет во многих отношениях существенное значение для учения об эксплуатации трансформатора. При этом мы рассмотрим не только вопрос о разрыве дуги в разряднике, но одновременно с этим и вообще о неизбежных выключениях цепи рабочего тока.

59. ДУГА ИСКРОВОГО РАЗРЯДНИКА.

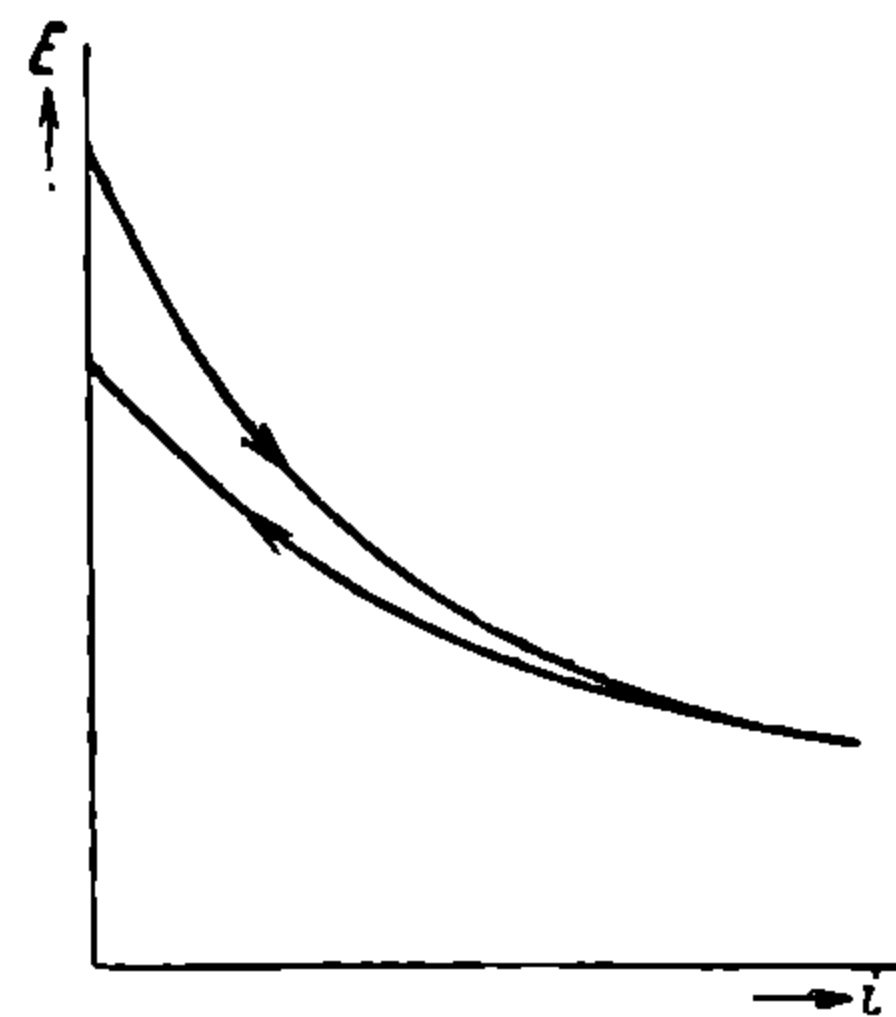
Каждый перерыв тока так же опасен, как и внезапное прекращение движения массы. В последнем случае должна проявиться энергия движения, в первом — магнитная энергия прерванного тока. При прекращении движения массы неизбежны деформации и разрушительные процессы, при прерванном токе неизбежны усиления электрического поля и даже, в известных случаях, пробоя диэлектрика. Индуктивность аналогична массе, а емкость — упругости.



Фиг. 77.



Фиг. 78.



Фиг. 79.

Блуждающая волна представляет собою электрический ток. Если она приходит к такому месту, дальше которого она идти не может, то этим самым ток прекращается. Магнитная энергия

$$\frac{i^2 L}{2}$$

внезапно исчезает для того, чтобы появиться в виде электрической энергии

$$\frac{I^2 C}{2}.$$

Возникает напряжение

$$E = i \sqrt{\frac{L}{C}},$$

суммирующееся с уже имеющимся равным ему напряжением волны E . Таким образом мы получаем знакомую картину отражения волны (фиг. 77).

НТБ
ДНУЗТ

Энергетический баланс здесь как-будто не в порядке. До отражения волны магнитная энергия равнялась электрической, следовательно суммарная энергия составляла

$$E^2 C \text{ ватт—сек.}$$

После отражения при удвоенном напряжении магнитная энергия отсутствует, так как токи входящей и отраженной волны взаимно уравновешиваются. Однако электрическая энергия составляет теперь

$$\frac{(2E)^2 C}{2} \text{ ватт—сек,}$$

Конечно на единицу длины! Длина же наполовину отраженной волны стала в два раза меньше прежней. Таким образом суммарная энергия остается неизменной (фиг. 78).

Что действительно для токов блуждающих волн, действительно и для других токов. При внезапном прерывании тока в i ампер возникнет напряжение равное

$$E = i \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ вольт.}$$

Следовательно, в сеть пойдет во все стороны волна напряжения такой величины.

При подсчете мы приходим к значительным перенапряжениям. В линиях передачи внезапно прерванному току в один ампер соответствует перенапряжение в 500 V, в кабельных линиях значительно меньше, в обмотках же трансформаторов значительно больше. Таким образом мы видим, что разрыв дуги разрядника — далеко небезобидное явление.

Мы приходим невольно к выводу, что разрядные токи в искровом промежутке должны быть, по возможности, понижены и должны быть повышены заземляющие сопротивления. При этом, как известно из предыдущего параграфа, следует ожидать уменьшения напряжения дуги до такой величины, при которой возникающий в ней разрядный ток тотчас же немедленно прекращается.

В действительности положение вещей здесь несколько иное. Сила тока в дуге разрядника не пропорциональна вызывающему ее напряжению. Зависимость между ними соответствует фиг. 79.

С увеличением силы тока потребное напряжение дуги уменьшается, так как при этом сказывается нагревание электродов и ионизация воздуха. Кроме того начинает действовать напряжение самоиндукции, возникающее вследствие разрыва дуги и стремящееся препятствовать этому разрыву. Короче говоря, дуга оказывается довольно устойчивой.

Разрыв дуги может осуществиться лишь при сильном понижении напряжения. Как легко доказать, это понижение достигается разрядной волной в весьма короткое время.

Если принять в простейшем случае, что

$$R = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2},$$

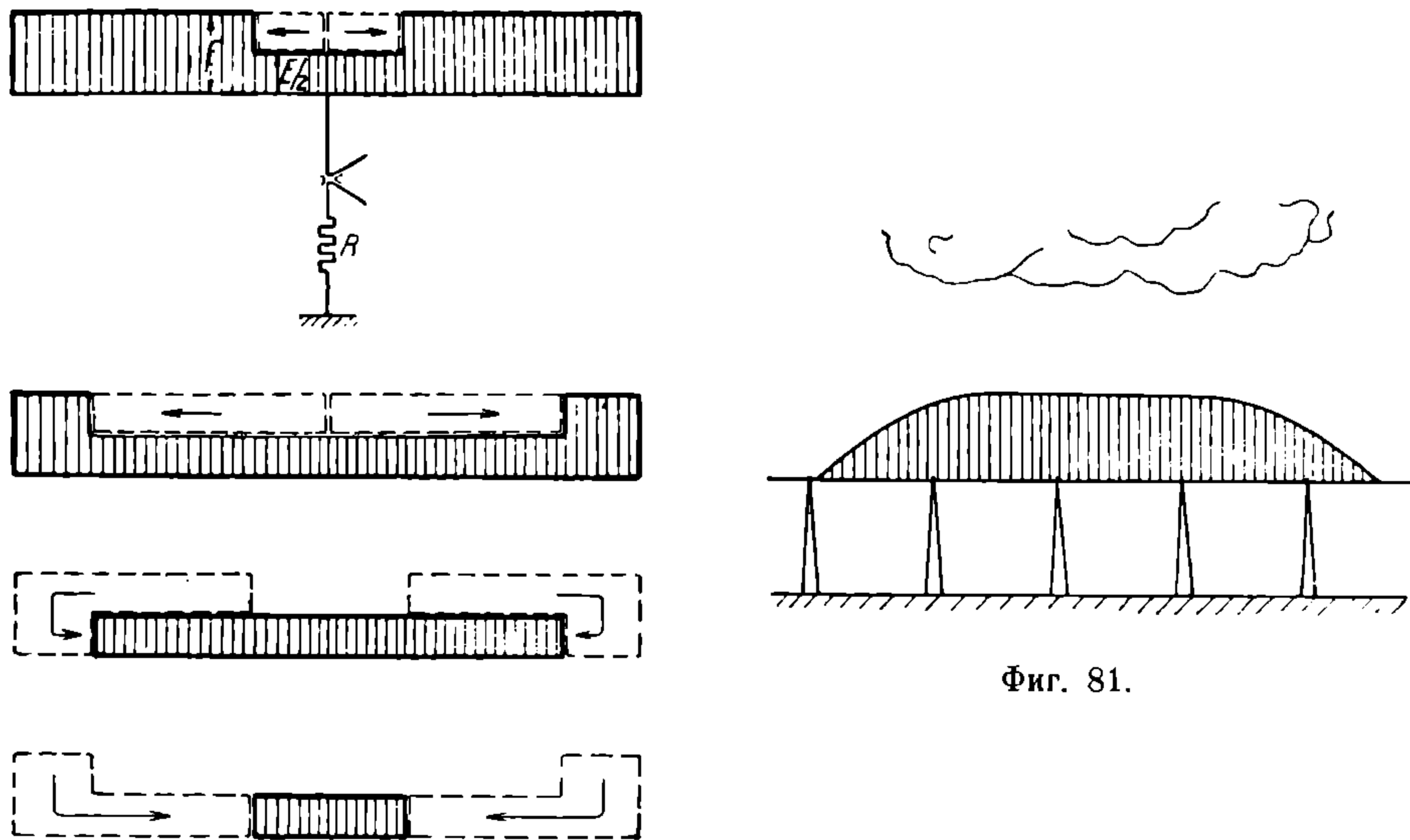
то, как это доказано выше, разрядная волна будет иметь напряжение, равное половине напряжения первоначального разряда.

Разрядная волна, дойдя одновременно до обоих концов линии и полностью отражаясь от них, приходит к месту присоединения разрядника. На этом обратном пути от концов линии к месту ответвления отраженная волна уравнивает и вторую половину заряда, что ведет к полному исчезновению напряжения поля земли (фиг. 80). Разрядный ток уменьшается до нуля, чем и заканчивается весь процесс.

С точки зрения сделанных допущений рассмотрим длинную линию. Пусть длина ее l . По ней со скоростью света v движется разрядная волна. Эта волна, отразившись, снова проходит путь l . Время, потребное для прохождения волны туда и обратно, составляет

$$T = \frac{2l}{v} \text{ сек.}$$

Оно соответствует времени одного колебания блуждающей волны, которая в точке ответвления снова отразится в обе стороны, если только



Фиг. 81.

Фиг. 80.

не исчезнет совершенно. Следует отметить, что при блуждающих волнах действителен тот же закон для числа собственных колебаний, что и при колебаниях по закону синуса.

Успокоительное сопротивление

$$R = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

оказывается чрезвычайно целесообразным. Оно дает возможность полного отведения заряда земли в чрезвычайно малый промежуток времени, по сравнению с которым время существования дуги представляется весьма значительным. Предположение о том, что времени существования дуги не будет достаточно для разряда — совершенно необосновано.

Искровой разрядник имеет все же свои недостатки. Как мы видели, легко устранить напряжение поля земли, ведущее к пробое. Однако, возникающая при этом дуга при известных обстоятельствах становится настолько хорошим проводником, что дает возможность

НТБ
ДНУЗТ

нормальному рабочему току проходить в землю. Правда, рабочее напряжение меняется по закону синуса, а потому время от времени равно нулю. Однако при каждом новом возрастании оно может образовать дугу, так как сопротивление искрового промежутка сильно понизилось.

Роговой разрядник не представляет собою идеального аппарата. Однако, без него трудно обойтись. Чем больше напряжение, на которое он рассчитан, тем правильнее он будет действовать, так как при этом будет затруднено вредное замыкание на землю рабочего напряжения. Во избежание последствий от прохождения рабочего тока в землю следует разрядное сопротивление взять несколько больше ранее приведенного идеального значения.

Против постепенно возникающих статических зарядов вблизи трансформатора роговой разрядник является удовлетворительной защитой, так как он начинает действовать, как только поле земли достигает определенной величины. Если в каком-либо месте линии возникнет большое поле земли, то он вызовет значительное напряжение относительно земли (фиг. 81). В аппаратах защиты на трансформаторной станции это перенапряжение проявится лишь тогда, когда заряды, внезапно освободившиеся в линии (после молнии), устремятся со скоростью света по направлению к трансформатору. В этом случае роговой разрядник бессилён. Опасность от атмосферных явлений не может быть предотвращена на самой трансформаторной станции. Роговые разрядники должны быть установлены на самой линии передачи. Необходимо обеспечить отдельные участки линии удовлетворительной защитой от перенапряжения, в противном случае летние месяцы будут самыми трудными в эксплуатации и самыми опасными для трансформаторов.

60. ВЫКЛЮЧЕНИЯ ТОКА.

Выключения тока представляют собой неизбежные явления в эксплуатации. Однако, для проблемы перенапряжения играют большую роль выключения чрезмерных токов.

Оборудование трансформатора следует выполнять с таким расчетом, чтобы не только избежать чрезмерных токов, но и предохранить трансформатор от нежелательных явлений при их выключении.

Было бы ошибочно судить о выключении тока в трансформаторе так же просто, как и о перерыве тока в сети. Электромагнитная связь обмоток высокого и низкого напряжения вносит осложнения, которые безусловно должны быть рассмотрены.

В месте перерыва тока установка распадается на две части. Например, при выключении первичной обмотки в подводящих проводах, с одной стороны, и в первичной обмотке трансформатора, с другой, возникнет ряд явлений. Существующая связь между обмотками является причиной ряда явлений во вторичной обмотке, а также и во вторичной сети.

Весьма существенным является случай выключения тока с первичной стороны трансформатора, особенно если одновременно принять во внимание и невыгодный случай короткого замыкания у зажимов. Внезапно прерванная большая сила тока, очевидно, вызовет и большое напряжение при выключении.

Аппарат защиты от чрезмерных токов позаботится о выключении короткого замыкания. Автоматический выключатель подействует через несколько секунд, плавкий же предохранитель — еще быстрее. Но с точки зрения защиты от перенапряжения такое быстрое выключение

НТБ
ДНУЗТ

не является желательным. Постоянный ток, являющийся составной частью короткого замыкания, должен совершенно исчезнуть прежде чем будет прервано короткое замыкание. В этом отношении плавкие предохранители весьма опасны.

Автоматический выключатель в некоторой мере обеспечивает выключение только длительного тока короткого замыкания. Из предыдущей главы известно, что добавочный постоянный ток короткого замыкания исчезает после нескольких периодов. Выдержка же времени автомата составляет не менее одной секунды.

Плавкий предохранитель выдерживает ток короткого замыкания лишь в продолжении нескольких тысячных долей секунды. Он плавится уже в первую половину периода короткого замыкания, т. е. когда налицо еще имеется постоянный ток короткого замыкания. Из одного этого ясно, что плавкий предохранитель, удовлетворительно разрешая проблему чрезмерных токов, оказывается непригодным для разрешения проблемы перенапряжения.

В трансформаторных подстанциях следовало бы безусловно заменить плавкие предохранители высокого напряжения автоматическими выключателями. При сравнительно крупных трансформаторах предусмотрены масляные автоматические выключатели. Однако имеется еще значительное количество малых станций без автоматов. Существование подобных станций объясняется стремлением к экономии. Однако эта экономия — сомнительного свойства.

Займемся теперь исследованием процесса выключения длительного тока короткого замыкания. В первую очередь рассмотрим тот случай, когда прерывается максимальное значение длительного тока короткого замыкания. В этом невыгодном случае должны исчезнуть три магнитных поля, а именно: главное поле и оба поля рассеяния.

Из исследования параграфа 39 известно, что эти три магнитных поля при длительном коротком замыкании приблизительно равны между собою. Если бы в обмотках отсутствовало омическое сопротивление, то они были бы в точности равны между собою. Если ток прерван именно при его максимальном значении, то при этом должны исчезнуть максимальные магнитные энергии всех трех полей.

К счастью дело обстоит не так плохо. Главное поле и вторичное поле рассеяния и после перерыва первичной цепи продолжают оставаться связанными с короткозамкнутой вторичной цепью. Оба они будут лишь постепенно убывать, так как их будет поддерживать исчезающий вторичный ток короткого замыкания. Магнитная энергия этих полей постепенно израсходуется в сопротивлениях вторичных цепей.

Однако первичный поток рассеяния исчезает одновременно с первичным током. Его магнитная энергия должна превратиться в электрическую. Волновое сопротивление первичной обмотки определяет собой величину напряжения при выключении, пропорционального прерванному току. Таким образом при выключении первичного тока короткого замыкания могут возникнуть весьма значительные перенапряжения. Единственный выход — это выключение при напряжении равном нулю. Масляному выключателю приписывают поэтому неоценимое свойство — выключать ток в наиболее выгодный момент.

Масляный выключатель по своим качествам значительно превосходит воздушный выключатель, который вообще не применяется для выключения токов короткого замыкания. Но не всегда верно то, что масляный выключатель выключает ток при его прохождении через нулевое значение. Это особенно сомнительно при выключении тока

НТБ
ДНУЗТ

короткого замыкания. Известно, что ток короткого замыкания трансформатора отстает почти на 90° от напряжения сети. Этот ток проходит через нулевое значение как раз в момент, когда напряжение имеет свое максимальное значение. Более чем вероятно, что цепь в этот момент не прерывается.

После всего сказанного выключение тока короткого замыкания продолжает оставаться трудной проблемой перенапряжения. К счастью, процесс выключения отнимает известное время, достаточное для того, чтобы удалась значительная часть магнитной энергии. Можно с уверенностью ожидать обратных перескакиваний дуги. Лишь после нескольких периодов ток короткого замыкания будет окончательно прерван.

61. ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЫКЛЮЧЕНИЯХ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.

Невозможно мириться с таким положением вещей, когда при отсутствии соответствующей защиты от перенапряжения в момент выключения тока короткого замыкания неизбежно должны возникнуть опасные перенапряжения. Кроме того опасно и каждое выключение трансформатора, находящегося под нагрузкой, если при этом ток прерывается не в нулевом значении.

Существует способ уменьшения перенапряжения в момент выключения. Таким способом является выключатель с предварительной ступенью сопротивления (см. параграф 51). Преимущество такого сопротивления заключается в том, что при разрыве дуги ток имеет возможность проходить через него. Это сопротивление обычно значительно больше сопротивления обмотки. Поэтому постоянная времени затухания первичного тока чрезвычайно мала, и предварительная ступень должна оставаться включенной в продолжение очень короткого времени.

Пусть первичная обмотка имеет омическое сопротивление r (омов); индуктивность L (генри); сопротивление предварительной ступени пусть составляет R омов. Если длительный ток короткого замыкания I_k прерван при его максимальном значении, при чем замыкание цепи продолжает осуществляться не дугой, а сопротивлением предварительной ступени, то при этом внезапно возникает падение напряжения IR . Оно стремится уменьшить силу тока, поддерживаемую напряжением самоиндукции. Для наших целей с достаточной точностью можно принять, что

$$-L \frac{dI}{dt} = IR.$$

Из этого уравнения получаем

$$I = I_k e^{-\frac{R}{L} t}$$

Таким образом мы видим, что сопротивление R предварительной ступени должно быть достаточно большим. Этот вывод совпадает с выводом, сделанным нами в параграфе 51 для явлений включения.

Если предварительная ступень уменьшила величину тока короткого замыкания, то уменьшится и опасность от напряжения при выключении. Кроме того в продолжение времени, когда остается включенной предварительная ступень, ток короткого замыкания успевает еще уменьшиться. Однако предварительную ступень следует выключать очень быстро.

Несмотря на свои положительные стороны, предварительная ступень имеет все же некоторые недостатки. Больших напряжений при выключении можно совсем избежать лишь тогда, когда магнитной энергии первичного потока рассеяния будет предоставлена возможность превратиться в джоулево тепло. — Отсюда вытекает, что первичную обмотку следовало бы перед выключением каким-нибудь способом замкнуть на себя.

Поневоле возникает мысль о соединении треугольником, представляющем собою замкнутую на себя обмотку. При поверхностном взгляде это соединение как-будто имеет преимущество перед соединением звездой. Однако соединение треугольником здесь помочь не может. В его обмотках после выключения не может проходить ток. Какое бы направление тока мы не приняли, все равно в одной из фазовых обмоток этот ток создаст бы поток, направленный против потока рассеяния. Подобное резкое уничтожение потока рассеяния, конечно, вреднее сравнительно с постепенным его исчезновением.

Остается лишь единственный способ — короткое замыкание первичной обмотки, конечно, до отключения трансформатора от сети. Это весьма оригинальный способ, так как при нем действие одного короткого замыкания ослабляется другим коротким замыканием. При этом способе нам удастся избежать перенапряжений (по крайней мере в обмотках трансформатора), так как здесь магнитные поля имеют возможность исчезнуть.

Нельзя попросту перенести опасность из трансформатора в сеть. Короткое замыкание после трансформатора вызывает в сети, разумеется, значительно меньшие токи, чем непосредственное короткое замыкание перед трансформатором. С последним коротким замыканием однако легко бороться. Можно трансформатор замкнуть с первичной стороны накоротко тогда, когда сопротивление предварительной ступени еще включено. Кроме того первичную обмотку можно замыкать и через сопротивление.

При отсутствии предварительной ступени можно осуществить идею короткого замыкания первичной обмотки, включив омические или индуктивные сопротивления в искусственную цепь короткого замыкания.

По сведениям, имеющимся у автора, эта мысль нова, а потому еще недостаточно исследована. Этот способ дает как-будто удовлетворительную защиту от перенапряжения, однако вызывает немалое удорожание масляного выключателя.

Эксплуатационный инженер возражает против установки масляных выключателей с предварительной ступенью, так как они дороги. Еще менее охотно он согласится на расходы по устройству добавочных приспособлений для искусственного короткого замыкания. Он не доверяет всем этим приспособлениям для защиты от перенапряжения, так как пробой в трансформаторах продолжают встречаться.

Однако все же дешевле хорошо защитить трансформатор от перенапряжений, чем подвергать его обмотки постоянным опасностям пробивания. Дело не только в самих повреждениях. Дело еще в перерывах в подаче тока. Установка больших резервов на трансформаторных станциях — вещь очень дорогая, во всяком случае более дорогая, чем установка удовлетворительного оборудования для защиты от перенапряжения.

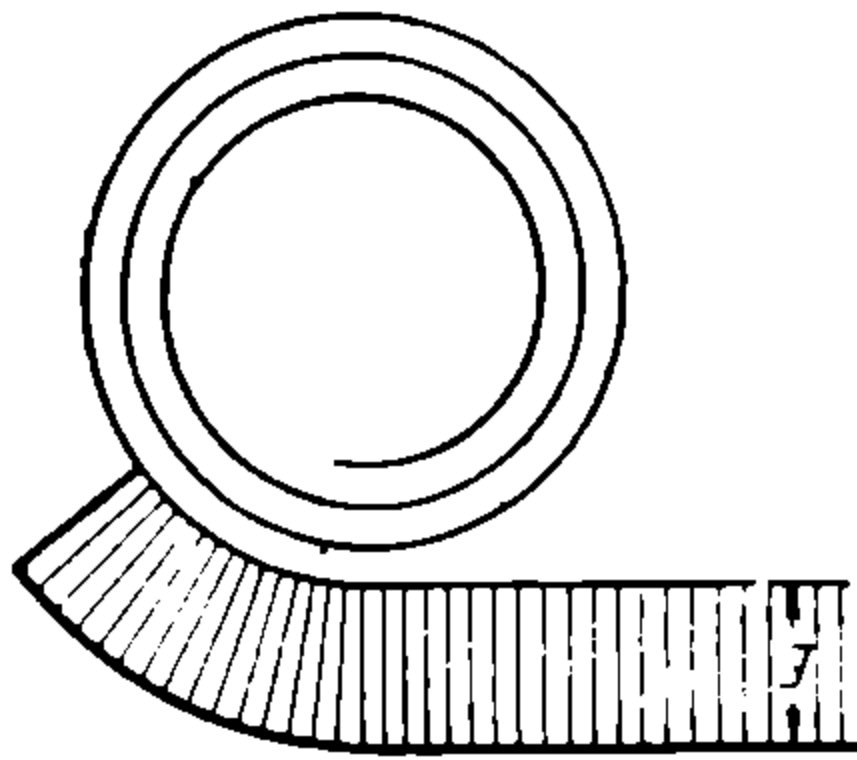
С решением вопроса о выключении тока короткого замыкания разрешена проблема выключения во всем ее объеме. Чем меньше выключ-

чаемый ток, тем меньше величина перенапряжения. Но при известных обстоятельствах и незначительные токи могут вызвать большие перенапряжения в случае, если своевременно не приняты соответствующие меры. В недалеком будущем масляный выключатель с предварительной ступенью, с достаточно большим сопротивлением этой ступени, станет неотъемлемой частью каждой трансформаторной установки.

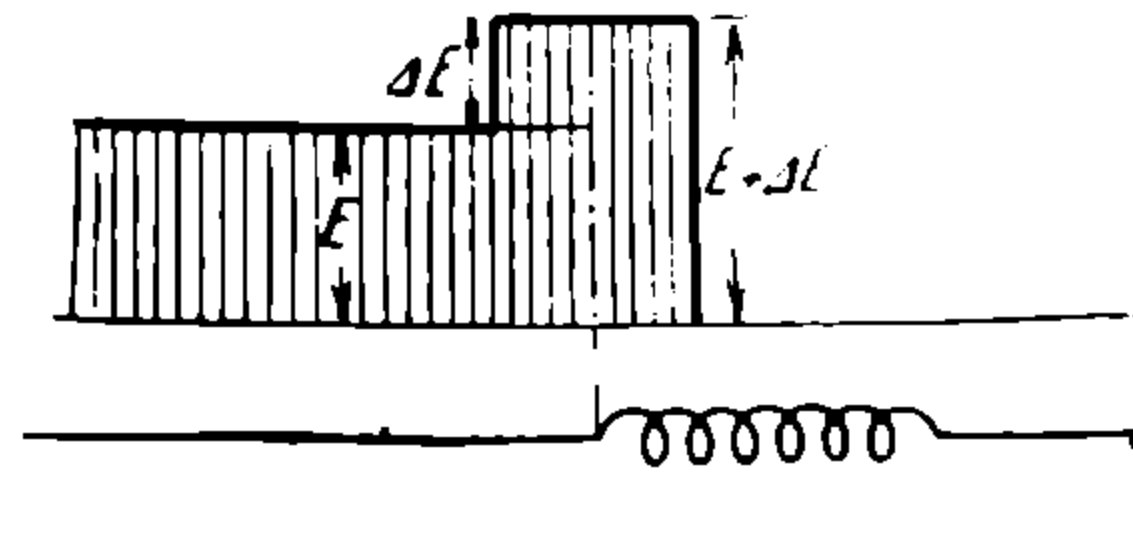
62. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЕ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ. ВОЛНА ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ.

Включение трансформатора вызывает свои значительные перенапряжения. Перед моментом включения сеть является носителем определенного заряда. В момент включения, при котором рабочее напряжение (а следовательно и заряд) может оказаться максимальным, к первичной обмотке трансформатора подходит волна напряжения.

Даже при отсутствии каких-либо осложнений в дальнейшем эта волна должна была бы сделаться опасной. Она устремляется крутым фронтом по первому витку обмотки. Между первым и вторым витком должно, несомненно, существовать полное рабочее напряжение (фиг. 82).



Фиг. 82.



Фиг. 83.

В действительности явление еще ухудшается у зажимов трансформатора. Волновое сопротивление обмотки значительно больше волнового сопротивления подводющих проводов. Ток волны в проводах, равный напряжению волны, деленному на волновое сопротивление

$$i_1 = \frac{E}{Z_1},$$

этот ток не может пройти полностью в первичную обмотку, имеющую волновое сопротивление Z_2 . Через последнюю пройдет лишь ток

$$i_2 = \frac{E}{Z_2}$$

Это ведет как бы к задержке части заряда. Часть волны возвращается от зажимов трансформатора, при чем напряжение у зажимов повышается на ΔE вольт (фиг. 83).

В результате в обмотке появляется волна с напряжением $E + \Delta E$, под действием которого проходит ток

$$\frac{E + \Delta E}{Z_2}.$$

Кроме того от узловой точки идет ток отраженной волны, равный

$$\frac{\Delta E}{Z_1}$$

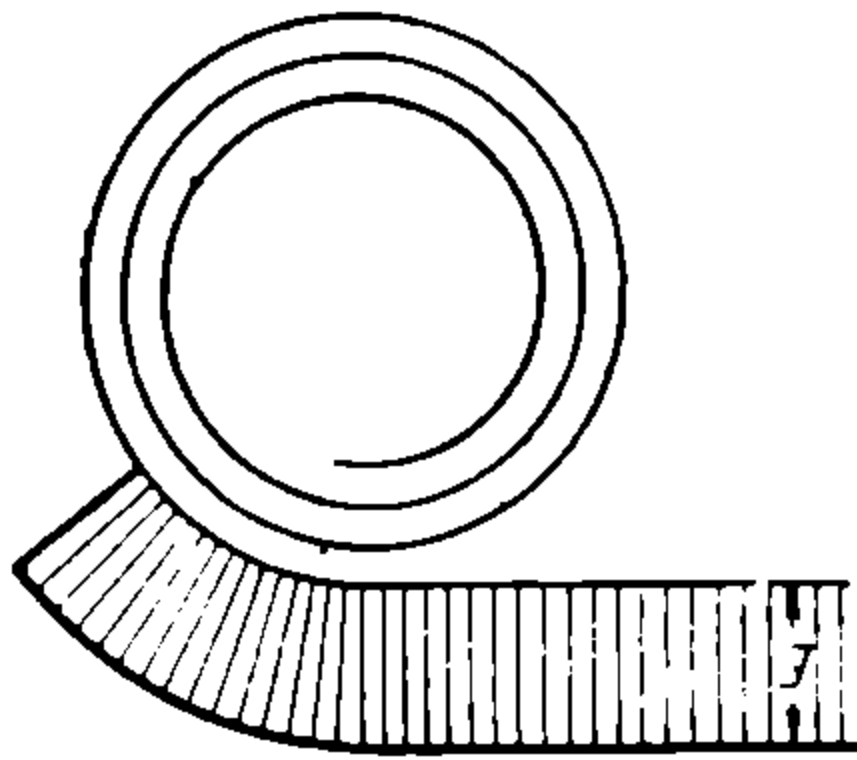
НТБ
ДНУЗТ

чаемый ток, тем меньше величина перенапряжения. Но при известных обстоятельствах и незначительные токи могут вызвать большие перенапряжения в случае, если своевременно не приняты соответствующие меры. В недалеком будущем масляный выключатель с предварительной ступенью, с достаточно большим сопротивлением этой ступени, станет неотъемлемой частью каждой трансформаторной установки.

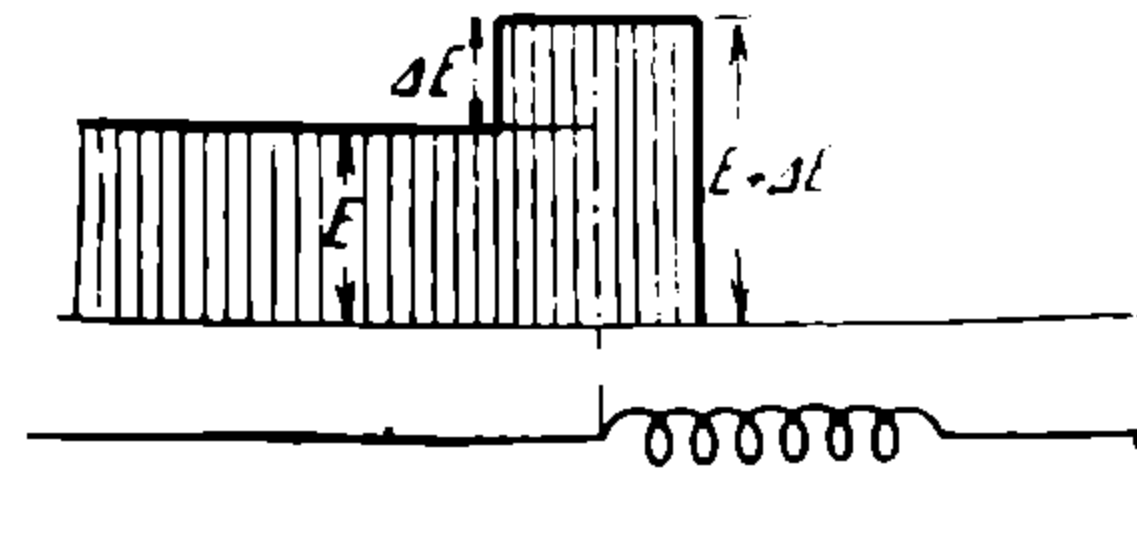
62. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЕ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ. ВОЛНА ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ.

Включение трансформатора вызывает свои значительные перенапряжения. Перед моментом включения сеть является носителем определенного заряда. В момент включения, при котором рабочее напряжение (а следовательно и заряд) может оказаться максимальным, к первичной обмотке трансформатора подходит волна напряжения.

Даже при отсутствии каких-либо осложнений в дальнейшем эта волна должна была бы сделаться опасной. Она устремляется крутым фронтом по первому витку обмотки. Между первым и вторым витком должно, несомненно, существовать полное рабочее напряжение (фиг. 82).



Фиг. 82.



Фиг. 83.

В действительности явление еще ухудшается у зажимов трансформатора. Волновое сопротивление обмотки значительно больше волнового сопротивления подводющих проводов. Ток волны в проводах, равный напряжению волны, деленному на волновое сопротивление

$$i_1 = \frac{E}{Z_1},$$

этот ток не может пройти полностью в первичную обмотку, имеющую волновое сопротивление Z_2 . Через последнюю пройдет лишь ток

$$i_2 = \frac{E}{Z_2}$$

Это ведет как бы к задержке части заряда. Часть волны возвращается от зажимов трансформатора, при чем напряжение у зажимов повышается на ΔE вольт (фиг. 83).

В результате в обмотке появляется волна с напряжением $E + \Delta E$, под действием которого проходит ток

$$\frac{E + \Delta E}{Z_2}.$$

Кроме того от узловой точки идет ток отраженной волны, равный

$$\frac{\Delta E}{Z_1}$$

НТБ
ДНУЗТ

Поле земли вызывает статические заряды, а тем самым и напряжения относительно земли. Как мы видели, эти добавочные напряжения можно уменьшить, но совершенно устранить их невозможно. В обычном состоянии такие добавочные напряжения между двумя фазами не проявляются. Лишь при заземлении одной фазы возникает между двумя фазами, а также между обмоткой и землей, междуфазовое напряжение плюс добавочное напряжение поля земли.

Керн трансформатора представляет собою землю, так как он обычно заземлен. Однако и обмотку низкого напряжения трансформатора, практически, можно принять за землю. Следовательно, должна быть обеспечена от пробивания обмотка высокого напряжения, которая имеет почти двойное междуфазное напряжение плюс допустимое добавочное напряжение относительно керна и обмотки низкого напряжения, а также относительно обмотки высокого напряжения другой фазы. После всего сказанного становятся понятными нормы для испытаний V. D. E, а именно

$$1,75 E + 15\ 000 \text{ вольт.}$$

Одна часть проблемы перенапряжения разрешена этими нормами, предоставляющими конструктору дальнейшую заботу о величине напряжения. Безусловно необходимо, чтобы эта первая часть проблемы перенапряжения (о величине волны включения) была разрешена самим конструктором. Он против этого и не возражает, так как убедился, что другого выхода нет.

Однако вторая часть проблемы перенапряжения, занимающаяся изучением вопроса о форме волны, не рассматривающая фронт волны как нечто данное — эта часть проблемы интересует не только конструктора. Вернее — это совершенно не его проблема. Это пробелма учения об эксплуатации, более того, в настоящее время это проблема перенапряжения в трансформаторе.

Конструктор находится в недоумении при изучении новых норм V. D. E. для испытания на волну с крутым фронтом. Он считает своим долгом указать эксплуатационному инженеру на совершенную недопустимость включения трансформаторов на волны с крутым фронтом. Правда, обмотка сглаживает фронт волны. Чем дальше волна проникает в обмотку, тем более сглажен ее фронт. Однако обмотка в состоянии изменить форму лишь у волны, уже вошедшей в нее. Набегающая же волна с крутым фронтом не в ее власти. Между входными витками возникнут недопустимые напряжения, если своевременно не было принято мер к сглаживанию фронта волны вне трансформатора.

В очень мощных конструкциях можно входные витки изолировать друг от друга на полное и даже на двойное рабочее напряжение. При средних же и малых мощностях это немыслимо. Их изоляция будет проколота уже при испытании на волну с крутым фронтом, т. е. прежде чем поступить в эксплуатацию.

Известно, что волны включения много раз пробивают изоляцию между витками, прежде чем, наконец, наступит короткое замыкание витков. Входные катушки большей частью покрыты такими «уколами». Наконец, постепенное расширение канала этих уколов сказывается. Соответствующие места становятся доступны действию рабочего напряжения.

Таким образом мы видим, что крутой фронт волны включения теоретически и практически недопустим, и что абсолютно необходимо

избегать периодических пробиваний входных витков. Для этого необходимо защиту от перенапряжения трансформатора выполнить так, чтобы каждая поступающая из сети волна сгладилась прежде чем подойти к зажимам трансформатора.

Этим самым конструктор еще не освобождается от обязанности увеличить изоляцию витков. Если принять во внимание, что сама обмотка по мере продвижения по ней волны все более и более ее сглаживает, то изоляция витков должна все увеличиваться по мере приближения к зажимам. Практически подобное требование предъявляется к входным катушкам, у которых увеличивается изоляция как между витками, так и между слоями. Вопрос о том, до какой степени увеличить изоляцию, большей частью решается размерами трансформатора. Чем меньше трансформатор, тем в конструктивном отношении труднее вопрос об изоляции его витков. тем вероятнее замыкание витков. Поэтому именно у малых трансформаторов сглаживание волны соответствующими приборами имеет большое значение.

63. СГЛАЖИВАНИЕ ФРОНТА ВХОДЯЩЕЙ ВОЛНЫ. ЗАЩИТНАЯ ДРОССЕЛЬНАЯ КАТУШКА.

Отличным средством для сглаживания фронта волны является дроссельная катушка, включенная между трансформатором и линией. Эта катушка может быть рассматриваема как сосредоточенная самоиндукция. Ее действие легко проследить на фиг. 86.

Пусть из сети с волновым сопротивлением Z_1 приходит волна под напряжением E и встречает на своем пути сосредоточенную самоиндукцию L_d (генри). Так как волновое сопротивление при этом меняется, но возникнет некоторое повышение напряжения ΔE вольт и волна частично отразится. Волновой ток i_2 , проникающий в дроссельную катушку, индуцирует в ней напряжение самоиндукции

$$- L_d \frac{di_2}{dt},$$

после чего проходит в обмотку трансформатора. Напряжение волны E_2 на зажимах трансформатора совместно с напряжением самоиндукции уравновешивают напряжение в начале дроссельной катушки. Таким образом имеем

$$E + \Delta E = L_d \frac{di_2}{dt} + E_2.$$

Из сети идет волновой ток

$$\frac{E}{Z_1}$$

Отражается ток равный

$$\frac{\Delta E}{Z_1},$$

в обмотку же проникает лишь ток

$$i_2 = \frac{E_2}{Z_2},$$

и таким образом

$$E - \Delta E = E_2 \frac{Z_1}{Z_2}.$$

С другой стороны имеем

$$E + \Delta E = E_2 + \frac{L_d}{Z_2} \frac{dE_2}{dt},$$

после чего можно написать

$$\frac{dE_2}{dt} + \frac{Z_1 + Z_2}{L_d} E_2 - 2 \frac{Z_2}{L_d} E = 0.$$

Для волны включения с крутым фронтом при

$$t = 0 \quad \text{и} \quad E_2 = 0,$$

имеем

$$E = \text{const.}$$

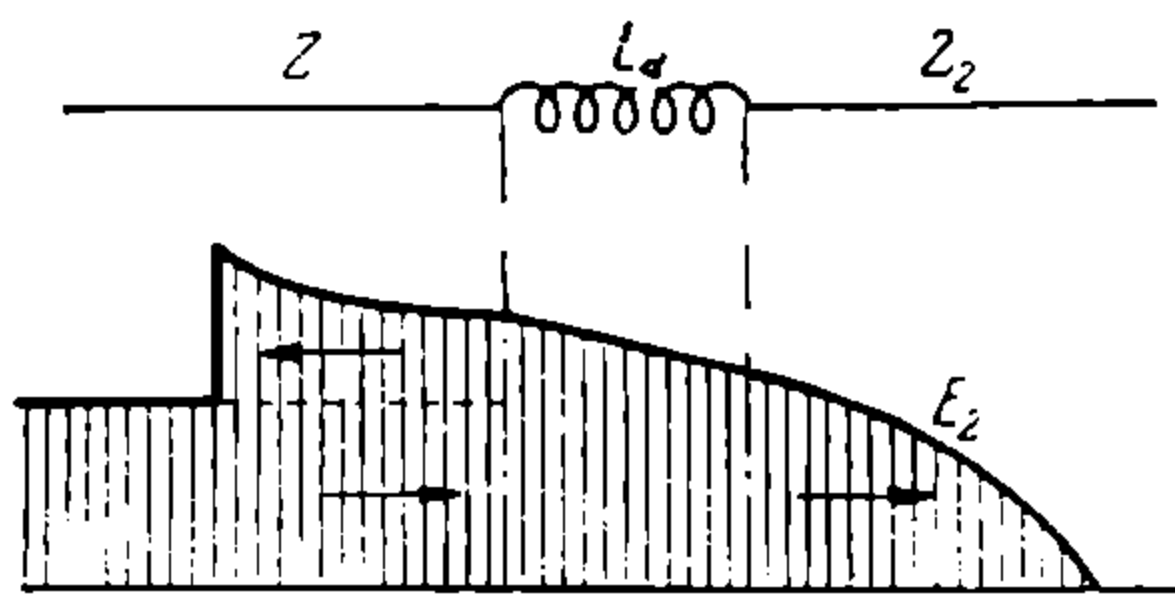
Решение дифференциального уравнения дает в этом случае

$$E_2 = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} E \left[+ 1 - e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{L_d} t} \right].$$

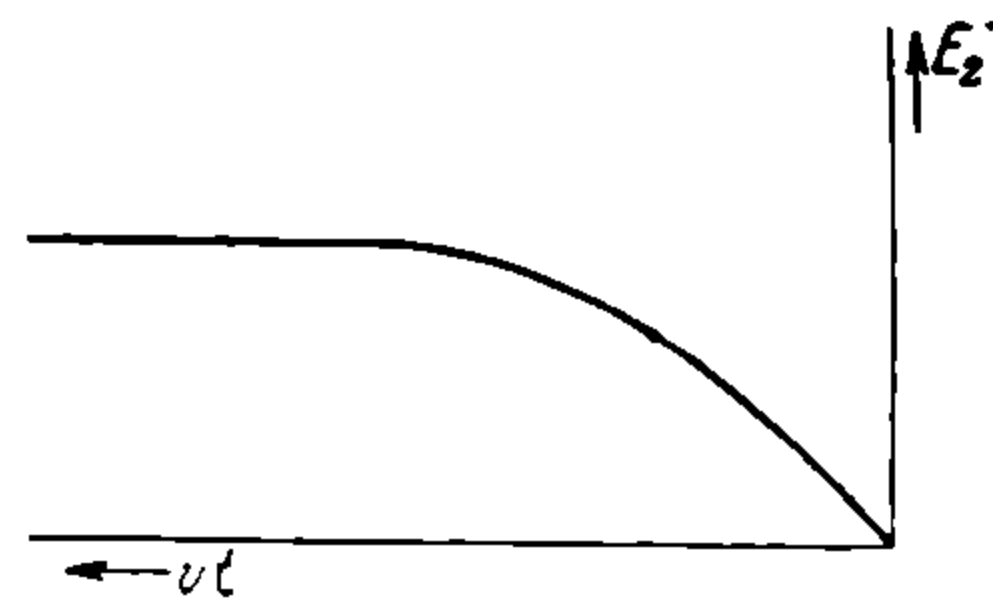
Напряжение E_2 у зажимов трансформатора меняется во времени по экспоненциальной кривой от нулевого значения до конечного

$$\frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} E,$$

т. е. во всяком случае не до двойной величины напряжения при включении.



Фиг. 86.



Фиг. 87.

Постоянную времени нарастания напряжения

$$T' = \frac{L_d}{Z_1 + Z_2}$$

можно произвольно менять, выбирая соответствующие значения L_d . Разумеется пространственное распределение напряжения волны будет в точности соответствовать изменению во времени напряжения E_2 у начала обмотки. Таким образом фронт волны действительно сглаживается, форму же этого сглаживания фронта волны нетрудно установить.

Волна движется со скоростью v [см/сек.]. За время t (секунд) она проходит путь $v \cdot t$ см. Форма фронта волны в пространстве представлена на фиг. 87, где дается зависимость между напряжением волны и расстоянием от ее начала. Эта форма в точности соответствует изменению во времени напряжения у зажимов обмотки (фиг. 86). Таким образом, возникает новое понятие «пространственная постоянная» сглаженного фронта волны.

$$R = T' \cdot v = \frac{v L_d}{Z_1 + Z_2} \text{ см.}$$

Эта пространственная постоянная дает нам величину расстояния (измеренного по длине провода обмотки), на котором напряжение фронта волны поднимется от своего нулевого до конечного значения

$$\frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} E \quad (30)$$

в том случае, если фронт волны сохраняет свой первоначальный прямолинейный характер. Такая пространственная постоянная может быть использована для определения величины напряжения между двумя точками провода обмотки, расстояние между которыми равно одному сантиметру. Это «удельное» падение напряжения составляет

$$\frac{2Z_2}{vL_d} E \text{ вольт/см.}$$

Между двумя соседними витками обмотки длиной в U см при проникновении сглаженной волны очевидно возникает напряжение, равное

$$\Delta e_w = \frac{2Z_2 U}{cL_d} E \text{ вольт.}$$

Таким образом мы имеем уравнение для определения величины самоиндукции дроссельной катушки.

64. ВЫБОР ЗАЩИТНОЙ ДРОССЕЛЬНОЙ КАТУШКИ.

Правильный выбор защитной дроссельной катушки для трансформатора представляет собою весьма существенную задачу учения об эксплуатации. Поэтому необходимо возможно точнее подсчитать величину волнового сопротивления трансформатора, входящую в уравнение (30).

Следует отметить, что точный подсчет здесь невозможен. Приходится довольствоваться приближенными значениями. Однако, неточна и вся теория явлений перенапряжений, а потому было бы нецелесообразно требовать точности для отдельной части этой теории.

Как известно волновое сопротивление определяется через величины самоиндукции и емкости соответствующей пары проводников. При двух параллельных свободно натянутых проводах расчет прост. Он становится затруднительным для того случая, когда эти проводники образуют собою обмотку трансформатора.

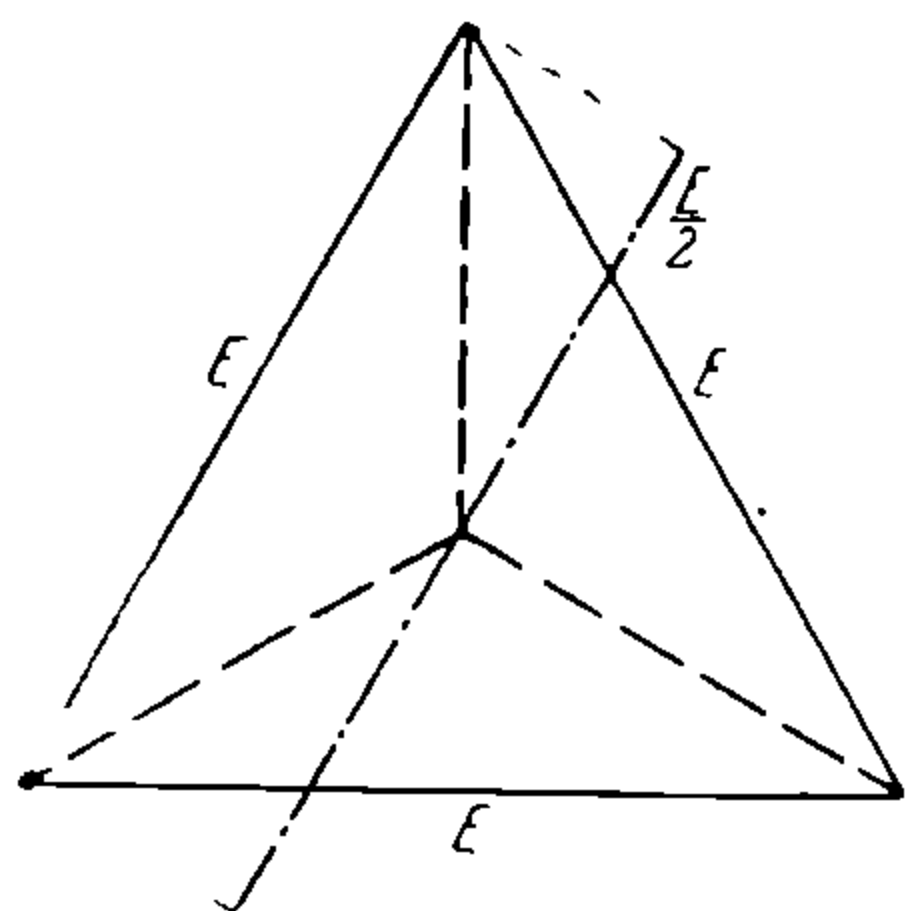
Обычно ограничиваются рассмотрением небольшого участка пары проводников, а именно единицы их длины. При подсчете волнового сопротивления обмотки трансформатора проще всего определяется самоиндукция и емкость одной целой пары фазовых обмоток. Имея эти данные, можно при желании подсчитать волновое сопротивление и для единицы длины провода обмотки.

В трансформаторе дело обстоит гораздо сложнее, чем в линии передачи. В нем изменяются как магнитная проницаемость, так и диэлектрическая постоянная. Изменение первой вызывается наличием железа, а второй — употреблением масла, бумаги и других изоляционных материалов. Наконец, имеет большое значение и то обстоятельство, что между зажимами трансформатора и нулевой точкой обмотки напряжение между обоими фазовыми проводами изменяется от полного значения до нуля. При этом поневоле приходится принимать во внимание некоторое среднее значение напряжения.

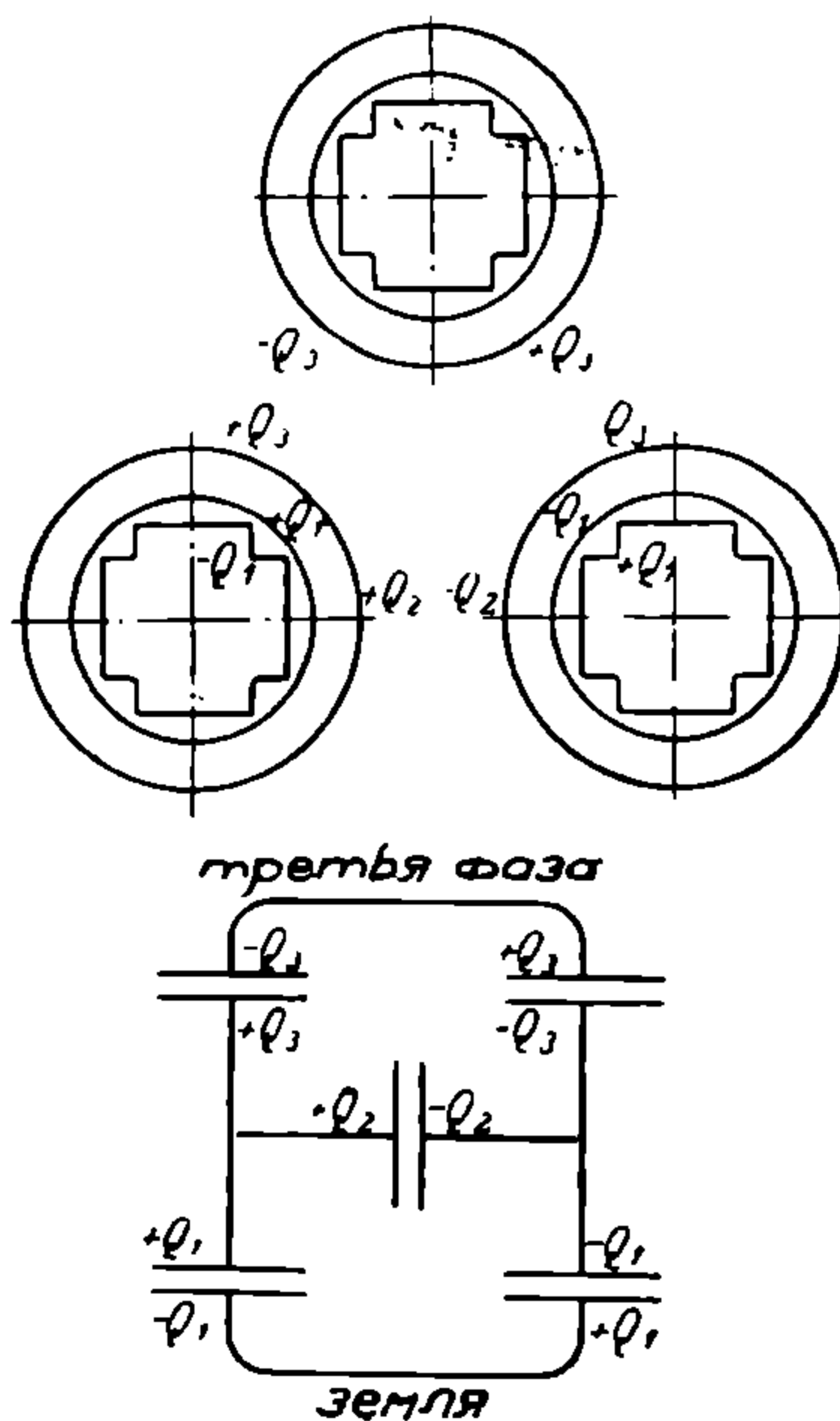
ПНТЬ
ДНУЗТ

Наконец, не следует забывать, что блуждающие волны передвигаются по проводнику с чрезвычайно большой скоростью. Так как длины проводников сравнительно малы, то дело сводится к чрезвычайно быстрой перемене направления волн, иначе говоря к большому числу периодов волнового тока. Если по линии передачи длиной в 300 *km* будет пробегать волна, то на прохождение этой линии ей потребуется одна тысячная секунды, для возвращения же после отражения на первоначальное место ей потребуется две тысячных секунды. Это составляет 500 периодов в секунду. При таком числе периодов железо керна становится в магнитном отношении плохо проницаемым.

Как мы увидим из дальнейшего, при колебаниях в обмотке трансформатора дело доходит до еще большего числа периодов. В этом случае железо как бы отсутствует. Поэтому самоиндукцию обмотки придется подсчитать так, как будто бы это был соленоид без железного сердечника.



Фиг. 88.



Фиг. 89.

Чтобы принять во внимание и емкость проводников обмотки, лучше всего для ясности считать, что волна передает проводникам фазовых обмоток заряд Q (разумеется, положительный заряд $+Q$ — одной обмотке и заряд $-Q$ — другой) и притом при междуфазовых напряжениях E . Если это напряжение убывает равномерно по направлению к нулевой точке, то по середине мы будем иметь между проводниками обеих обмоток напряжение $\frac{E}{2}$

При явлениях блуждающих волн, возникающих при процессе включения, мы имеем диаграмму напряжений фиг. 88, где в третьей фазе напряжение равно нулю. Напряжение проводников обеих обмоток относительно земли и относительно проводника третьей фазы составляет на зажимах $\frac{E}{2}$ а по середине $\frac{E}{4}$.

Заряды $+Q$ и $-Q$ не связаны между собою полностью посредством емкости фазовых обмоток. Часть заряда связывается с железом

сердечника, следовательно и с землей. Вторая часть заряда связывается с третьей фазовой обмоткой, являющейся в рассматриваемый момент также «землей». Фиг. 89 дает картину распределения зарядов.

Пусть емкость между двумя фазовыми обмотками составляет C_1 фарад, а емкость фазовой обмотки относительно земли — C_0 фарад. Тогда от одной фазовой обмотки к другой передается частичный заряд

$$\frac{E}{2} \cdot C_1,$$

так как здесь мы должны рассчитывать по напряжению $\frac{E}{2}$.

С землей связан заряд

$$\frac{E}{4} C_0,$$

а с третьей, лишенной напряжения, фазовой обмоткой связан частичный заряд

$$\frac{E}{4} C_1.$$

Для суммарного заряда имеем, следовательно, выражение

$$Q = \frac{E}{4} [3 C_1 + C_0],$$

а тем самым и суммарную емкость между двумя фазовыми обмотками

$$C = \frac{3C_1 + C_0}{2}$$

(все это, конечно, отнесено к единице напряжения $\frac{E}{2}$)

Частичные емкости легко определяются при концентрическом расположении обмоток которое нас главным образом и интересует. Внутреннюю обмотку низкого напряжения можно считать за землю. Емкость одной фазовой обмотки относительно земли можно, следовательно, рассматривать как емкость двух концентрических цилиндров с диаметрами, соответствующими диаметрам обмоток высокого и низкого напряжения, и с промежутком, соответствующим действительному междукатушечному промежутку (фиг. 90). Таким путем мы получим несколько преувеличенное значение.

Обозначим

U — средняя длина витка трансформатора (см),

l_s — осевая длина обмотки (см).

ϵ — диэлектрический коэффициент изоляционного материала в междукатушечном промежутке,

δ — ширина междукатушечного промежутка [см],

Тогда можно написать

$$C_0 = \frac{\epsilon U l_s}{4 \pi \cdot \delta \cdot 9 \cdot 10^{11}} \text{ фарад.}$$

Несколько затруднительнее обстоит дело с емкостью между двумя фазовыми обмотками. В обычно употребляемых трехфазных сердечниках обмотки фаз расположены относительно обмоток остальных двух фаз неодинаково. Вместо ранее указанного расположения (фиг. 89) имеем расположение фиг. 91. Обмотка третьей фазы здесь экранируется.

НТБ
ДНУЗТ

Трудно к тому же определить с большой точностью емкость между цилиндрами фазовых обмоток, так как расстояние между их осями немногим больше диаметра наружной обмотки. Следует учесть то обстоятельство, что здесь электрические оси не совпадают с геометрическими осями цилиндров.

Если геометрическое расстояние между осями кернов в раз больше диаметра наружной обмотки D , то расстояние между электрическими осями будет составлять (фиг. 92).

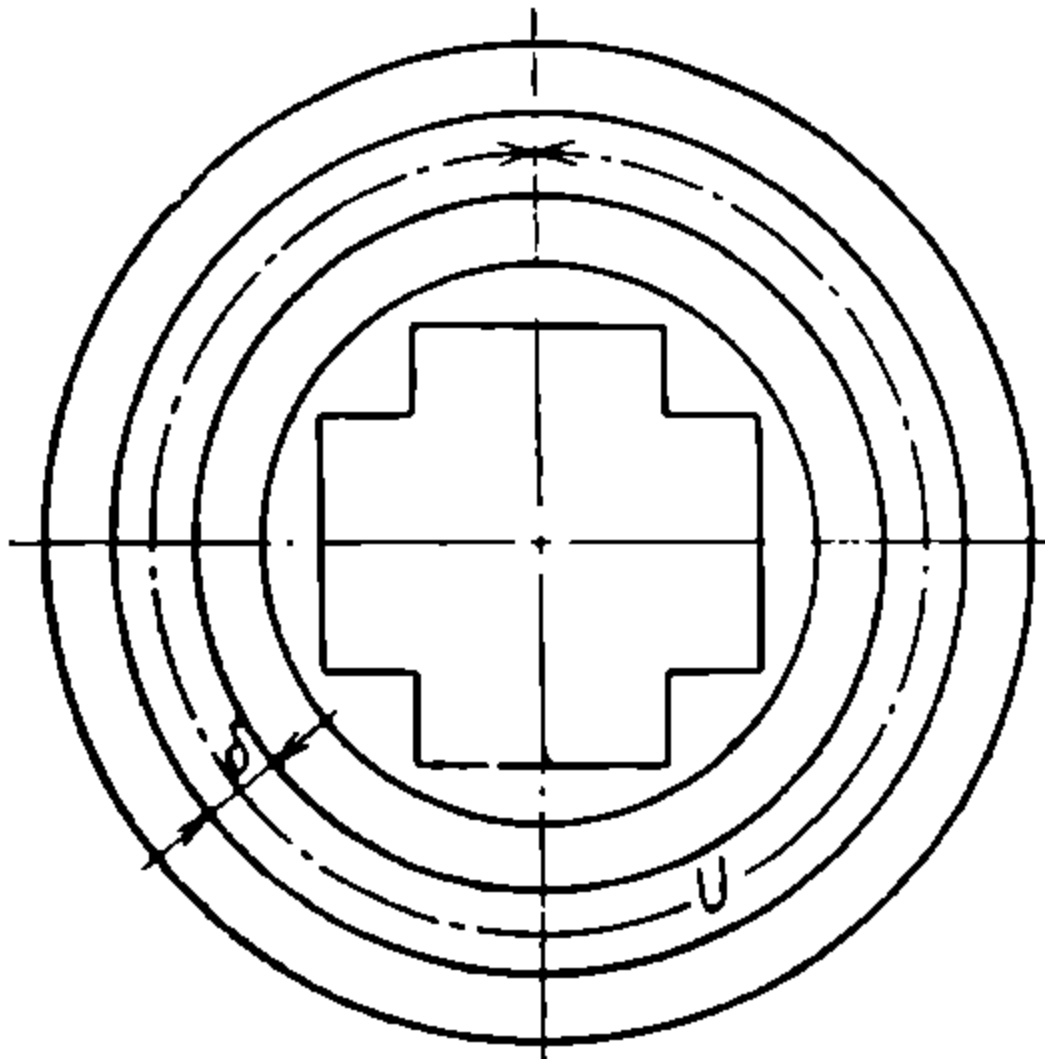
$$D \sqrt{\xi^2 - 1}.$$

Тогда мы имеем

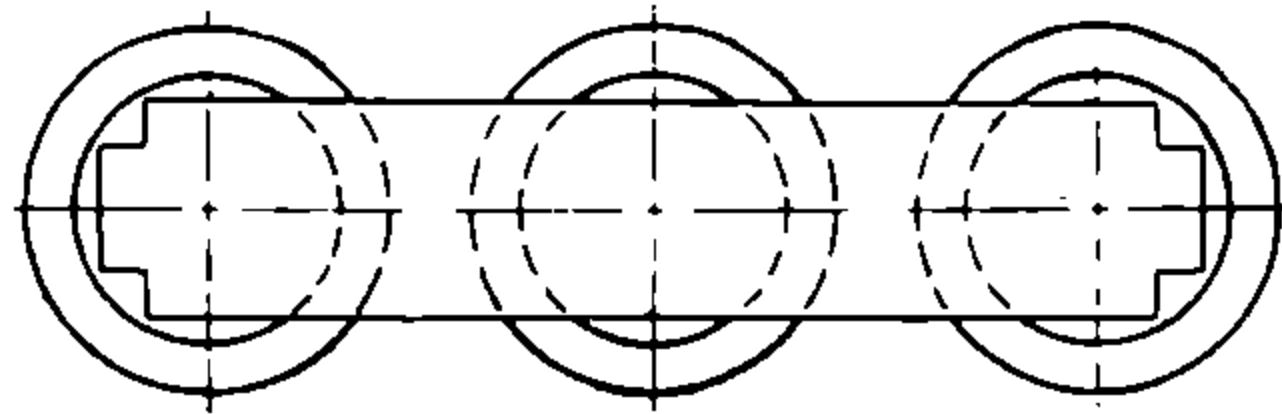
$$C_1 = \frac{\xi l_s}{4 \cdot 9 \cdot 10^{11} \ln \frac{\sqrt{\xi^2 - 1} + (\xi - 1)}{\sqrt{\xi^2 - 1} - (\xi - 1)}} \text{ фарад.}$$

В обычных конструкциях величина ξ составляет 1,05—1,2. Тогда мы получим:

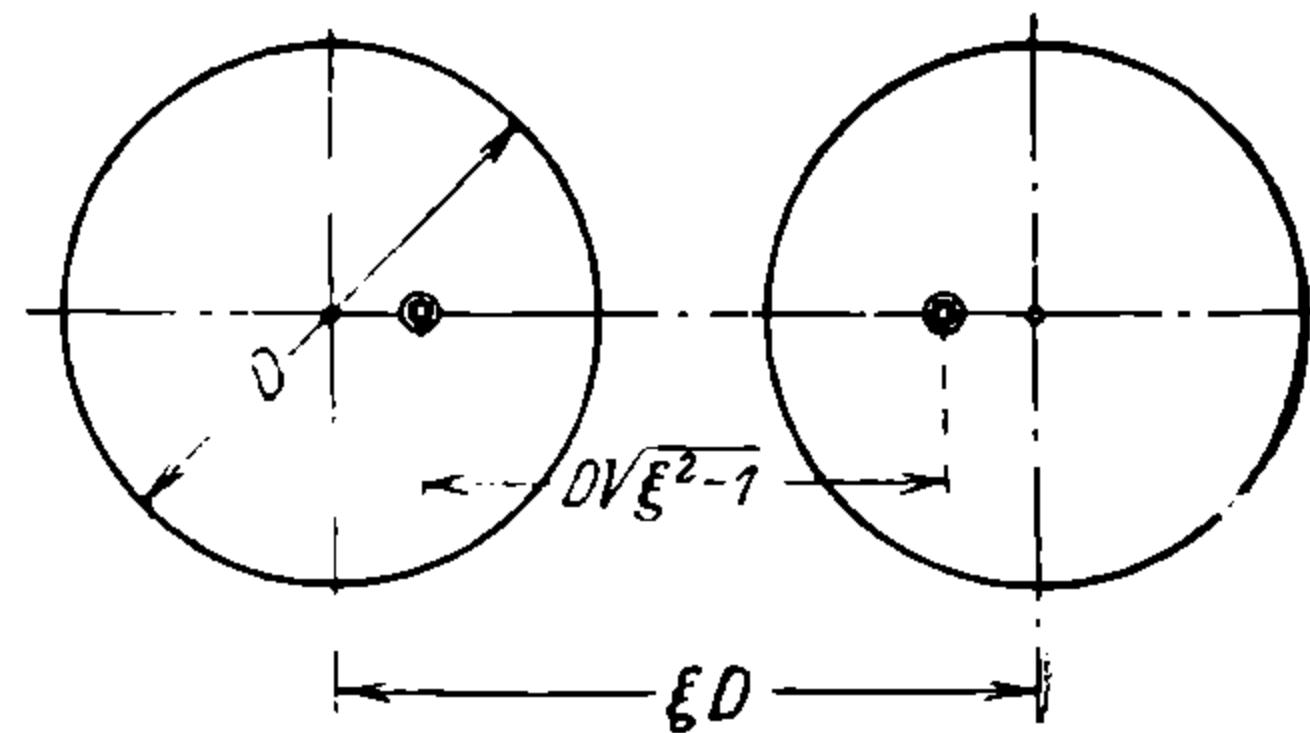
$$1 < 4 \ln \frac{\sqrt{\xi^2 - 1} + (\xi - 1)}{\sqrt{\xi^2 - 1} - (\xi - 1)} < 2,5.$$



Фиг. 90.



Фиг. 91.



Фиг. 92.

Принимая

$$C_1 = \frac{l_s}{9 \cdot 10^{11}} \text{ фарад,}$$

мы получим слишком большое значение.

Ввиду электрического экранирования обмотки третьего цилиндра величина

$$C = \frac{\epsilon}{9 \cdot 10^{11}} \left(1 + \frac{U}{8 \pi d} \right) \text{ фарад} \quad (31)$$

также окажется несколько большей. Следует отметить, что здесь мы пренебрегали промежутками между отдельными катушками обмотки.

Уравнение (31) показывает, что при обычной цилиндрической обмотке частичная емкость относительно земли имеет преобладающее значение. Средняя длина витка U трансформатора больше увеличенного в 8π раз промежутка между обеими цилиндрическими обмотками одного керна.

НТБ
ДНУЗТ

Само собой разумеется, что наименьшее расстояние между цилиндрическими обмотками двух соседних кернов зависит от величины напряжения, также как и расстояние между обмотками высокого и низкого напряжения. Однако следует отметить, что расстояние между цилиндрическими обмотками двух соседних кернов будет сказываться слабее расстояния между обмотками высокого и низкого напряжения. Таким образом, с увеличением напряжения влияние частичной емкости относительно земли будет уменьшаться.

Наконец необходимо указать на то, что подсчет суммарной емкости по уравнению (31) возможен лишь в том случае, когда речь идет о волнах, возникающих в процессах включения и выключения. При блуждающих волнах, освобожденных полем земли, все три фазовых проводника представляют собою единый проводник, отдающий земле свой противоположный заряд. В этом случае речь идет лишь о емкости относительно земли трех проводников, следовательно об утроенной подсчитанной выше емкости. Таким образом мы получаем второе выражение

$$C' = \frac{\varepsilon l_s}{9 \cdot 10^{11}} \frac{U}{1,33 \pi \delta} \quad (32)$$

для суммарной емкости. Это выражение дает значения большие, чем уравнение (31). Корндэрфер (M. Korndörfer)¹⁾ дает простую формулу для расчета самоиндукции дроссельной катушки без железа (каковой должна рассматриваться обмотка трансформатора при высоких частотах). Эта формула гласит

$$L = 10,5 w^2 D_{cp} \sqrt[4]{\frac{D_{cp}}{U_s}} 10^{-9} \text{ генри} \quad (33)$$

где:

w — число витков обмотки;

D_{cp} — средний диаметр витка обмотки [см];

U_s — периметр поперечного сечения обмотки [см].

При цилиндрическом расположении обмоток величину U_s с достаточной точностью можно принять равной удвоенной длине керна, D_{cp} же значительно меньше удвоенного диаметра поперечного сечения керна. При обычных соотношениях между длиной и диаметром керна, составляющих от 3 до 4, величина корня в выражении (33) будет около

$$\sqrt[4]{\frac{D_{cp}}{U_s}} = \frac{1}{1,5}.$$

Средний диаметр наружной обмотки высокого напряжения безусловно больше среднего диаметра обмотки в целом, определяющего среднюю длину U витка трансформатора. Таким образом, для самоиндукции фазовой обмотки получаем следующее выражение

$$L = 2,5 w^2 U 10^{-9} \text{ генри.}$$

Если речь идет о волне включения, то для волнового сопротивления следует иметь в виду индуктивность обеих фазовых обмоток. Для блуждающей волны от поля земли надо учитывать индуктивность всех трех фазовых обмоток и кроме того еще и индуктивность пути, проходимого током в земле.

¹⁾ E. T. Z. 1917 стр. 521.

Так как ранее для емкостей мы получили слишком большие значения, то целесообразно заменить уравнение (31) следующим

$$C = \frac{\epsilon l_s}{9 \cdot 10^{11}} \frac{U}{8 \pi \delta} \text{ фарад,}$$

а волновое сопротивление, так как теперь

$$L = 5 w^2 U 10^{-9} \text{ генри,} \quad (34)$$

считать равным

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L}{C}} = 336 w \sqrt{\frac{\delta}{\epsilon l_s}}. \quad (35)$$

В трансформаторах с масляным охлаждением мы имеем дело диэлектрическим коэффициентом масла и бумаги. Выражение корня в этом случае составляет, приблизительно, число порядка 10—2. Таким образом, приблизительно

$$Z_2 = 30 \text{ до } 40 w \quad (36)$$

Волновое сопротивление при атмосферных блуждающих волнах несколько меньше. Однако в наших расчетах мы получаем значительно большие волновые сопротивления, чем те, которые получаются при обычных количественных оценках.

Кроме того, чрезвычайно существенным оказывается тот факт, что волновое сопротивление обмотки зависит, главным образом, от числа витков. При заданной мощности это сопротивление пропорционально номинальному напряжению. При заданном же номинальном напряжении оно уменьшается с уменьшением напряжения витка, которое в пределах одного типового ряда возрастает пропорционально квадратному корню из мощности.

65. ИНДУКТИВНОСТЬ ДРОССЕЛЬНОЙ КАТУШКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МОЩНОСТИ И ОТ НАПРЯЖЕНИЯ.

Можно грубо определить потребную величину индуктивности защитной дроссельной катушки. Определив волновое сопротивление обмотки трансформатора, мы можем использовать уравнение (30), предварительно представив его в соответствующем виде.

Подставив для большей надежности

$$Z_2 = 40 w,$$

получим искомое L_d из уравнения (30)

$$L_d = \frac{80 w \cdot U}{v \Delta e_s} E \text{ генри,}$$

где:

w — число витков защищаемой фазовой обмотки;

U — средняя длина витка трансформатора [см];

E — напряжение приходящей, еще не отраженной волны [вольт];

v — скорость распространения волны [см/сек.];

Δe_s — допустимое напряжение между двумя соседними витками.

Задачей дроссельной катушки является сглаживание фронта волны. Что происходит с этой сглаженной волной в обмотке трансформатора — особая проблема. Учение об эксплуатации должно искать некую равнодействующую между требованиями конструктора, желающего избегать дорогих конструкций, с одной стороны, и стремлениями

НТБ
ДНУЗТ

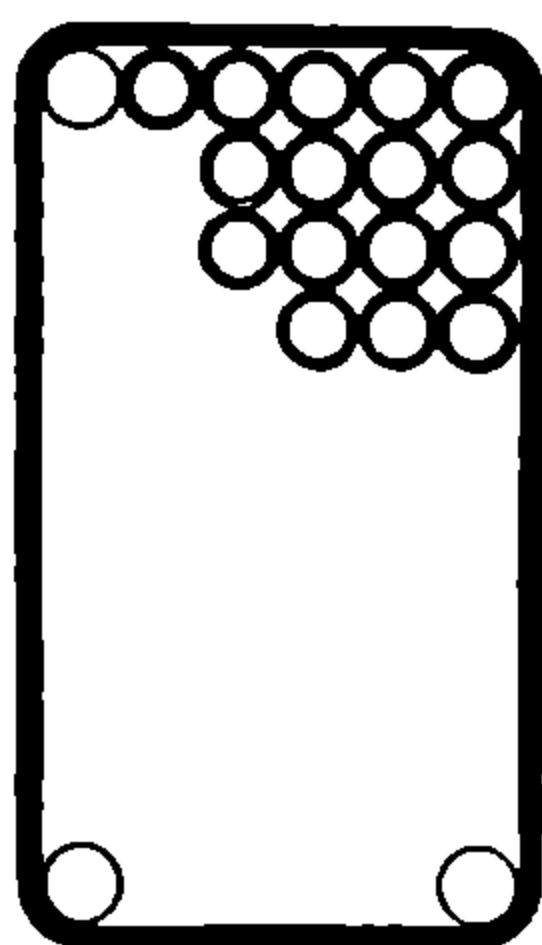
эксплоатационного инженера к дешевым дросселям и в то же время незначительным добавочным падением напряжения, с другой стороны.

Обмотка трансформатора продолжает сглаживание волн. Таким образом речь идет о безопасности для входных витков. Эксплоатационный инженер должен требовать особенной, более прочной изоляции входных витков, а еще лучше выполнения их в виде отдельных входных катушек. Против такого требования конструктор не может возражать. Трансформаторы без хорошо изолированных входных катушек (составляющих хотя бы незначительную часть обмотки) — неприемлемы.

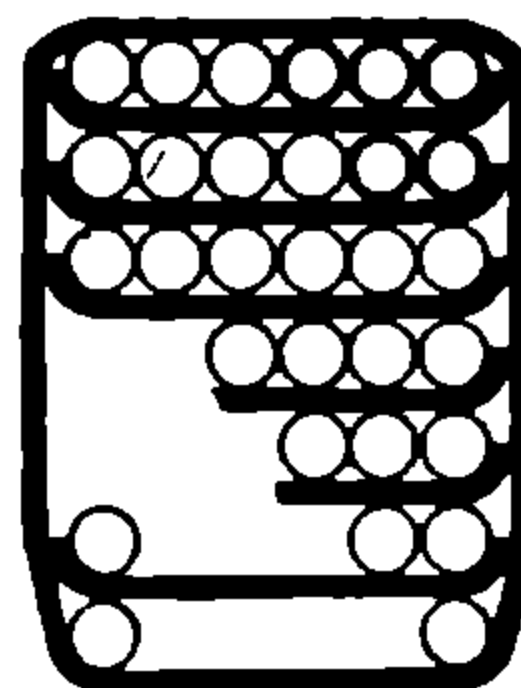
Изоляция входных витков может быть рассчитана на 100-кратное нормальное напряжение между витками. Например, мощный трансформатор на 15 000 kVA строится с напряжением между соседними витками в 50 V. Таким образом, изоляция между соседними входными витками должна быть рассчитана на 5 000 V что относительно не трудно выполнить. Трансформатор мощностью в 100 kVA имеет при нормальной эксплуатации напряжение между витками в 4 V. Его можно построить с изоляцией между витками, рассчитанной на 400 V.



Фиг. 93.



Фиг. 94.



Фиг. 95.

Входные катушки мощного трансформатора, разумеется, существенно отличаются от входных катушек трансформатора мощностью в 100 kVA. В первом — катушки однорядные (фиг. 93). Таким образом каждый виток подвержен действию лишь предыдущего витка. В маломощных конструкциях — катушки многорядные. В одном слое расположено много витков так, что между двумя соседними витками (фиг. 94) — различные напряжения. Следовательно, входные катушки маломощных трансформаторов должны иметь не только прочную изоляцию между витками, но и между слоями (фиг. 95).

Несмотря на это, защитные дроссели должны быть рассчитаны на 100-кратное напряжение между витками 100 *we* (вольт). Для большей безопасности примем напряжение приходящей волны равным 2,5-кратному фазовому напряжению при нормальной эксплуатации

$$E = 2,5 w e_b.$$

Принимая скорость распространения волны

$$v = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек},$$

получаем простое выражение

$$L_d = 0,2 \left(\frac{w}{1000} \right)^2 \left(\frac{U}{3} \right) \text{ миллигенри} \quad (37)$$

НТБ
ДНУЗТ

Уравнение преднамеренно приведено к этому виду. Ясно, что последний множитель несколько больше среднего диаметра витков трансформатора и в то же время почти в точности равен среднему диаметру обмотки высокого напряжения (расположенной при цилиндрической обмотке, как известно, снаружи). Это выражение сильно напоминает собою выведенную в предыдущем параграфе формулу для индуктивности дроссельной катушки без железа. В действительности уравнение (33) при

$$D_{\text{ср}} = U_x$$

переходит в уравнение

$$L_d = 10,5 \left(\frac{w}{1000} \right)^2 D_{\text{ср}} \text{ миллигенри} \quad (33a)$$

На деле защитные дроссели изготавливаются так, чтобы периметр поперечного сечения обмотки был, приблизительно, равен среднему диаметру дроссельной катушки. Таким образом уравнения (37) и (33a) дают полное представление о стоимости защитной дроссельной катушки. Расход на эту катушку составляет не больше 2% расхода на обмотку высокого напряжения. Таким образом покупная цена дроссельных катушек составляет лишь незначительную часть расходов на трансформатор. Против такого решения вопроса не возразит и эксплуатационный инженер.

При помощи уравнения (37) легко получить и мощность этой катушки. При заданной мощности индуктивность катушки возрастает пропорционально квадрату напряжения. Правда, при данной мощности тот же керн для большего напряжения окажется недостаточным. Однако, увеличенные размеры керна обуславливают собой не только меньшее число витков, но кроме того еще и большую среднюю длину витка. Здесь, как мы видим, получается некоторое взаимное уравновешивание величин. Это дает нам возможность прибегнуть к первоначальным допущениям.

При заданном напряжении потребная индуктивность защитной дроссельной катушки возрастает пропорционально средней длине витка, следовательно в пределах одного типового ряда — пропорционально корню четвертой степени из мощности. С другой стороны эта индуктивность уменьшается пропорционально квадрату нормального напряжения витка, т. е. пропорционально мощности.

Таким образом, получаем следующие два правила:

При заданной мощности потребная индуктивность защитной дроссельной катушки пропорциональна квадрату напряжения.

При данном напряжении потребная индуктивность защитной дроссельной катушки уменьшается пропорционально $\frac{3}{4}$ степени от мощности.

Остается рассмотреть этот вопрос на частном примере.

Пусть дан трансформатор с масляным охлаждением в 100 kVA и 10 000 V. Напряжение витка при нормальной эксплуатации у него составляет 4 V. В каждой фазовой обмотке у него будет

$$\frac{10\,000}{\sqrt{3} \cdot 4} = 1440 \text{ витков.}$$

Средняя длина витка будет, приблизительно, равна 70 см. Согласно уравнения (37) потребуется индуктивность

$$L_d = 0,2 \cdot 1,44^2 \cdot \frac{70}{3} = 10 \text{ миллигенри.}$$

Таким образом мы можем составить таблицу зависимости между напряжением, мощностью и величиной индуктивности защитной дроссельной катушки в миллигенри.

kVA	10	25	50	100	200	500	1 000
Вольт							
3 000	5,1	2,5	1,5	0,9	0,53	0,27	0,16
6 000	20,3	10	6	3,6	2,1	1,1	0,64
10 000	56,5	28,3	16,8	10	6,0	3,0	1,8
20 000	226	112	67	40	23,8	12	7,2
35 000	705	353	210	125	74,5	37	22,1

Сравнивая эти числа, безусловно не вытекающие из чрезмерных требований, с числами повседневной практики, мы обнаруживаем, что в громадном большинстве случаев трансформаторы почти не защищены. На очень многих малых трансформаторных станциях установлены защитные дроссели с 20, приблизительно, витками. Ясно, что такие дроссели совершенно неудовлетворительны.

В последние годы стали устанавливать дроссели с достаточной индуктивностью. Они значительно улучшили защиту трансформаторов, в чем автор успел убедиться из личного опыта. Одновременно с этим следует отметить, что и до сих пор индуктивность дросселей все еще недостаточна. Общие интересы конструктора и эксплуатационного инженера требуют, чтобы каждый трансформатор был, наконец, оборудован защитными приспособлениями, защищающими его в достаточной мере.

66. ПРОВЕРКА РАСЧЕТА НЕОБХОДИМОЙ ЗАЩИТНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ.

Против проведенного в предыдущем параграфе расчета защитной дроссельной катушки можно привести ряд возражений. Речь идет, конечно, не о неточностях, частично неизбежных, а частично введенных ради упрощения расчета. Возникают сомнения относительно правильности расчета, хотя он и соответствует обычным представлениям.

Однако всякие представления, укрепившиеся в сознании благодаря привычке, полезно время от времени критически пересмотреть. Проверка особенно полезна в данном случае, так как она дает более ясную картину проникновения блуждающей волны в обмотку.

Из уравнения (30) следует, что индуктивность защитной дроссельной катушки зависит от скорости распространения v блуждающей волны. В предыдущем параграфе v было попросту заменено скоростью света. Однако более чем вероятно, что скорость распространения волны в обмотке меньше скорости света. В этом случае рассчитанная индуктивность окажется недостаточной.

Скорость распространения в обмотке трансформатора поддается подсчету. Этот подсчет может быть произведен с той же точностью, с которой был произведен предыдущий подсчет. Для наших целей такой точности вполне достаточно. Скорость распространения волны, как известно, обратно пропорциональна квадратному корню из произведения самоиндукции и емкости единицы длины проводника. Самоиндукция и емкость всей обмотки подсчитана. На один сантиметр длины проводника падает $(w \cdot U)$ -ая часть этих величин, где w — число витков,

НТБ
ДНУЗТ

а U — длина одного витка в сантиметрах. Таким образом, мы получаем скорость распространения волны

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{U\omega} \frac{C}{U\omega}}} = 3,10^{10} \sqrt{\frac{8\pi\delta}{5\varepsilon l_s}}.$$

Так как

$$\frac{8\pi}{5} \cong 5,$$

а для трансформаторного масла

$$\varepsilon = 2,5$$

то можно принять

$$v = 3 \cdot 10^{10} \sqrt{\frac{2\delta}{l_s}}.$$

Расстояние δ между обеими обмотками, концентрически расположенными на одном керне, мало в сравнении с осевой длиной l_s цилиндра обмотки. Раньше мы приняли

$$\frac{l_s}{\delta} = 40.$$

Из сказанного мы видим, что скорость распространения волны в обмотке трансформатора, приблизительно, в 4 до 5 раз меньше скорости света.

Разумеется этот факт вносит сильное изменение в расчетную величину индуктивности защитной катушки, так как прежний расчет дает величину в 4—5 раз меньшую. Однако, к счастью, в том предположении будто обмотка трансформатора представляет собою попросту проводник с самоиндукцией и емкостью, равномерно распределенными вдоль его длины — в том предположении скрывается грубая ошибка.

Неверно, будто волновое сопротивление проводника обмотки остается неизменным от зажимов до нулевой точки и что тем самым волна, проникшая в обмотку, проходит по ней беспрепятственно. Волновое сопротивление начинает увеличиваться постепенно, по мере продвижения от зажимов и достигает своего полного вышеприведенного значения лишь тогда, когда волна доходит до конца обмотки. Это легко доказать.

Емкость, грубо говоря, распределена по обмотке равномерно. Каждая катушка обмотки имеет, приблизительно, одинаковую емкость относительно земли или относительно соседней фазовой обмотки. Не так обстоит дело с индуктивностью. До тех пор пока волна проходит через первый виток, она возбуждает магнитный поток, обусловливаемый током в одном витке. Как только волна проникает во второй виток — магнитодвижущая сила удваивается. Суммарный магнитный поток двух соседних витков равен в первом приближении удвоенному потоку одного витка.

При таком первом приближении индуктивность возрастала бы по ступенчатой кривой фиг. 96; эта индуктивность, отнесенная к единице длины проводника, была бы, приблизительно, пропорциональна числу витков, отсчитанному от зажимов.

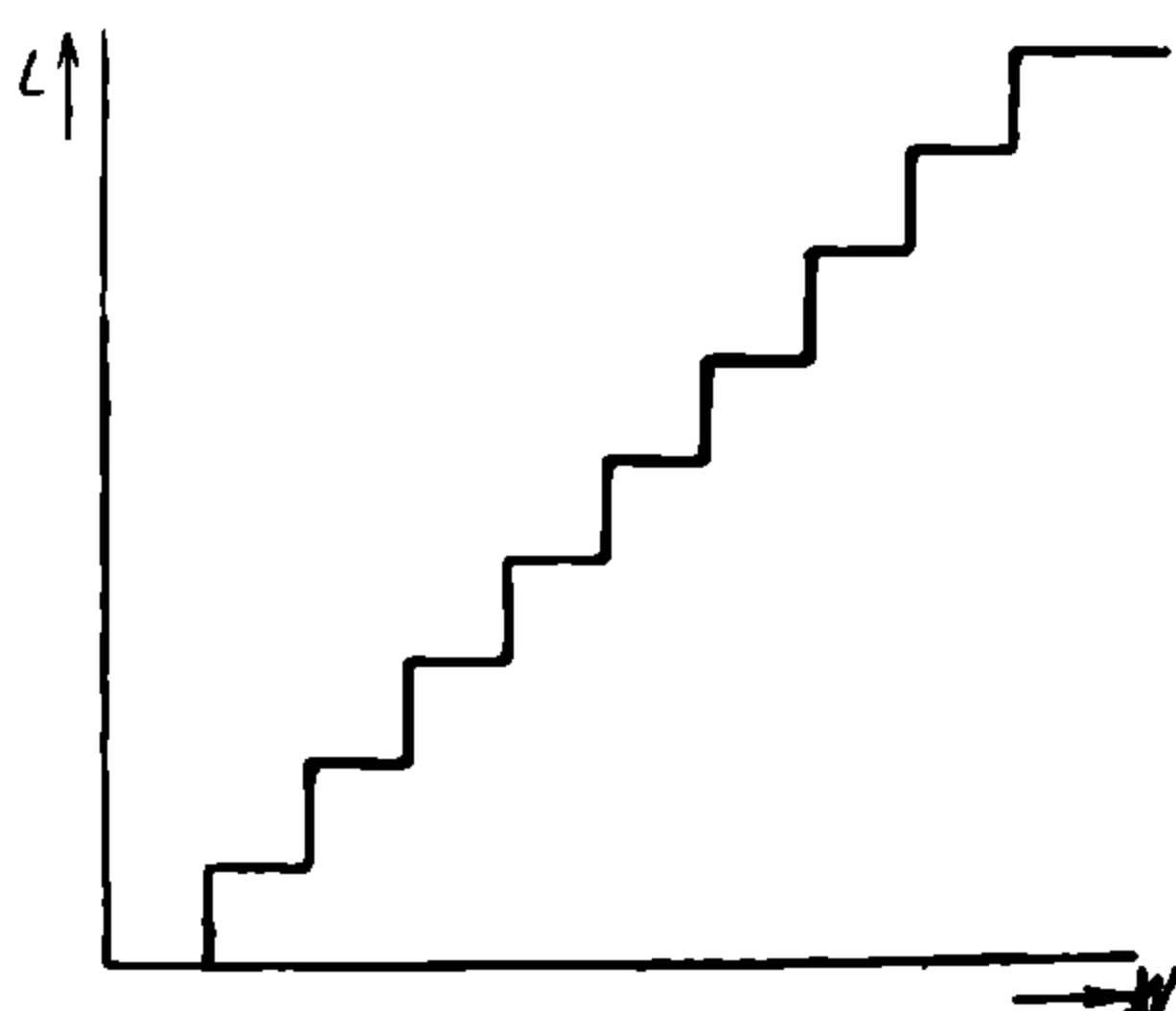
Приняв данные такого грубого допущения, мы значительно облегчили бы расчет индуктивности защитной катушки. Однако это явление следует значительно уточнить, ибо дело обстоит здесь не так уж просто.

ИНТЬ
ДНУЗТ

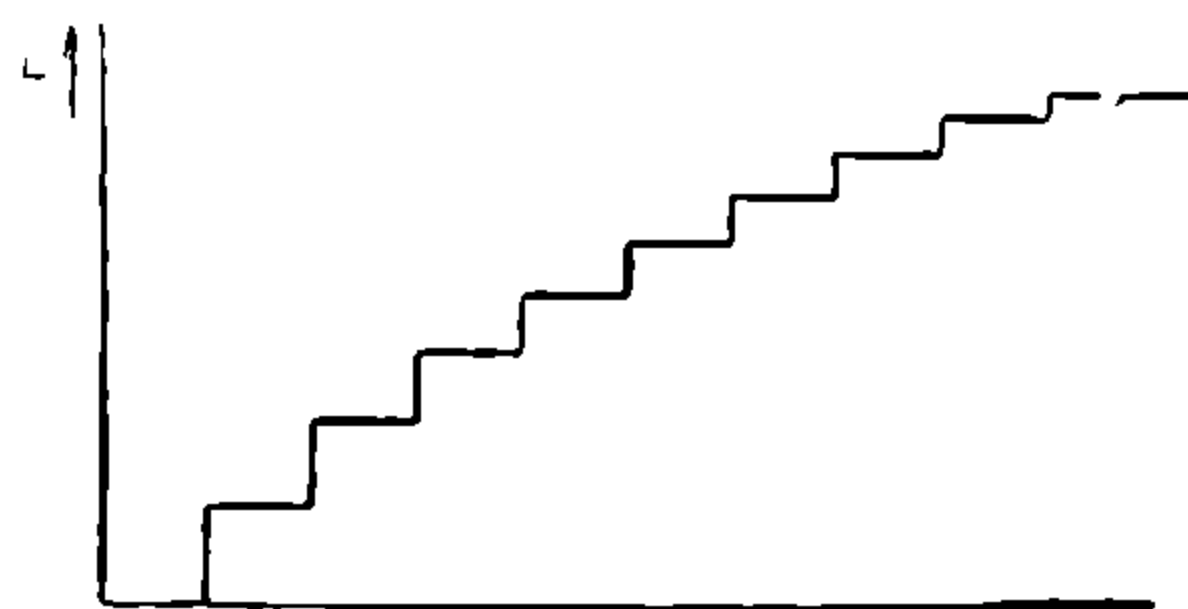
Суммарный магнитный поток многих витков составляет, правда, из магнитных потоков отдельных витков, однако, ему приходится преодолевать большее сопротивление. Длина индукционной линии возрастает. Она непрерывно возрастет по мере увеличения числа витков. Вместо картины, изображенной на фиг. 96, мы получим новую картину (фиг. 97).

Однако и в этом втором приближении картина представляется весьма благоприятной. Необходимо учесть еще то обстоятельство, что волна сглажена, что ток постепенно уменьшается и уже во втором витке он составляет, приблизительно, лишь половину тока первого витка. Индуктивность возрастает еще медленнее.

Вообще индуктивность проводника характеризуется магнитным потоком, замыкающимся вокруг этого проводника при прохождении в нем тока силой в один ампер. Здесь мы имеем особый случай, когда сила тока уменьшается вдоль длины проводника. Если в начале проходит ток в 1 ампер, то где-то в другом месте сила тока равна нулю.



Фиг. 96.



Фиг. 97.

Отсюда следует, что расчет индуктивности обмотки, приведенный в параграфе 64, верен лишь тогда, когда предположено наличие волны с крутым фронтом. При волне с прямолинейно падающим фронтом индуктивность будет составлять лишь половину так как следует рассчитывать по току у входа.

Сопоставление первоначальной грубой картины (фиг. 96) с действительной показывает, что ступенчатый характер возрастания индуктивности все же остается. При этом если принять суммарную индуктивность обмотки равной 100%, то для волны она представит около 41% своей величины.

Однако непостоянство индуктивности проводов обмотки этим не исчерпывается. При постепенном возрастании индуктивности по мере проникновения волны уменьшается постепенно скорость распространения волны. Именно в первых витках мы и имеем максимальную скорость распространения волны.

Все это исследование показывает, что потребная индуктивность защитной дроссельной катушки подсчитана нами с достаточным запасом. Нельзя отрицать и того, что здесь мы имеем дело с грубыми расчетами, дающими лишь приблизительное представление о порядке соответствующих величин. Лишь практические данные помогут составить окончательное мнение по этому вопросу.

НТБ
ДНУЗТ

Автор рекомендовал бы остановиться на величинах индуктивностей, подсчитанных в параграфе 65 и при этом требовать от конструктора 100-кратного запаса для изоляции входных витков.

Против приведенных подсчетов индуктивности защитных дросселей встречаются также и эксплуатационно-технические возражения, правда общего характера, но все же достойные быть упомянутыми. Как было упомянуто, эксплуатационному инженеру желательна не только дешевизна защитной дроссельной катушки, но и незначительность вызываемых ею падений напряжения.

Пусть трансформатору, мощностью в 100 kVA, линейного напряжения 10 000 V соответствует индуктивность защитной дроссельной катушки в 10 миллигенри. Номинальный ток трансформатора составляет:

$$\frac{100\,000}{\sqrt{3} \cdot 10\,000} = 6 \text{ A.}$$

Он расходует в дроссельной катушке

$$6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 18 \text{ вольт,}$$

что дает падение напряжения в

$$100 \frac{18 \sqrt{3}}{10\,000} = 0,3 \text{ \%}.$$

Против этого с точки зрения эксплуатационно-технической трудно было бы что-либо возразить.

При неизменном напряжении потребная защитная индуктивность падает пропорционально $\frac{3}{4}$ степени мощности. Номинальный ток возрастает, конечно, пропорционально мощности. Таким образом, удельное падение напряжения в дроссельной катушке будет увеличиваться пропорционально корню четвертой степени из мощности.

Нормальное удельное омическое падение напряжения трансформатора при возрастании мощности уменьшается. Эксплуатационный инженер будет с особенным вниманием следить за падением напряжения при растущей мощности. Он успел уже убедиться в том, что при увеличивающейся мощности защита дроссельными катушками становится все затруднительней. Однако он все же не допустит, чтобы защитный аппарат ухудшал условия эксплуатации.

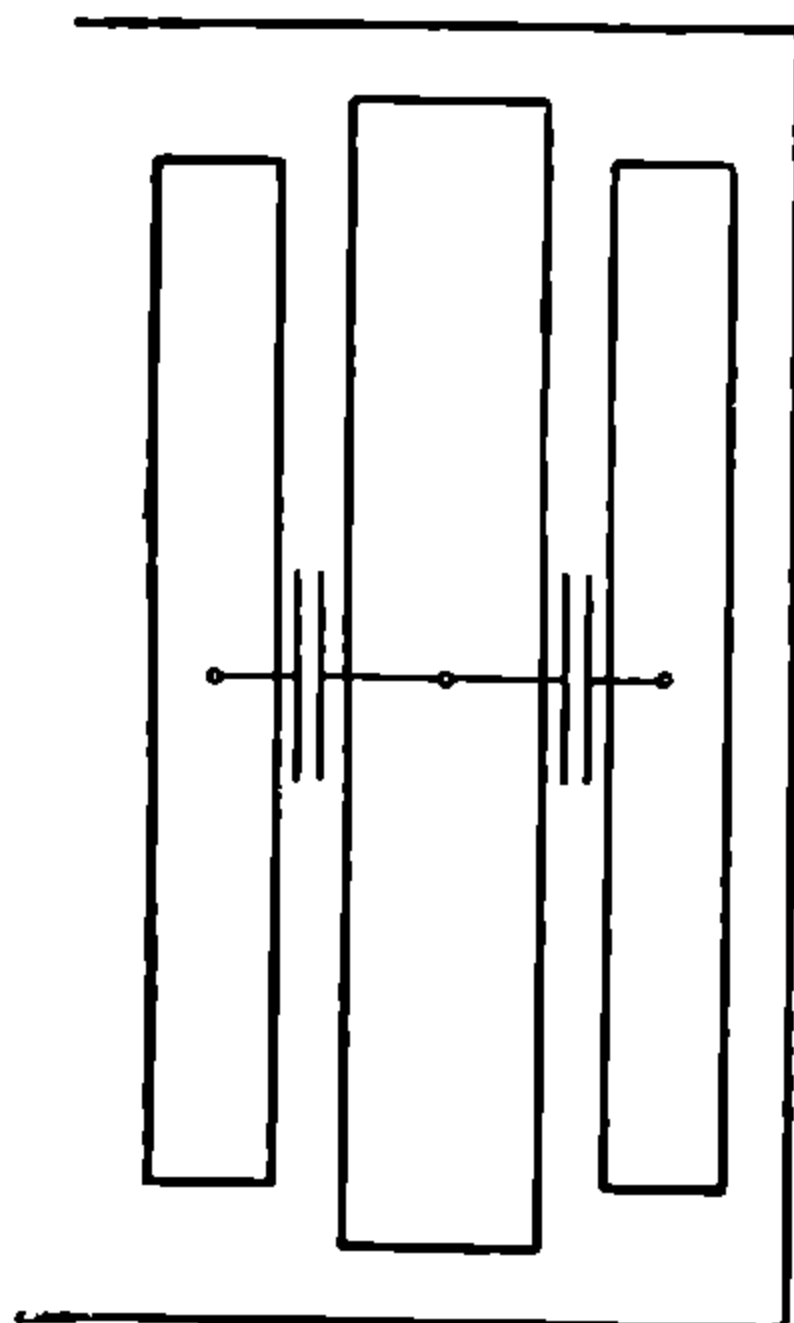
Омическое падение напряжения все же не является решающим. При увеличивающейся мощности должно увеличиться и напряжение короткого замыкания трансформатора. В исследованиях условий безопасности короткого замыкания (глава V) было доказано, что большие значения напряжений короткого замыкания не только желательны, но и неизбежны. Для этой цели удобно использовать защитную дроссельную катушку, увеличив ее индуктивность, а тем самым и безопасность короткого замыкания трансформатора.

К этому присоединяется и то обстоятельство, что в мощном трансформаторе можно относительно лучше осуществить изоляцию витков, чем в малом. Поэтому нет необходимости в том, чтобы уменьшать защитную индуктивность лишь пропорционально $\frac{3}{4}$ степени мощности, если мыслимо осуществить изоляцию входных витков больше, чем с 100-кратным запасом. Все же остается открытым вопрос о том, как разрешить эксплуатационно-технические трудности, связанные с индуктивностью защитной дроссельной катушки в случае очень больших мощностей.

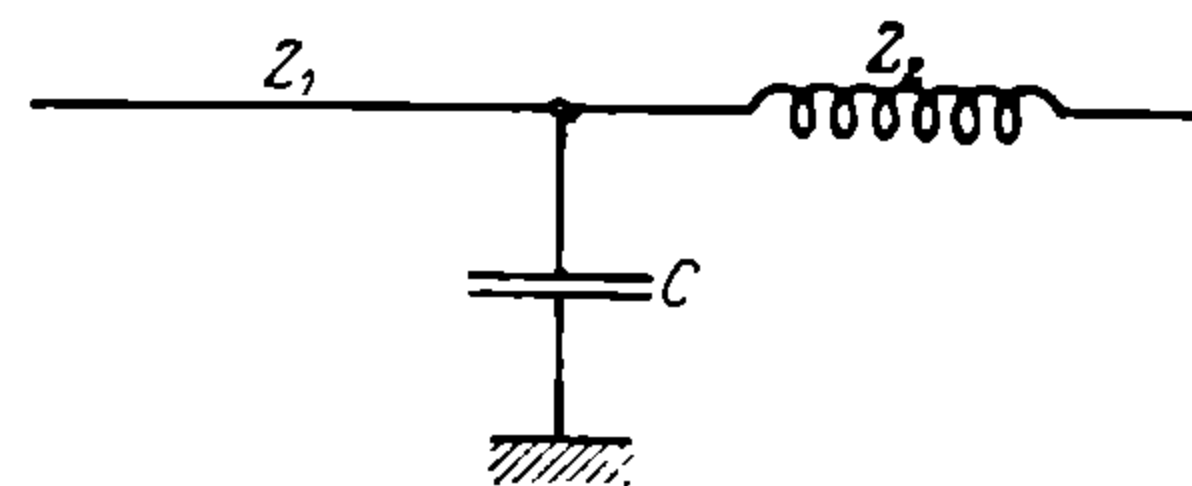
С другой стороны, при неизменной мощности потребная индуктивность защитной катушки возрастает пропорционально квадрату напряжения. Номинальный ток уменьшается, конечно, пропорционально напряжению. Удельное падение напряжения в дроссельной катушке останется неизменным.

67. ЗАЩИТНАЯ ДРОССЕЛЬНАЯ КАТУШКА И ЗАЩИТНЫЙ КОНДЕНСАТОР.

Не следует отказываться от использования дроссельной катушки в качестве защитного аппарата и при очень больших мощностях. Правда, падения напряжений в ней все более и более увеличиваются. Однако самому трансформатору приходится бороться с все возрастающими опасностями от короткого замыкания (см. глава V). Обычное цилиндрическое расположение обмоток становится по мере возрастания мощности все более и более трудно выполнимым и постепенно уступает место двойной цилиндрической обмотке. Однако при этом сразу меняется и величина индуктивности дроссельной катушки.



Фиг. 98.



Фиг. 99.

При двойном цилиндрическом расположении обмоток у обмотки высокого напряжения оказываются два «фронта» по отношению к обмотке низкого напряжения (фиг. 98); емкость относительно земли таким образом увеличивается вдвое. Суммарная емкость увеличивается почти во столько же раз. Одновременно с этим индуктивность обмотки остается неизменной. Таким образом, волновое сопротивление обмотки уменьшается на 41%, а вместе с ним и индуктивность дроссельной катушки.

Кроме того следует отметить, что междуобмоточное расстояние δ возрастает не так быстро, как длина керна. Это расстояние, в случае если его величина превзошла величину допустимую при данных условиях нагревания, зависит от напряжения. Таким образом решение вопроса еще более облегчается.

Наконец, при очень больших мощностях осуществляется еще большее разделение обмотки. Принято делить еще и обмотку высокого напряжения на два или больше цилиндра. В этих случаях индуктивность обмотки еще больше уменьшается. В частности при двух цилиндрах обмотки высокого напряжения индуктивность уменьшается вдвое.

Поэтому нет никакого основания заменять дроссельную катушку каким-либо другим защитным аппаратом.

В дополнение обзора этой весьма существенной проблемы следует рассмотреть еще и защитный конденсатор, служащий для окончательного сглаживания фронта волны.

Известно, что при помощи конденсаторов можно сглаживать волны так же, как и при помощи дроссельных катушек. Для этого необходимо конденсатор включить параллельно защищаемой обмотке (а не последовательно, как дроссельные катушки) (фиг. 99).

Если волна с крутым фронтом подходит к узловой точке под напряжением E , то она, конечно, частично отразится. Трудно сразу определить, имеет ли отраженная часть волны положительное или отрицательное напряжение ΔE . Это можно выявить лишь расчетом.

Согласно сказанному, на зажимах конденсатора имеем напряжение $E + \Delta E$. Разумеется на зажимах обмотки мы имеем это же напряжение

$$E_2 = E + \Delta E.$$

Через конденсатор проходит ток

$$i = C \frac{dE_2}{dt},$$

а в обмотке — ток

$$i_2 = \frac{E_2}{Z_2}.$$

От узловой точки кроме того течет ток отраженной волны

$$\Delta i_1 = \frac{\Delta E}{Z_1},$$

тогда как волна вызывает ток

$$i_1 = \frac{E}{Z_1} \text{ ампер,}$$

идуций к узловой точке.

Мы имеем, следовательно

$$\frac{E}{Z_1} = \frac{\Delta E}{Z_1} + \frac{E_2}{Z_2} = C \frac{dE_2}{dt},$$

и тем самым

$$E - \Delta E = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot E_2 + CZ_1 \frac{dE_2}{dt}.$$

Так как

$$E + \Delta E = E_2,$$

то мы получаем выражение

$$\frac{dE_2}{dt} + \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2 C} E_2 - 2 \frac{Z_2}{Z_1 Z_2 C} E = 0.$$

Это выражение в точности совпадает с выражением из параграфа 63, где описывается действие дроссельной катушки при том предположении, конечно, что

$$Z_1 \cdot Z_2 \cdot C = L_d.$$

Отсюда следует вывод, что ту же в точности защиту обмотки можно осуществить емкостью, вместо индуктивности. Эта емкость должна быть равна

$$C_k = \frac{L_d}{Z_1 Z_2}$$

Следует принять

$$Z_1 = 500 \text{ омов.}$$

Кроме того волновое сопротивление обмотки трансформатора можно считать равным

$$Z_2 = 40 \text{ в.}$$

На основании уравнения (37) получаем необходимую защитную емкость

$$C_k = \left(\frac{w}{1000} \right) \left(\frac{U}{3} \right) 10^{-5} \text{ микрофарад.}$$

Пример. 100 кВЛ-ный трансформатор в последнем примере имел при рабочем напряжении в 10 000 В индуктивность дроссельной катушки в 10 миллигенри. Эту катушку с таким же успехом можно заменить емкостью равной

$$C_k = \left(\frac{1440}{1000} \right) \left(\frac{70}{3} \right) 10^{-5} = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ микрофарад.}$$

Конденсатор вызовет на зажимах защищаемой обмотки напряжение, изменяющееся в зависимости от времени, по следующему закону

$$E_2 = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} E \left[1 - \varepsilon - \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2 C} t \right],$$

как это видно из сравнения с соответствующим уравнением параграфа 63.

Напряжение отраженной части волны составляет

$$\Delta E = E_2 - E,$$

или

$$\Delta E = E \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right] - \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} E \varepsilon - \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2 C} t.$$

В первый момент приближения волны к узловой точке, т. е. при

$$t = 0$$

имеем

$$\Delta E = -E,$$

т. е. волна в этот момент совершенно уравнивает напряжение линии. Дроссельная катушка действует как-раз противоположным образом, она удваивает напряжение в начальный момент. Поэтому при дроссельных катушках в момент набегания волны искровые разрядники начинают действовать, тогда как при конденсаторах этого не наблюдается.

Не без основания в качестве аппаратов защиты от перенапряжения предпочитают дроссели. Для отведения нежелательных зарядов имеются разрядники. Кроме того последние могут быть в трехфазных

НТБ
ДНУЗТ

сетях использованы не только для отведения заряда в землю (соединение разрядников звездой), но и уничтожения его между фазами (соединение треугольником).

Дроссели хорошо сглаживают как блуждающие волны, вызванные процессом включения и выключения, так и волны, возникающие при атмосферных явлениях. Конденсатор, присоединенный к зажимам обмотки, при атмосферных блуждающих волнах должен был бы находиться между зажимом обмотки и землей.

Все эти обстоятельства дают дроссельной катушке неоспоримое преимущество. Она с успехом выполняет свои задачи: необходимо лишь уточнить ее расчет. Существует еще ряд добавочных явлений, которые должны быть безусловно учтены.

68. СГЛАЖИВАНИЕ КОНЦА БЛУЖДАЮЩЕЙ ВОЛНЫ ПОСРЕДСТВОМ ЗАЩИТНОЙ ДРОССЕЛЬНОЙ КАТУШКИ.

Эксплуатационный инженер неизбежно наталкивается еще на одно затруднение, которое при недостаточном анализе действия дроссельной катушки может оказаться нерассмотренным. Фронт волны хорошо сглаживается дроссельной катушкой, и этим устраняется возможность возникновения больших напряжений между витками трансформаторной обмотки. Однако, что произойдет тогда, когда конец волны дойдет до узловой точки? Не возникают ли те же трудности при внезапном исчезновении напряжения, как и при его внезапном возникновении?

Все эти возникшие вопросы следует исчерпывающе разрешить. Абсолютно необходимо, чтобы конец волны сглаживался так же, как и ее начало. Остается лишь рассмотреть, потребуются ли для этой цели какие-либо специальные приспособления.

Когда конец прямоугольной блуждающей волны достигает дроссельной катушки (рассматриваемой как сосредоточенная индуктивность), то заряд распределяется согласно фиг. 100. Волна, идущая обратно в линию, у самой катушки имеет еще лишь небольшое напряжение ΔE , суммирующееся с первоначальным напряжением E входящей волны. Эта сумма дает напряжение E_2 и представляет собою напряжение волны, идущей по направлению к обмотке трансформатора. Ток в катушке пропорционален напряжению

$$E_2 = E + \Delta E.$$

Из фиг. 100 видно, что ток, в момент приближения волны к дроссельной катушке, сначала быстро возрастает, а затем постепенно уменьшается до предписанных предельных значений. Поэтому напряжение дроссельной катушки все более и более уменьшается.

Однако набегание конца волны стремится внезапно прекратить ток, что снова вызывает почти прекратившееся действие индуктивности. Последняя не позволяет току i_2 исчезнуть. Несомненно, после набегания конца блуждающей волны, ток i_2 может уменьшиться за время dt лишь в такой мере, в какой это окажется возможным при индуктировании напряжения самоиндукции E_2 , т. е.

$$-L_a \frac{di_2}{dt} = E_2,$$

при чем мы имеем

$$i_2 = \frac{E_2}{Z_2}.$$

Это дает нам выражение

$$i_2 Z_2 + L_d \frac{di_2}{dt} = 0,$$

показывающее, что ток падает с максимального значения $i_{2\max}$ по экспоненциальной кривой

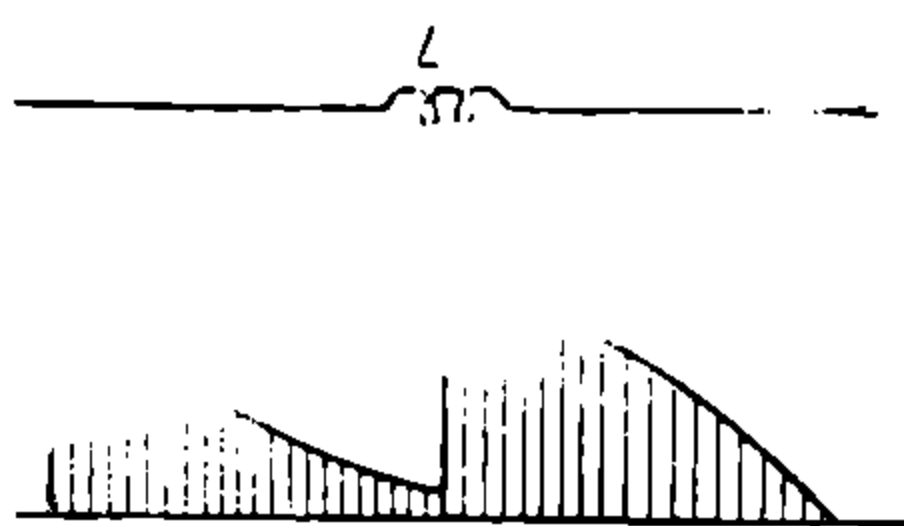
$$i_2 = i_{2\max} \cdot e^{-\frac{Z_2}{L_d} t}.$$

Это, конечно, справедливо и для напряжения

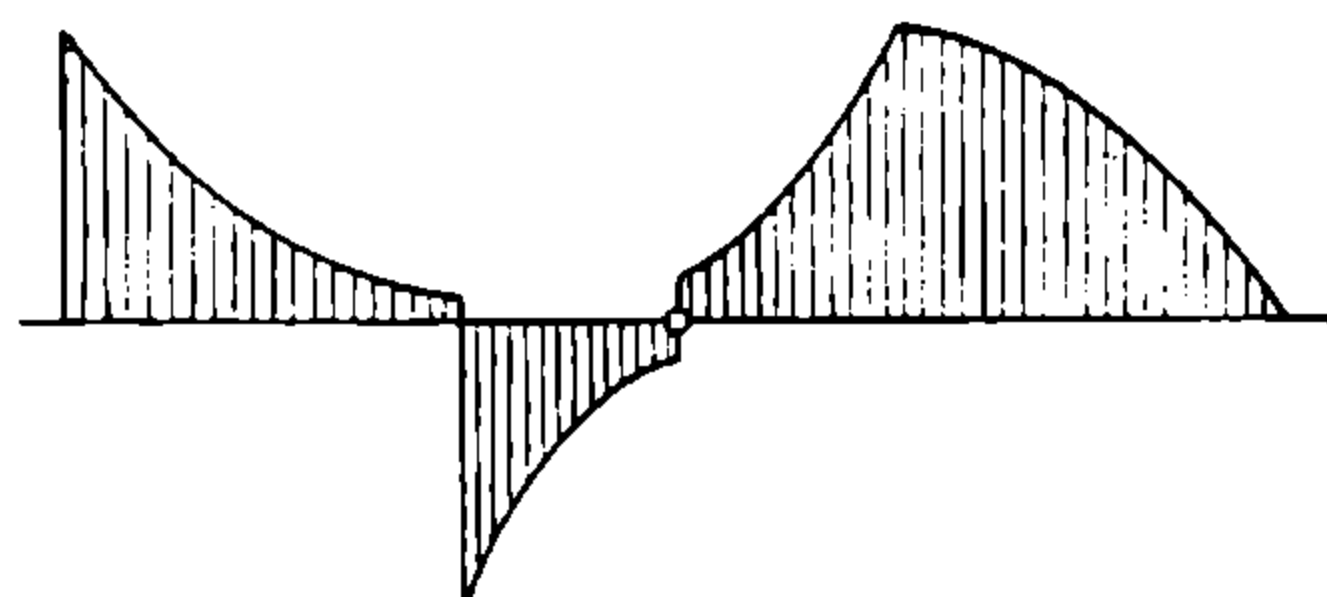
$$E_2 = E_{2\max} e^{-\frac{Z_2}{L_d} t}.$$

Спустя некоторое время после проникновения конца волны мы получим картину, изображенную на фиг. 101. В результате действия дроссельной катушки возникает добавочная волна, идущая из дроссельной катушки в обе стороны за главной волной. Разумеется заряды этих двух частичных добавочных волн составляют в сумме нуль, так как они не появились откуда-либо извне. Заряды же обеих частей главной волны суммируются в первоначальную волну (фиг. 101).

Нет основания опасаться крутого конца волны. Дроссельная катушка сглаживает конец волны по тому же закону, как и ее начало.



Фиг. 100.



Фиг. 101.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что волна, отраженная дроссельной катушкой, отличается по своим очертаниям от входящей волны. Эта отраженная волна несколько напоминает синусоидальную волну длиной в целый период. Если подобная волна снова отразится от конца линии, то при возвращении ее к дроссельной катушке мы будем иметь несколько другой характер явления. Из дальнейшего мы увидим, что это обстоятельство может приобрести и практическое значение.

Существенней тот факт, что дроссельная катушка, наряду с индуктивностью, обладает и известной емкостью, которую до сих пор мы не учитывали. Эта емкость может оказаться довольно значительной, так как довольно значительной является и длина провода дроссельной катушки. Нельзя, поэтому, обойти вопроса о том, не вызовет ли это обстоятельство каких-либо нежелательных добавочных явлений, которые могли бы свести на-нет все значение предыдущих исследований.

69. РАЗМЕРЫ ДРОССЕЛЬНОЙ КАТУШКИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЕЕ ЕМКОСТИ.

Теорию защитной дроссельной катушки можно без особых трудностей углубить, если учесть и размеры проводника дроссельной катушки, а тем самым и безусловно имеющуюся, хотя и ненужную емкость. При этом оказывается, что это углубление вопроса имеет боль-

НТБ
ДНУЗТ

шое значение для учения об эксплуатации трансформатора. Это исследование обращает наше внимание на возможные, к сожалению, нередкие опасные ошибки.

Разумеется, задавшись любым волновым сопротивлением дроссельной катушки, можно очень просто провести это исследование. Но картина будет гораздо нагляднее, если принять, что индуктивность дроссельной катушки достаточно велика.

В параграфе 65 мы не только подсчитали потребную индуктивность L_a дроссельной катушки, но также и указали, что определенной частью этой индуктивности будет являться индуктивность обмотки трансформатора, примененной в качестве дроссельной катушки. Для уяснения этого сравним волновые сопротивления обмотки трансформатора и дроссельной катушки.

Разумеется поперечное сечение обмотки дроссельной катушки отличается по величине от поперечного сечения обмотки трансформатора. Дроссельную катушку изготовляют возможно меньших размеров, следовательно, с возможно меньшим внутренним диаметром. Полезно подобрать величины так, чтобы средний диаметр витка оказался бы, приблизительно, равным периметру поперечного сечения обмотки (фиг. 102).

Отсутствие железного ядра у дроссельной катушки делает возможным выполнение подобной конструкции. Однако, именно это отсутствие железного ядра и, кроме того, отсутствие обмотки низкого напряжения делает емкость C_a дроссельной катушки незначительной в сравнении с емкостью обмотки трансформатора.

Вообще индуктивность защитной дроссельной катушки, отнесенная к единице длины проводника, меньше индуктивности обмотки трансформатора, отнесенной к единице длины его проводника, несмотря на то, что у дроссельной катушки средняя длина витка меньше. В параграфе 65 было указано, что обмотка трансформатора, примененная в качестве дроссельной катушки, будет иметь индуктивность в 50 раз большую, чем это необходимо. Уменьшив длину ее витка на одну треть, для дроссельной катушки все же окажется возможным взять число витков в 4 раза меньшее. В этом случае индуктивность дроссельной катушки на единицу длины проводника уменьшится, приблизительно, в 4 раза.

Подсчитав емкость обмотки трансформатора, мы тотчас же убедимся, что в дроссельной катушке следует ожидать очень малые значения емкости. Дело не только в отсутствии железного ядра и обмотки низкого напряжения, но также и в том, что фазовые дроссели расположены друг от друга дальше фазовых обмоток трансформатора. Емкость дроссельной катушки, отнесенная к единице длины проводника, будет составлять лишь незначительную часть емкости обмотки трансформатора, во всяком случае, значительно меньшую четверти этой емкости.

Отсюда следует, что волновое сопротивление дроссельной катушки

$$Z_a = \sqrt{\frac{L_a}{C_a}},$$

при правильно выбранной индуктивности, будет значительно больше волнового сопротивления обмотки защищаемого трансформатора. При первоначальном рассмотрении идеального случая волновое сопротивление дроссельной катушки было бесконечно большим. Но оно, разумеется, больше волнового сопротивления присоединяемой линии передачи.

Предстоит рассмотреть последовательное соединение линии передачи с волновым сопротивлением Z_1 дроссельной катушки с волновым сопротивлением Z_d и обмотки трансформатора с волновым сопротивлением Z_2 , при чем, как мы указали

$$Z_1 < Z_d > Z_2.$$

Из линии передачи набегают прямоугольная блуждающая волна с крутым фронтом при напряжении E . Подойдя к началу дроссельной катушки, она безусловно частично отразится, и таким образом в сеть уходит частичная волна из напряжения ΔE . На зажиме дроссельной катушки напряжение увеличивается до $E + \Delta E$.

Набегающая волна дает ток

$$\frac{E}{Z_1}.$$

В дроссельной катушке проходит ток

$$\frac{E + \Delta E}{Z_d}.$$

Ток, отходящий обратно в сеть, будет равен

$$\frac{\Delta E}{Z_1}$$

Выражение

$$\frac{E}{Z_1} = \frac{E + \Delta E}{Z_d} + \frac{\Delta E}{Z_1}$$

дает коэффициент отражения

$$\alpha = \frac{\Delta E}{E} = \frac{Z_d - Z_1}{Z_d + Z_1}$$

и коэффициент преломления

$$\beta = \frac{E + \Delta E}{E} = \frac{2Z_d}{Z_d + Z_1}$$

Так как обычно Z_d велико в сравнении с Z_1 , то дело доходит почти до удвоения напряжения перед дроссельной катушкой.

Преломленная волна проходит в дроссель под напряжением

$$E + \Delta E = E \frac{2Z_d}{Z_d + Z_1}.$$

Выйдя из дроссельной катушки, эта волна подходит к обмотке трансформатора с волновым сопротивлением Z_2 , где она преломляется снова.

На этот раз коэффициент отражения

$$\alpha_2 = \frac{Z_2 - Z_d}{Z_2 + Z_d}$$

будет отрицательным, так как

$$Z_d > Z_2.$$

Волна, отраженная обратно к дроссельной катушке, имеет отрицательное напряжение

$$\alpha_2 \beta E = - E \frac{2Z_d}{Z_d + Z_1} \cdot \frac{Z_d - Z_2}{Z_d + Z_2}.$$

В обмотку трансформатора проходит волна, с коэффициентом преломления

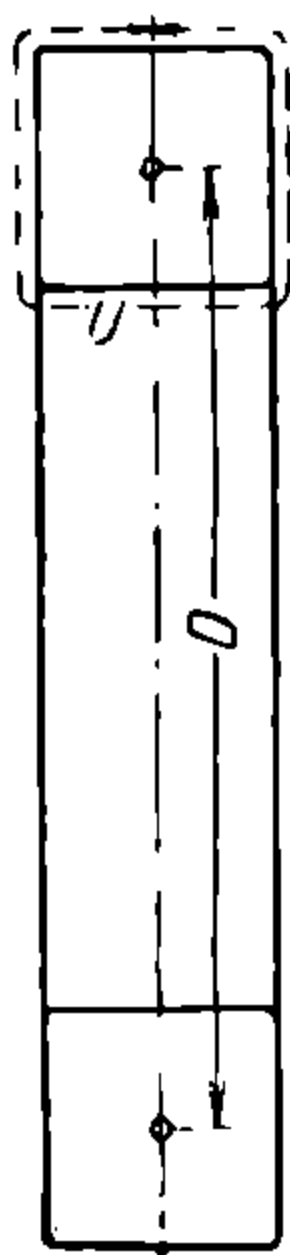
$$\beta_2 = \frac{E_2}{E + \Delta E} = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_d},$$

под напряжением в

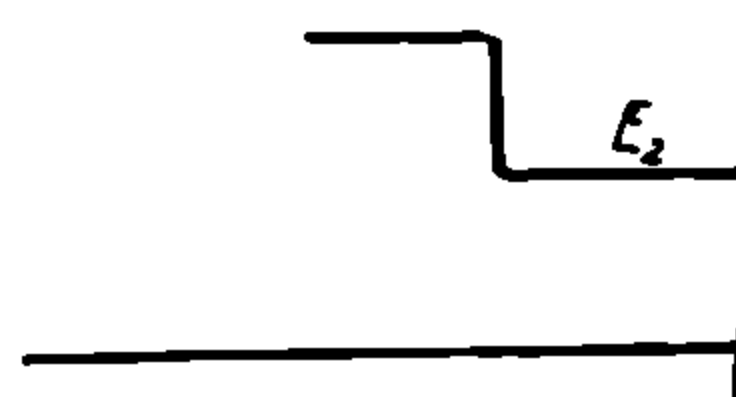
$$E_2 = \beta_2 (E + \Delta E) = \beta \beta_2 E = \frac{4 Z_2 Z_d}{(Z_1 + Z_d)(Z_2 + Z_d)} E.$$

Таким образом получаем первую ступень волны, изображенную на фиг. 103.

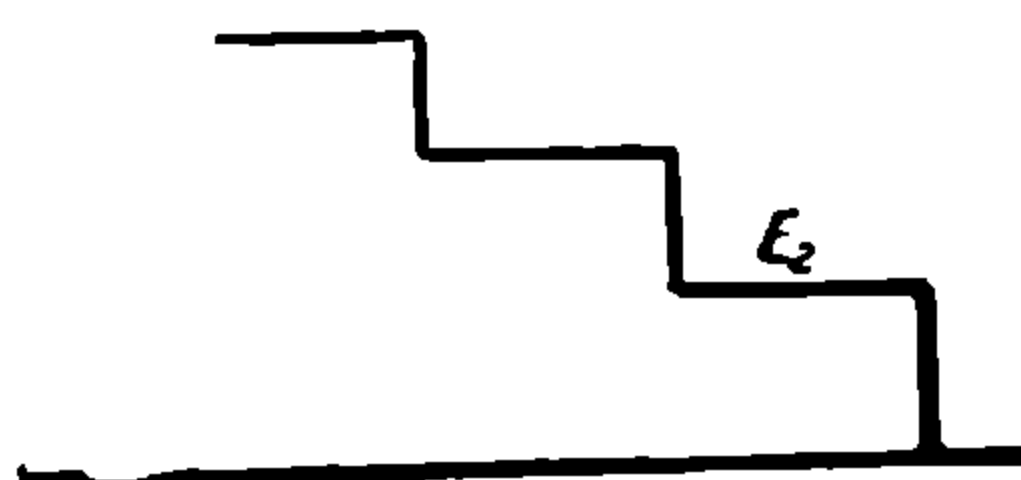
Этим явление не исчерпывается. Необходимо проследить движение частичной волны, отраженной обратно к дроссельной катушке. У входного зажима катушки эта волна встречает волновое сопротивление Z_1 линии передачи, где она преломляется и частично отражается.



Фиг. 102.



Фиг. 103.



Фиг. 104.

Снова имеем коэффициент отражения

$$\alpha_1 = \frac{Z_1 - Z_d}{Z_1 + Z_d},$$

который будет, очевидно, отрицательным, и коэффициент преломления

$$\beta_1 = \frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_d}$$

В линию передачи движется преломленная частичная волна

$$\beta_1 \cdot \alpha_2 \cdot \beta \cdot E,$$

а в дроссельной катушке отразится частичная волна

$$\alpha_1 \alpha_2 \beta \cdot E,$$

которая снова будет иметь положительное напряжение, так как α_1 и α_2 — отрицательны. В это время преломленная основная волна продолжает, конечно, поступать из линии через дроссель в обмотку трансформатора.

Для последней в дальнейшем имеет непосредственное значение лишь частичная волна, отраженная к дроссельной катушке. Она подхо-

дит к зажимам обмотки, снова преломляется и частично отражается. Коэффициенты преломления и отражения уже известны. В обмотку проходит вторая преломленная волна

$$\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \beta \cdot \beta_2 E;$$

она перекрывается преломленной основной волной, начало которой успело уже продвинуться на удвоенную длину проводника дроссельной катушки в том случае, если в обмотке трансформатора волны распространяются с той же скоростью, что и в дроссельной катушке. Таким путем возникает вторая ступень напряжения, изображенная на фиг. 104.

Волна, снова отраженная в дроссельную катушку со стороны ее выходного зажима, имеет отрицательное напряжение

$$\alpha_1 \cdot \alpha_2^2 \cdot \beta \cdot E.$$

Эта волна отразится снова у входного зажима с напряжением

$$\alpha_1^2 \cdot \alpha_2^2 \cdot \beta \cdot E.$$

Дойдя до выходного зажима, последняя преломится и под напряжением в

$$\alpha^2 \cdot \alpha_2^2 \cdot \beta \cdot \beta_2 E$$

пойдет в обмотку. Эта волна накладывается на две уже проникших волны, при чем начало ее будет находиться от начала второй волны на том же расстоянии, на котором последняя будет находиться от начала основной волны.

Мы видим, что в защищаемой обмотке напряжение возрастает ступеннеобразно (фиг. 105). Напряжение отдельных ступеней составляет

$$\begin{aligned} & \beta \cdot \beta_2 E, \\ & \beta \cdot \beta_2 \cdot E \alpha_1 \cdot \alpha_2, \\ & \beta \cdot \beta_2 E \cdot (\alpha_1 \cdot \alpha_2)^2, \\ & \beta \cdot \beta_2 E \cdot (\alpha_1 \cdot \alpha_2)^3, \\ & \beta \cdot \beta_2 E \cdot (\alpha_1 \cdot \alpha_2)^{n-1}, \end{aligned}$$

а суммарное напряжение будет равно

$$\begin{aligned} E_2 &= \beta \beta_2 E \left[1 + \alpha_1 \cdot \alpha_2 + (\alpha_1 \cdot \alpha_2)^2 + \dots + (\alpha_1 \alpha_2)^{n-1} \right] = \\ &= \beta \beta_2 E \frac{1 - (\alpha_1 \alpha_2)^n}{1 - (\alpha_1 \alpha_2)}. \end{aligned}$$

Нетрудно убедиться, что

$$\frac{\beta \beta_2}{1 - \alpha_1 \alpha_2} = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2},$$

и, таким образом, суммарное напряжение n отдельных ступеней будет составлять

$$E_2 = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} E \left[1 - (\alpha_1 \alpha_2)^n \right]$$

Предельное значение напряжения волны в защищаемой обмотке будет

$$E_{2 \max} = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} E.$$

Точно такую же величину имело и предельное значение по расчету, приведенному в 63 параграфе, где мы принимали индуктивность сосредоточенной и пренебрегали емкостью дроссельной катушки. Кроме того, картина сглаженного фронта волны в обмотке трансформатора по фиг. 105 совершенно аналогична идеальной картине по фиг. 86.

Можно определить нарастание напряжения в любом месте сглаженной волны. Для этой цели удобнее всего заменить ступенчатую кривую (фиг. 105) кривой, соединяющей вершины ступеней (фиг. 106). Наиболее резкое нарастание напряжения (так же, как и в случае идеального сглаженного фронта волны) мы будем иметь непосредственно у начала волны. Для возможности сравнения величин примем, что волна движется как в обмотке, так и в дроссельной катушке со скоростью v . Тогда при w_d витках в дроссельной катушке и средней длине витка U_d , получим длину ступени $2 w_d \cdot U_d$ сантиметров.

В первой ступени напряжения, равной

$$\frac{4 Z_2 Z_d}{(Z_1 + Z_d)(Z_2 + Z_d)} E$$

получим падение напряжения

$$\frac{2 Z_2 E}{Z_d w_d U_d} \frac{1}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_d}\right) \left(1 + \frac{Z_2}{Z_d}\right)}$$

или, так как

$$Z_d = \sqrt{\frac{L_d}{6}} \quad \text{и} \quad v = \frac{w_d U_d}{\sqrt{L_d \cdot C_d}},$$

то

$$\frac{2 Z_2 E}{L_d \cdot v} \frac{1}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_d}\right) \left(1 + \frac{Z_2}{Z_d}\right)} \text{ вольт/см.}$$

Сравнивая эти результаты с результатами параграфа 63, мы легко обнаруживаем, что нарастание напряжения уменьшилось в

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_d}\right) \left(1 + \frac{Z_2}{Z_d}\right)} \text{ раз.}$$

Это не дает большой пользы, так как сопротивление волны Z_d сильно преобладает. Кроме того, сказываются и отрицательные стороны внезапного возникновения ступеней напряжения. Следует все же отметить, что при

$$Z_d = \infty$$

исчезает всякое различие. Это подтверждает правильность расчета и кроме того показывает, что в обоих случаях речь идет об аналогичных явлениях.

С установлением этого факта, очевидно, можно считать исследование защитной дроссельной катушки исчерпанным. Однако, не следует упускать из виду тот существенный факт, что все окажется в порядке лишь в том случае, если выполнено неравенство

$$Z_1 < Z_d > Z_2.$$

Правда, при невыполнении этого условия в ходе расчета ничто не меняется. Полученные величины сохраняют, вообще говоря, свое значение. Но при этом могут возникнуть большие затруднения в эксплуатации, а потому эти случаи необходимо рассмотреть.

НТБ
ДНУЗТ

Во-первых, возможен случай, при котором

$$Z_1 < Z_d < Z_2,$$

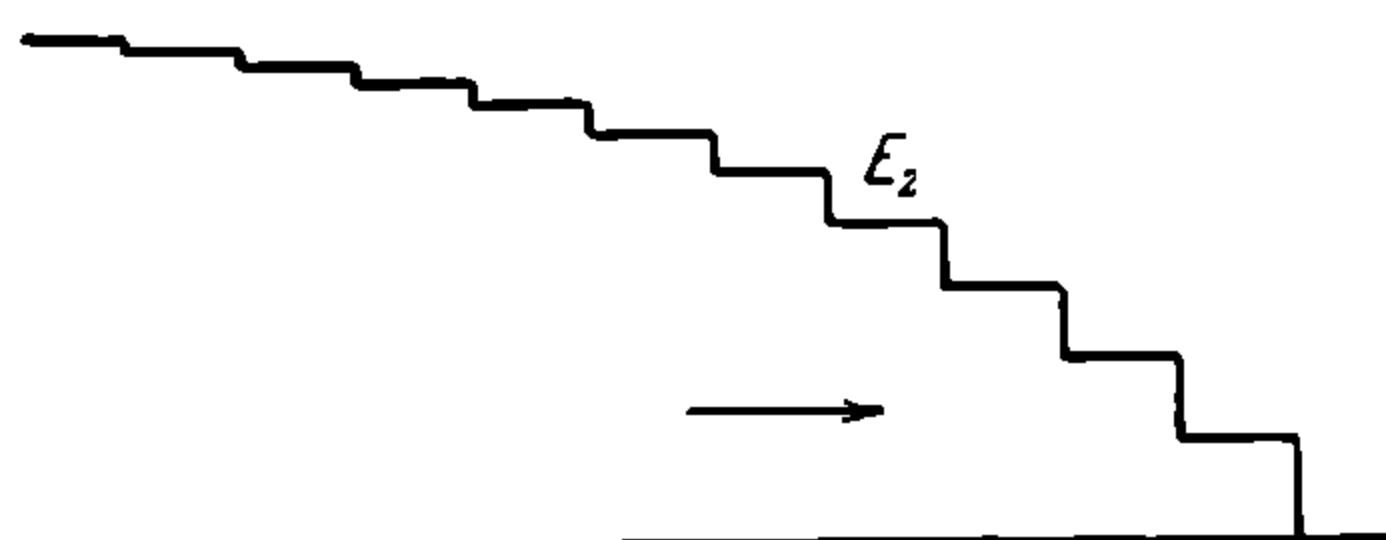
т. е. обмотка трансформатора имеет волновое сопротивление значительно большее, чем у линии передачи. В этом интервале могут оказаться самые разнообразные значения для Z_d . Такое неравенство возможно, особенно в случае выбора нецелесообразно малых индуктивностей.

В этом случае α_1 останется отрицательным, второй коэффициент преломления α_2 , наоборот, станет положительным и произведение этих коэффициентов окажется отрицательным

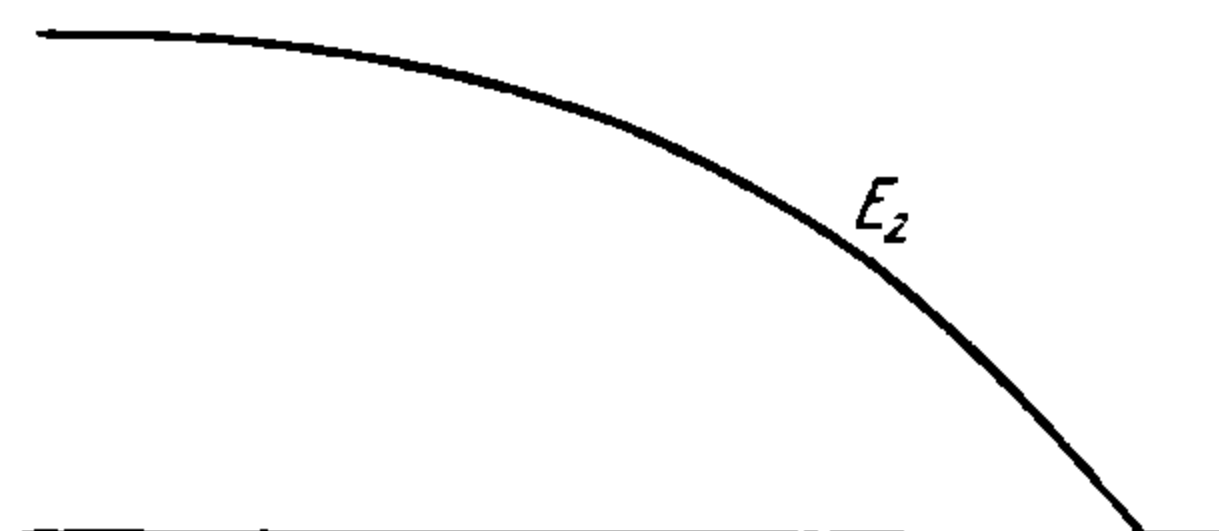
$$\alpha_1 \cdot \alpha_2 = -\gamma$$

Напряжение фронта волны в обмотке трансформатора и в данном случае будет состояться из ступеней. Суммарное напряжение волны, проникающей в обмотку, будет выражено здесь уравнением

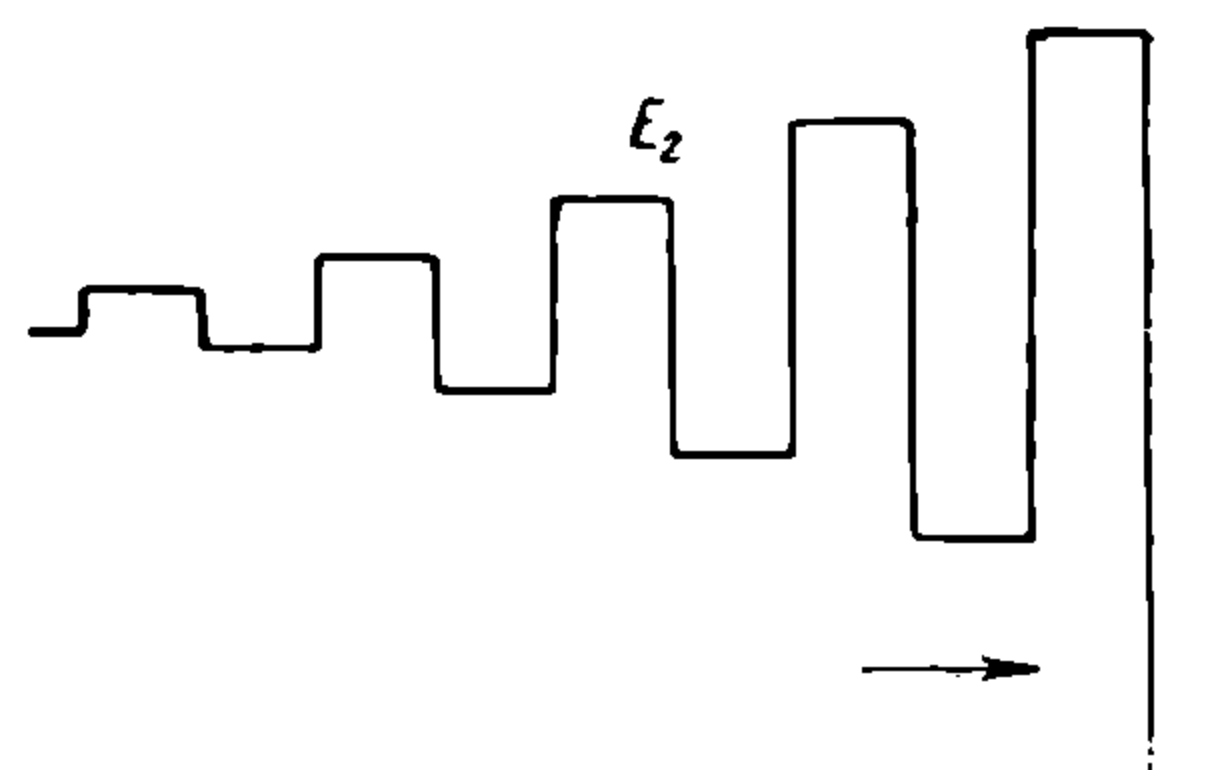
$$E_2 = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} E (1 - \gamma + \gamma^2 - \gamma^3 + \dots).$$



Фиг. 105.



Фиг. 106.



Фиг. 107.

Это напряжение уже не возрастает постепенно, а колеблется вокруг своего конечного значения

$$\frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} E,$$

при чем эти колебания постепенно затухают (фиг. 107).

Нельзя в этом случае недооценивать опасности слишком больших перенапряжений. Наиболее опасной является, конечно, первая половина периода колебания, когда суммарное напряжение в обмотке трансформатора достигает величины

$$E_2 = \frac{4 Z_2 Z_d}{(Z_1 + Z_d)(Z_2 + Z_d)} E = 4 E \frac{\frac{Z_2}{Z_d}}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_d}\right) \left(1 + \frac{Z_2}{Z_d}\right)}$$

Для прежнего случая

$$Z_1 < Z_d > Z_2$$

это напряжение было мало. Оно было тем меньше, чем больше волновое сопротивление дроссельной катушки. В данном случае она получает недопустимо большие значения.

НТБ
ДНУЗТ

Например, если

$$\frac{Z_2}{Z_d} = 2$$

и

$$\frac{Z_1}{Z_d} = \frac{1}{9},$$

то получим

$$E_2 = 4 E \frac{2}{\frac{10}{9} \cdot 3} = 2,4 E,$$

т. е. волна, благодаря недостаточной индуктивности дроссельной катушки, будет проходить в обмотку трансформатора при 2,4-кратном напряжении.

Известно, что емкость дроссельной катушки—вещь нежелательная. Оказывается, что небольшая индуктивность хуже полного отсутствия индуктивности. Без защитной дроссельной катушки обмотку трансформатора следует рассчитывать на двойное напряжение волны, при дроссельной же катушке с недостаточной индуктивностью напряжение волны, как видно из вышеупомянутого примера, увеличится еще больше.

Наблюдается весьма легкомысленное отношение к защите трансформатора от перенапряжения. Еще до сих пор устанавливают защитные катушки, состоящие из небольшого числа витков. Разумеется подобные аппараты не имеют права называться защитными дросселями.

Таким образом, если эксплуатационный инженер при осмотре своих трансформаторных станций в первую очередь попросту выбросит все эти, так называемые, дроссельные катушки, индуктивность которых насчитывает какие-нибудь сотые доли миллигенри, то этим самым он уже сделает многое в смысле увеличения безопасности установки. Вторым шагом явится установка правильно рассчитанных защитных дросселей.

Если установлено, что емкость дроссельной катушки во всех отношениях нежелательна, то следует стремиться по возможности ее уменьшить. Как конструктор, так и эксплуатационный инженер могут этому делу помочь. Чем больше раздвинуть между собою дроссельные катушки отдельных фаз, чем дальше отодвинуть их от стенок трансформаторной будки, тем лучше они будут действовать. Заземленные железные ящики, обычно применяемые для защиты и хранения дроссельных катушек, значительно увеличивают их емкость.

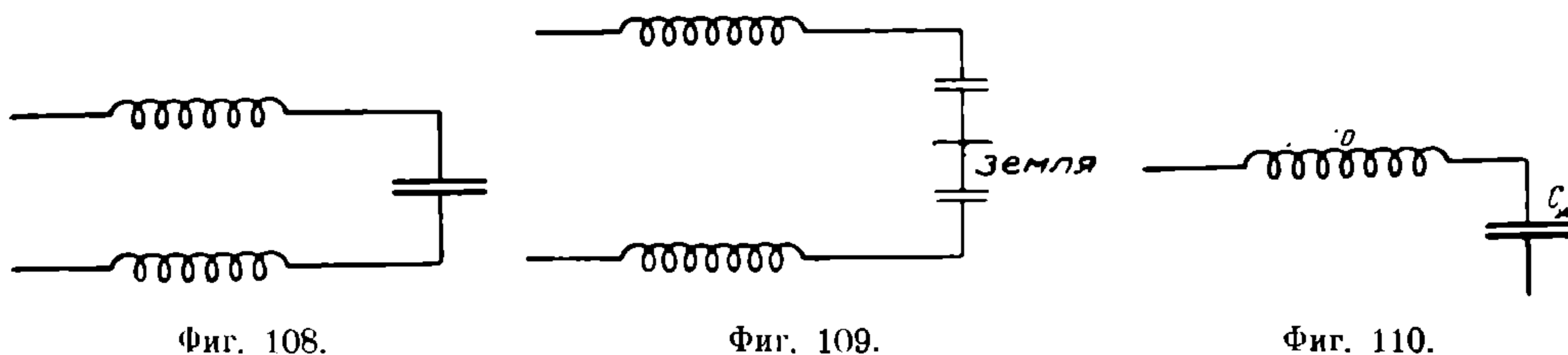
70. НЕДОСТАТКИ ЗАЩИТНОЙ ДРОССЕЛЬНОЙ КАТУШКИ. ВХОДНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР ТРАНСФОРМАТОРА. ЗАТУХАНИЕ ВХОДНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА.

Опасности, связанные с установкой слишком малых защитных индуктивностей, гораздо больше, чем они могут показаться на первый взгляд. При достаточно большом волновом сопротивлении дроссельной катушки окончательное значение напряжения в обмотке трансформатора нарастает аperiodически. Как мы видели, дело доходит до периодических колебаний лишь при недостаточной индуктивности дроссельной катушки. В случае периодических колебаний, при некоторых обстоятельствах могут возникнуть и опасные явления резонанса.

На деле вопрос о том, в какой мере сглаживание пришедшей волны уничтожает всякие дальнейшие опасности — этот вопрос остается открытым. Дело в том, что отраженная в линию частичная волна возвращается снова через определенные промежутки времени, что безусловно может вызвать и явления резонанса.

Если речь шла бы только о дроссельной катушке, то проблема не имела бы такого значения. Как указано, собственные колебания дроссельной катушки могут быть потушены и, таким образом, выравнивание напряжения происходит аperiodически. Этим самым для учения об эксплуатации отпадает вопрос о явлениях резонанса. Однако и правильно рассчитанная дроссельная катушка совместно с обмоткой трансформатора могут вызвать колебания, которые необходимо исследовать, так как при их совместном действии с колебаниями блуждающей волны в линии передачи могут возникнуть явления резонанса.

Правильно рассчитанная дроссельная катушка имеет большую индуктивность и малую емкость. В первом приближении эту катушку можно принять за сосредоточенную индуктивность. Она находится в последовательном соединении с обмоткой трансформатора, которая как-будто может быть так же рассматриваема, как сосредоточенная индуктивность.



Однако это не совсем так. Волна, появившаяся у начала обмотки, допустим у ее первого витка, вызывает ток смещения, идущий в поперечном направлении от витка к витку. Вся обмотка находится под напряжением, уменьшающимся, конечно, по направлению от зажимов к нулевой точке. Каждая часть обмотки имеет относительно земли известное напряжение, смещающее заряд в землю.

Уже в начале первого витка под действием волны находится вся емкость обмотки. С другой стороны, как доказано в параграфе 66, индуктивность в начальный момент очень мала. Отсюда ясно, что у зажимов трансформатора появляется емкость, согласно схеме, изображенной на фиг. 108. Эта емкость включает в себе и частичную емкость проходных изоляторов относительно крышки трансформатора.

Таким образом после всего сказанного можно принять, что здесь мы имеем дело с замкнутой цепью, в которой индуктивность дроссельной катушки L_d находится в последовательном соединении с емкостью C_0 обмотки (фиг. 110), при чем мы предполагаем, что речь идет о процессах между двумя фазами. При блуждающих волнах электрического поля земли мы будем иметь картину, изображенную на фиг. 109.

Таким образом, мы имеем картину, изображенную на фиг. 110, где требуется лишь правильно определить значение C_0 .

Оказывается, что эта схема обладает всеми свойствами колебательного контура, в котором при каждом толчке блуждающей волны возникают колебания. Если же, кроме того, эти толчки блуждающей волны будут повторяться в регулярные промежутки времени, то дело может дойти до явлений резонанса.

НТБ
ДНУЗТ

Таким образом, мы окончательно уясняем себе постановку вопроса.

С точки зрения учения об эксплуатации необходимо разобраться в том, при каких обстоятельствах могут возникнуть напряжения резонанса в вышеописанном колебательном контуре. Блуждающие волны имеют самые разнообразные очертания, а потому их можно разложить по методу Фурье на всевозможные составные волны, изменяющиеся по закону синуса, но с различными числами периодов. Какая-либо из этих составных волн может оказаться опасной, если своевременно не принять соответствующих мер.

Единственным средством для борьбы с колебаниями является успокоение их искусственными способами для того, чтобы все изменения напряжений протекали аperiodически. Лишь этим путем мы достигаем исчерпывающего решения проблемы перенапряжения и лишь при этих условиях дроссельная катушка становится вполне надежным защитным аппаратом.

Как известно, успокоение колебаний в колебательных контурах производится посредством омических сопротивлений. И здесь теоретически мы имеем дело с последовательным включением успокоительного сопротивления и защитной индуктивности. Хотя практически, с эксплуатационной точки зрения, это сопротивление безусловно нежелательно, мы все же начнем с его рассмотрения.

Фиг. 111 дает нам теоретическую картину демпфированного защитного контура. К последовательно соединенным защитной индуктивности L_a , успокоительному сопротивлению R и емкости обмотки C трансформатора приложено напряжение блуждающей волны, равное в рассматриваемый момент E вольтам.

Мы имеем

$$E = Ri + L_a \frac{di}{dt} + \int \frac{idt}{C_0},$$

где i — сила тока, проходящего в данный момент по колебательному контуру. Это уравнение дает возможность подсчитать колебания, вызванные приложенным напряжением E .

Собственные колебания контура заданы, конечно, уравнением

$$Ri + L_a \frac{di}{dt} + \int \frac{idt}{C_0} = 0,$$

которое лучше всего привести к виду

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L_a} \frac{di}{dt} + \frac{i}{L_a C_0} = 0.$$

Одно решение будет соответствовать

$$i = i_0 \varepsilon^{at}$$

Из него получаем

$$\frac{di}{dt} = a i_0 \varepsilon^{at},$$

кроме того,

$$\frac{d^2i}{dt^2} = a^2 i_0 \cdot \varepsilon^{at}$$

Таким образом уравнение примет вид

$$\alpha^2 + \frac{R}{L_d} \alpha + \frac{1}{L_d \cdot C_0} = 0,$$

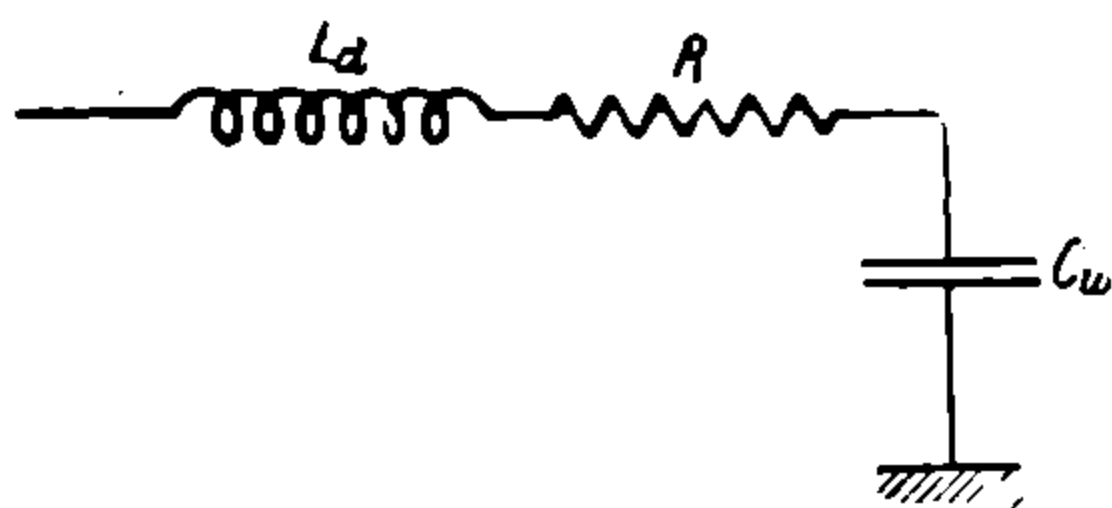
откуда

$$\alpha = -\frac{R}{2L_d} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L_d}\right)^2 - \frac{1}{L_d C_0}}.$$

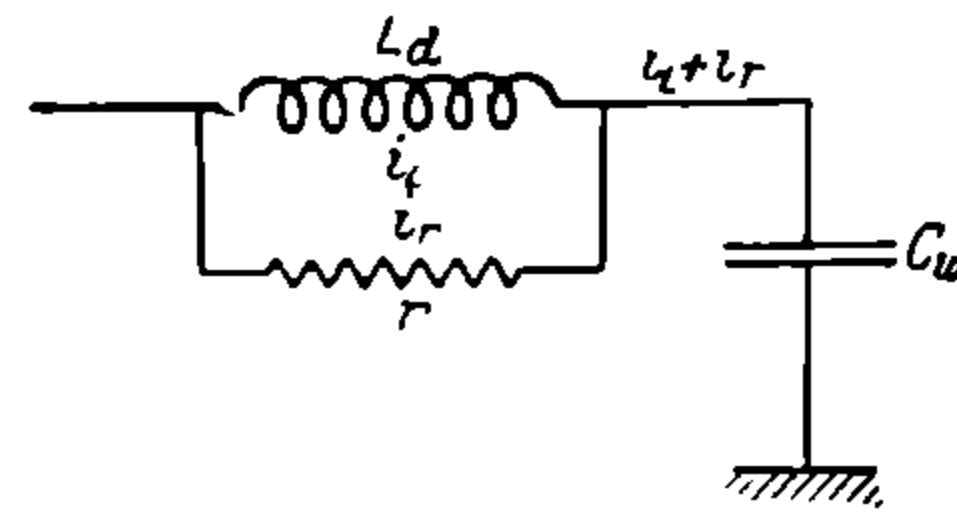
Собственные колебания будут протекать аperiodически, при действительной величине α лишь тогда, когда

$$R > 2 \sqrt{\frac{L_d}{C_0}}.$$

Это дает слишком большие значения успокоительного сопротивления. Согласно параграфу 65, L_d приблизительно в 50 раз меньше индуктивности обмотки трансформатора, тогда как для C_0 необходимо взять приблизительно двойную емкость двух фазовых обмоток трансформатора. Таким образом, успокоительное сопротивление оказалось бы больше пятой части волнового сопротивления обмотки.



Фиг. 111.



Фиг. 112.

Это решение совершенно неудовлетворительно. Подобное сопротивление вызвало бы большие потери энергии.

Рассмотрение его имело лишь теоретический интерес, а потому в дальнейшем возвращаться к нему не будем.

Успокоительное сопротивление r (омов) можно включить также и параллельно дроссельной катушке, как изображено на фиг. 112. Не трудно убедиться в том, что против этого способа соединения возражений не встретится. Рабочий ток без труда проходит через дроссельную катушку, представляющую для него лишь незначительное сопротивление (см. параграф 66). Токи же высокой частоты, вызываемые блуждающими волнами, будут проходить через успокоительное сопротивление. Энергия этих волн будет полезно расходоваться в этом ответвлении пути.

Фиг. 112 дает нам выражение для колебаний, вызванных напряжением волны E ,

$$E = L_d \frac{di_l}{dt} + \int \frac{(i_l + i_r) dt}{C_0},$$

при чем

$$L_d \frac{di_l}{dt} = i_r \cdot r,$$

Для собственных колебаний получим

$$L_d \frac{di_l}{dt} + \int \frac{(i_l + i_r) dt}{C_0} = 0. \quad L_d \frac{di_l}{dt} = i_r \cdot r.$$

откуда следует, что

$$\frac{d^2 i_l}{dt^2} + \frac{1}{C_0 \cdot r} \frac{di_l}{dt} + \frac{i_l}{C_0 L_d} = 0.$$

Сравнив полученное уравнение с предыдущим уравнением для случая последовательного соединения успокоительного сопротивления, мы убедимся, что ток будет проходить по дроссельной катушке апериодически лишь в том случае, если множитель

$$\frac{1}{C_0 r}$$

в последнем уравнении мы будем рассматривать как множитель в предыдущем уравнении

$$\frac{R}{L_d}$$

Таким образом, приняв

$$\frac{1}{C_0 r} = \frac{R}{L_d}$$

мы получим

$$r = \frac{L_d}{C_0} \frac{1}{R}.$$

Так как для избежания периодических процессов нам пришлось допустить

$$R > 2 \sqrt{\frac{L_d}{C_0}},$$

то теперь мы примем

$$r < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_d}{C_0}}$$

Для апериодичности процессов в контуре необходимо, чтобы омическое сопротивление шунтирующее дроссельную катушку было меньше, чем, приблизительно, 5% волнового сопротивления трансформаторной обмотки.

Пример. В параграфах 65 и 66 приведен трансформатор в 100 *kVA*, напряжения в 10 000 *V* и 50 периодов. Для его защиты оказалась необходимой индуктивность в 10 миллигенри.

Для успокоения защитного контура потребуется или омическое сопротивление, включенное последовательно с дроссельной катушкой, равное

$$R \cong \frac{1}{5} 40 \cdot 1440 = 11\,520 \text{ омов}$$

(так как волновое сопротивление при 1440 витках в фазовой обмотке трансформатора составляет величину в 40 · 1440 омов), или же сопротивление в

$$r \cong 0,05 \cdot 40 \cdot 1440 = 2\,880 \text{ омов}$$

включенное параллельно к дроссельной катушке.

С первого же взгляда легко убедиться, что последовательно включенное сопротивление совершенно недопустимо.

Параллельно же включенное сопротивление можно с некоторым запасом принять равным

$$r = 2\,000 \text{ омов.}$$

В примере параграфа 66 было подсчитано, что в дроссельной катушке при номинальном токе теряется напряжение в 18 *V*. Таким

образом, при нормальной полной нагрузке, успокоительное сопротивление поглощало бы джоулево тепло

$$\frac{18^2}{2000} = 0,162 \text{ Вт.}$$

Ясно, что можно без вреда еще уменьшить величину этого сопротивления.

Следует, кроме того, отметить, что при нормальной нагрузке через успокоительное сопротивление проходит ток

$$\frac{18}{2000} = 0,009 \text{ А.}$$

На этот незначительный длительный ток и следует рассчитать успокоительное сопротивление.

Оно вызывает расходы совершенно незначительные в сравнении с той пользой, которую оно приносит в эксплуатации. Одного этого обстоятельства достаточно для того, чтобы оправдать существование сопротивления при каждой дроссельной катушке.

71. ДРОССЕЛЬНЫЕ КАТУШКИ С ШУНТИРУЮЩИМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ И БЕЗ НИХ.

Успокоительное сопротивление, включенное параллельно к дроссельной катушке, за последние годы получило широкое распространение. Разъяснение принципов его действия в связи с процессами, происходящими при проникновении блуждающей волны в обмотку трансформатора — разъяснение этих принципов является заслугой Ф. Бём'a. Однако, к сожалению, это сопротивление оказывает известное влияние и на сглаживание фронта волны. Поэтому необходимо внести ясность и в этот вопрос.

Рассмотрим снова случай набегания из сети блуждающей волны с напряжением E и крутым фронтом, на этот раз для соединения, изображенного на фиг. 113.

Волна в точке разветвления дроссельной катушки и сопротивления, конечно, частично отражается и в сеть, при этом возвращается частичная волна с напряжением ΔE .

Суммарное напряжение преломленной волны

$$E + \Delta E$$

расходуется частично дроссельной катушкой, по которой течет ток i_a а частично в виде волны, проникающей в обмотку трансформатора под напряжением E_2

$$E + \Delta E = L_a \frac{di_a}{dt} + E_2.$$

Из линии передачи с волновым сопротивлением Z_1 , приходит ток

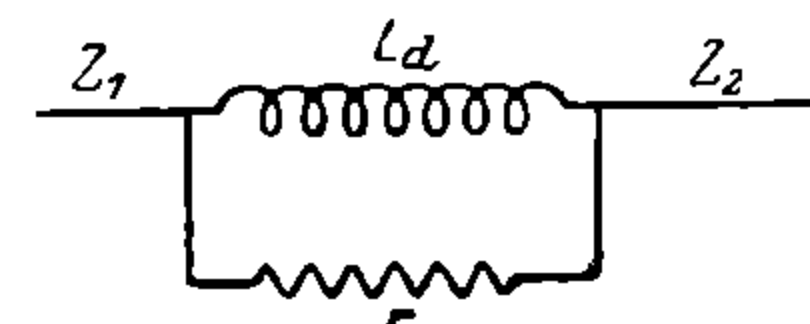
$$\frac{F}{Z_1},$$

часть которого возвратится в сеть

$$\frac{\Delta E}{Z_1},$$

в обмотку же трансформатора пойдет ток

$$\frac{E_2}{Z_2},$$



Фиг. 113.

где Z_2 — волновое сопротивление обмотки трансформатора. Разумеется этот ток в обмотке проходит частично по дроссельной катушке — i_d , а частично по успокоительному сопротивлению i_r , следовательно

$$i_d + i_k = \frac{E_2}{Z_2}.$$

Таким образом, мы имеем

$$\frac{E}{Z_1} = \frac{\Delta E}{Z_1} + \frac{E_2}{Z_2},$$

или

$$E - \Delta E = \frac{Z_1}{Z_2} E_2,$$

что вместе с вышеприведенным уравнением дает

$$2E = L_d \frac{di_d}{dt} + E_2 \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}$$

Индуктивное падение напряжения в дроссельной катушке равно, конечно, омическому падению напряжения в успокоительном сопротивлении

$$L_d \frac{di_d}{dt} = i_r r.$$

Таким образом мы имеем выражение

$$2E = (Z_1 + Z_2) i_d + L_d \left[1 + \frac{Z_1 + Z_2}{r} \right] \frac{di_d}{dt},$$

которое можно упростить, приняв

$$\rho = 1 + \frac{Z_1 + Z_2}{r},$$

тогда мы получим

$$2E = (Z_1 + Z_2) i_d + L_d \cdot \rho \frac{di_d}{dt}.$$

Решение известно. Речь идет о постоянном напряжении $2E$, приложенном к зажимам последовательно включенных омического сопротивления $Z_1 + Z_2$ и индуктивности $L_d \cdot \rho$.

Это решение гласит

$$i_d = \frac{2E}{Z_1 + Z_2} \left[1 - \varepsilon^{-\frac{Z_1 + Z_2}{L_d \cdot \rho} t} \right].$$

Чтобы получить ток, входящий в обмотку трансформатора, необходимо подсчитать и ток в ответвлении

$$i_r = \frac{L_d}{r} \frac{di_d}{dt},$$

а именно

$$i_r = \frac{2E}{r \cdot \rho} \varepsilon^{-\frac{Z_1 + Z_2}{L_d \cdot \rho} t}.$$

Таким образом, наконец, мы получаем

$$\frac{E_2}{Z_2} = i_d + i_r = \frac{2E}{Z_1 + Z_2} - 2E \varepsilon^{-\frac{Z_1 + Z_2}{L_d \cdot \rho} t} \left[\frac{1}{Z_1 + Z_2} - \frac{1}{r \rho} \right]$$

$$E_2 = \frac{2E Z_2}{Z_1 + Z_2} \left[1 - \frac{\varepsilon^{-\frac{Z_1 + Z_2}{L_d \cdot \rho} t}}{\rho} \right] \quad (38)$$

Если успокоительное сопротивление отсутствует, то, очевидно, r станет бесконечно велико

$$r = \infty, \quad \rho = 1.$$

В этом случае уравнение (38) примет вид уравнения, полученного в исследовании параграфа 70.

На первый взгляд может показаться, что напряжение у обмотки трансформатора будет возрастать более плавно, чем у индуктивности без омического отклонения.

Мы имеем

$$\frac{dE_2}{dt_{t=0}} = \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{2E Z_2}{L_d},$$

где ρ всегда больше 1.

Но это первое благоприятное впечатление исчезнет, если уравнение (38) привести к виду

$$E_2 = \frac{2E Z_2}{r + Z_1 + Z_2} + \frac{2E Z_2}{\rho(Z_1 + Z_2)} \left[1 - \varepsilon^{-\frac{Z_1 + Z_2}{L_d \cdot \rho} t} \right]$$

и если, кроме того, учесть, что для полного затухания r должно составлять лишь несколько процентов от Z_2 . Напряжение в обмотке достигает сразу почти такого значения, как-будто при этом отсутствует защитная индуктивность.

Таким образом оправдывается предположение о том, что блуждающие волны проходят через успокоительное сопротивление, тогда как рабочий ток легко проходит через дроссельную катушку. Главный же недостаток подобного устройства заключается в том, что успокоительное сопротивление пропускает волну с крутым фронтом.

Таким образом приходим к выводу, что параллельное включение успокоительного сопротивления не достигает основной цели. Для чего мы устанавливаем защитную индуктивность? Именно для того, чтобы сглаживать фронт волны. Почему перед обмоткой трансформатора возникает колебательный контур, который необходимо заглушить? Именно потому, что включена большая индуктивность. Эксплуатационный инженер, уяснив себе это положение вещей, придет к заключению, что самым полезным будет отказаться как от дроссельной катушки, так и от успокоительного сопротивления.

Было бы действительно нецелесообразно обеспечивать затухания в колебательном контуре, если можно вообще избежать образования подобного контура. Однако, можно ли удалением дросселей в действительности избежать напряжений резонанса непосредственно перед обмоткой трансформатора?

Перед обмоткой трансформатора встречаются и другие индуктивности, которых нельзя избежать, в частности—индуктивность обмотки трансформатора тока. Таким образом, возможность резонанса продолжает оставаться существенной проблемой перенапряжения трансформатора.

НТБ
ДНУЗТ

Если бы эта проблема не была чрезвычайно трудной — не происходило бы и таких частых пробиваний обмоток трансформатора. Правда, нормы безопасности обычно не предусматривают полностью напряжений резонанса, все же, учитывая волны с крутым фронтом, предписывают для трансформатора испытания на электромагнитные волны с крутым фронтом.

Следует ли безусловно довольствоваться лишь выбором между возможностью сглаживать волны и возможностью потушить колебания у зажимов трансформатора? Действительно ли отсутствует такое решение, которое объединило бы оба этих условия?

Существует, прежде всего, половинчатое решение. Можно не вводить полного затухания. Ток i_l в колебательном контуре, состоящем из шунтированной индуктивности и емкости обмотки трансформатора, согласно подсчета последнего параграфа, будет равен

$$i_l = i_0 e^{\alpha t},$$

при чем следует принять

$$\alpha = -\frac{1}{2r C_0} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2r C_0}\right)^2 - \frac{1}{L_d \cdot C_0}}$$

Таким образом, мы имеем

$$i_l = i_0 e^{-\frac{t}{2r C_0}} \left[\varepsilon e^{t \sqrt{\left(\frac{1}{2r C_0}\right)^2 - \frac{1}{L_d \cdot C_0}}} + \varepsilon e^{-t \sqrt{\left(\frac{1}{2r C_0}\right)^2 - \frac{1}{L_d \cdot C_0}}} \right],$$

или

$$i_l = 2i_0 \cos \omega t \cdot e^{-\frac{t}{2r C_0}}$$

в случае, если принято

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_d \cdot C_0} - \left(\frac{1}{2r \cdot C_0}\right)^2}$$

Если успокоительное сопротивление становится больше критического значения

$$r_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_d}{C_0}},$$

то число периодов тока будет равно

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_d C_0} - \left(\frac{1}{2r C_0}\right)^2}$$

Можно написать также

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_d C_0}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r_k}{r}\right)^2}$$

Наименьшее число периодов блуждающей волны, отраженной от дроссельной катушки зависит, кроме того, от длины линии, по которой эта волна движется. Принимая длину этой линии, соответствующую половине периода блуждающей волны в l километров, мы получим длительность одного периода, равной

$$\frac{2l}{3 \cdot 10^5} \text{ секунд}$$

а число периодов, равным

$$\frac{3 \cdot 10^5}{2l}.$$

Таким образом условие, которое необходимо соблюсти, будет выражено

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_d C_0}} \sqrt{1 - \left(\frac{r_k}{r}\right)^2} < \frac{3 \cdot 10^5}{2l}.$$

Задаваясь, согласно уравнения (37)

$$L_d = 0,2 \left(\frac{W}{1000}\right)^2 \frac{U}{3} 10^{-3} \text{ генри}$$

и согласно параграфа 67

$$C_0 = 2C = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon l_s}{9 \cdot 10^{11}} \frac{U}{8\pi\delta},$$

где

$$\frac{\varepsilon l_s}{\delta} \cong 10^2$$

и

$$w U 10^{-5} = l_w \text{ км},$$

мы получим уравнение

$$\sqrt{1 - \left(\frac{r_k}{r}\right)^2} < 1 \cdot 15 \frac{l_w}{l}$$

и наконец

$$r < \frac{r_k}{\sqrt{1 - \left(1 \cdot 15 \frac{l_w}{l}\right)^2}} \quad (39)$$

Пример. Рассмотренный нами раньше трансформатор мощностью в 100 *kVA* и напряжения в 10 000 *V* согласно расчетов, приведенных в последнем примере, имеет при дроссельной катушке шунтирующее сопротивление, которое должно быть меньше 2880 омов. В трансформаторе 1440 витков. Средняя длина витка 70 *см*.

Таким образом, критическое сопротивление

$$r_k = 2880 \text{ омов.}$$

Длина провода обмотки равна

$$1440 \cdot 70 \cdot 10^{-5} = 1 \text{ км.}$$

Отсюда мы видим, что сопротивление можно взять не на много больше критического. Ради предосторожности следует учитывать всю длину линии передачи.

Положение, однако, не так безвыходно, как оно кажется. Из уравнения (39) можно извлечь ряд существенных для эксплуатации выводов. Прежде всего следует отметить, что на практике хорошо оправдали себя как шунтированные, так и нешунтированные защитные дроссели (конечно в том случае, если они были достаточно мощны).

Необходимо обратить внимание на то, что при трансформаторах, у которых длина провода обмотки составляет величину большую, чем 87% длины всей линии передачи, — в таких трансформаторах явление резонанса вообще не наблюдается. Для них не нужны успокоительные сопротивления. Главную роль для этих трансформаторов играет сглаживание волны, что очень хорошо осуществляется нешунтированной дроссельной катушкой.

НТБ
ДНУЗТ

Маломощные трансформаторы, находящиеся на ответвлениях линии, находятся в подобных благоприятных условиях. При данном напряжении и уменьшающейся мощности число витков обмотки возрастает обратно пропорционально квадратному корню из мощности, тогда как средняя длина витка уменьшается лишь пропорционально корню четвертой степени из мощности. Провод обмотки удлиняется. Кроме того место ответвления линии способствует отражению волны.

Для трансформаторов, присоединенных к очень длинным линиям, успокоительное сопротивление безусловно необходимо. Этот недостаток уравнивается тем преимуществом, что на своем длинном пути волна успевает хорошо сгладиться.

Для таких трансформаторов главная опасность скрывается в возможных явлениях резонанса. Таким образом, можно наметить правило:

Маломощные трансформаторы, расположенные на сравнительно коротких боковых ответвлениях линии, следует обеспечить нешунтированными дросселями, для мощных же трансформаторов, расположенных на длинной главной линии, следует предусмотреть шунтированные дроссели.

Само собою разумеется, что успокоительное сопротивление должно быть правильно рассчитано, в противном случае, лучше его совершенно не ставить. Уравнение (39) ясно показывает, что опасность резонанса или совершенно отсутствует, или же при наличии этой опасности возможны лишь небольшие отклонения от критического значения успокоительного сопротивления. Для большей безопасности выбирают величины значительно меньшие критического значения. Для фронта волны совершенно безразлично, достигает ли это сопротивление 5 или 2% от волнового сопротивления трансформаторной обмотки.

72. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ШУНТИРОВАННОЙ И НЕШУНТИРОВАННОЙ ДРОССЕЛЬНЫХ КАТУШЕК С МАГНИТНОЙ СВЯЗЬЮ.

Выводы предыдущего параграфа дают возможность для многих случаев в эксплуатации установить правильную защиту от перенапряжений. Характер этой защиты будет всецело зависеть от характера главной опасности. В одном случае, при главной опасности, заключающейся в явлениях резонанса, это будет защита шунтированными дросселями, в другом случае, при главной опасности, скрывающейся в крутом фронте волны — будет применена защита нешунтированными дросселями. Это решение, однако, ни в коем случае не является исчерпывающим.

Следует здесь еще раз упомянуть о том, что самым главным в каждом случае является правильный подбор индуктивности дроссельной катушки.

В каждом случае эта индуктивность должна препятствовать прохождению блуждающей волны, для рабочего же тока она должна представлять ничтожное сопротивление.

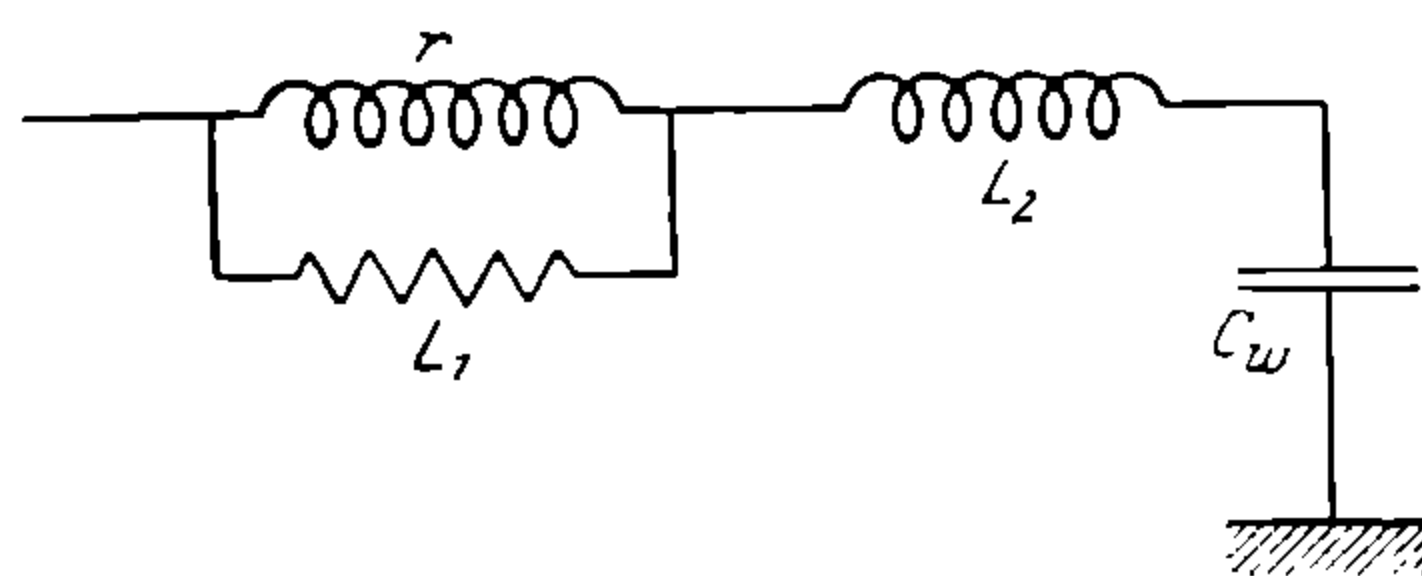
Для учения об эксплуатации вопрос о том, возможно ли все же достигнуть полной защиты, остается открытым. Нельзя ли найти такое устройство, которое устраняло бы возможность возникновения явлений резонанса но, в то же время энергично сглаживало бы фронт волны.

ИТЬ
ДНУЗТ

Невольно возникает мысль о последовательном включении шунтированной и нешунтированной дроссельных катушек. Первая должна дать затухание, а вторая — сглаживание волны. Эту мысль, несомненно, можно осуществить. Все же полезно произвести подробное исследование возможных здесь процессов затухания, хотя и без того ясно, что вторая дроссельная катушка будет сглаживать фронт волны, беспрепятственно прошедшей через шунт первой дроссельной катушки.

В сущности, мысль об использовании двух дроссельных катушек можно осуществить различными способами. Для этого необходимо лишь не упускать из виду того обстоятельства, что можно осуществить и магнитное взаимодействие этих двух катушек. Действительно, казалось бы весьма целесообразным для удешевления устройства выполнить обе дроссельные катушки с единым магнитным полем.

В какой мере магнитное взаимодействие дроссельных катушек будет благоприятствовать решению основных задач — защиты от перенапряжений и резонанса — может показать лишь исследование. Для этой цели полезно рассмотреть сначала общий случай, не предпринимая строго вопроса о степени магнитного взаимодействия.



Фиг. 114.

Фиг. 114 изображает основные элементы, входящие в это устройство. Индуктивность в L_1 генри шунтирована омическим сопротивлением r (омов). Она соединена последовательно с нешунтированной индуктивностью L_2 (генри) и с последней составной частью колебательного контура — с емкостью C_0 обмотки трансформатора.

В общем случае магнитной связи двух дроссельных катушек следует, кроме того, учитывать и две взаимоиндукции. Первая катушка индуктирует во второй M_{12} генри, а вторая в первой — M_{21} генри.

Таким образом, получим уравнение напряжений для собственных колебаний

$$\left(L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{21} \frac{di}{dt} \right) + \left(L_2 \frac{di}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} \right) + \int \frac{idt}{C_0} = 0,$$

где i_1 — ток в первой дроссельной катушке, i — суммарный ток, а

$$i_r = i - i_1$$

ток в успокоительном сопротивлении. Кроме того должно существовать равенство

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{21} \frac{di}{dt} = i_r \cdot r.$$

Оба дифференциальных уравнения полезно привести к виду

$$\left[L_1 + L_2 + M_{21} + M_{12} \right] \frac{di}{dt} + \int \frac{idt}{C_0} - \left[L_1 + M_{12} \right] \frac{di_r}{dt} = 0,$$

$$\left[L_1 + M_{21} \right] \frac{di}{dt} = i_r \cdot r + L_1 \frac{di_r}{dt}$$

при чем второе уравнение продифференцируем два раза, тогда получим

$$\left[L_1 + M_{21} \right] \frac{d^3i}{dt^3} = r \frac{d^2i_r}{dt^2} + L_1 \frac{d^3i_r}{dt^3}$$

НТБ
ДНУЗТ

Первый член справа можно получить, продифференцировав один раз первое уравнение, а второй член — продифференцировав первое уравнение два раза, тогда получим

$$\left[L_1 L_2 - M_{12} \cdot M_{21} \right] \frac{d^3 i}{dt^3} + r \left[L_1 + L_2 + M_{21} + M_{12} \right] \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{L_1}{C_0} \frac{di}{dt} + \frac{ri}{C_0} = 0.$$

Кроме того, как не трудно убедиться,

$$M_{12} = M_{21} = M.$$

и таким образом

$$\left[L_1 L_2 - M^2 \right] \frac{d^3 i}{dt^3} + r \left[L_1 + L_2 + 2M \right] \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{L_1}{C_0} \frac{di}{dt} + \frac{ri}{C_0} = 0.$$

Нет пока необходимости искать общее решение задачи. Ясную картину трудностей для полной защиты от перенапряжений мы можем получить, рассмотрев особый случай, а именно, случай полной магнитной сопряженности обеих дроссельных катушек.

Полное суммарное поле обеих дросселей имеет определенное магнитное сопротивление. Индуктивность M_{12} пропорциональна потоку (созданному первой дроссельной катушкой при прохождении через нее тока в 1 А, умноженному на число витков второй дроссельной катушки. Той же величине равно и M_{21} . Квадрат этой величины должен быть равен произведению $L_1 \cdot L_2$, так как L_1 соответствует произведению такого же потока, как и при M_{12} на число витков первой катушки, а L_2 — соответствует второму произведению. Таким образом имеем:

$$L_1 L_2 = M^2.$$

Таким образом, дифференциальное уравнение колебаний будет гласить

$$r \left[L_1 + L_2 + 2 \sqrt{L_1 L_2} \right] \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{L_1}{C_0} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{ri}{C_0} = 0,$$

которое можно решить, считая

$$i = i_0 e^{\alpha t}$$

Это ведет к уравнению

$$\alpha^2 \cdot r \left[L_1 + L_2 + 2 \sqrt{L_1 L_2} \right] + \frac{L_1}{C_0} \cdot \alpha + \frac{ri}{C_0} = 0,$$

которое даст действительные значения для α (а следовательно и аperiодический ток) лишь при выполнении условия

$$\left[\frac{L_1}{2rC_0} \cdot \frac{1}{L_1 + L_2 + 2 \sqrt{L_1 L_2}} \right]^2 \geq \frac{1}{C_0 (L_1 + L_2 + 2 \sqrt{L_1 L_2})}.$$

Отсюда можно получить величину потребного успокоительного сопротивления

$$r \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_1}{C_0}} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}} \quad (40)$$

ИТЬ
ДНУЗТ

Этот результат соответствует полной сопряженности обеих катушек в одинаковом направлении. Мыслим и случай, когда направление обмоток обеих катушек противоположно. В этом случае M становится отрицательным. Ясно, что в этом случае вместо $L_1 + L_2 + 2M$ мы будем иметь $L_1 + L_2 - 2M$. Здесь успокоительное сопротивление будет равно

$$r \cong \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_1}{C}} \cdot \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}} \quad (40a)$$

73. ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРИМЕНИМОСТЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ДВУХ СОПРЯЖЕННЫХ ДРОССЕЛЬНЫХ КАТУШЕК.

Легко убедиться в том, что уравнение (40a) нельзя использовать на практике. Так как желательно, чтобы

$$L_2 > L_1,$$

то значение успокоительного сопротивления получится отрицательным, что, конечно, невозможно.

Вторая индуктивность сглаживает фронт волны. Эта индуктивность должна быть совершенно определенной. Она может вызвать и определенные издержки, но не должна, однако, вести к большим падениям напряжения. Первая индуктивность L_1 препятствует прохождению блуждающей волны, идущей поэтому через успокоительное сопротивление. Если L_1 больше L_2 то это вызовет, конечно, излишние издержки и, кроме того, добавочное падение напряжения.

Это соображение действительно для случая двух дросселей; оно указывает путь к практическому решению этой замысловатой проблемы.

Рассмотрим вторую возможность — одинаково направленные полностью сопряженные катушки. Уравнение (40) указывает приемлемый путь, при котором допускается любое отношение обеих защитных индуктивностей.

При уменьшающемся отношении

$$\frac{L_2}{L_1}$$

успокоительное сопротивление приближается к своему предельному значению

$$r \cong \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_1}{C_0}}.$$

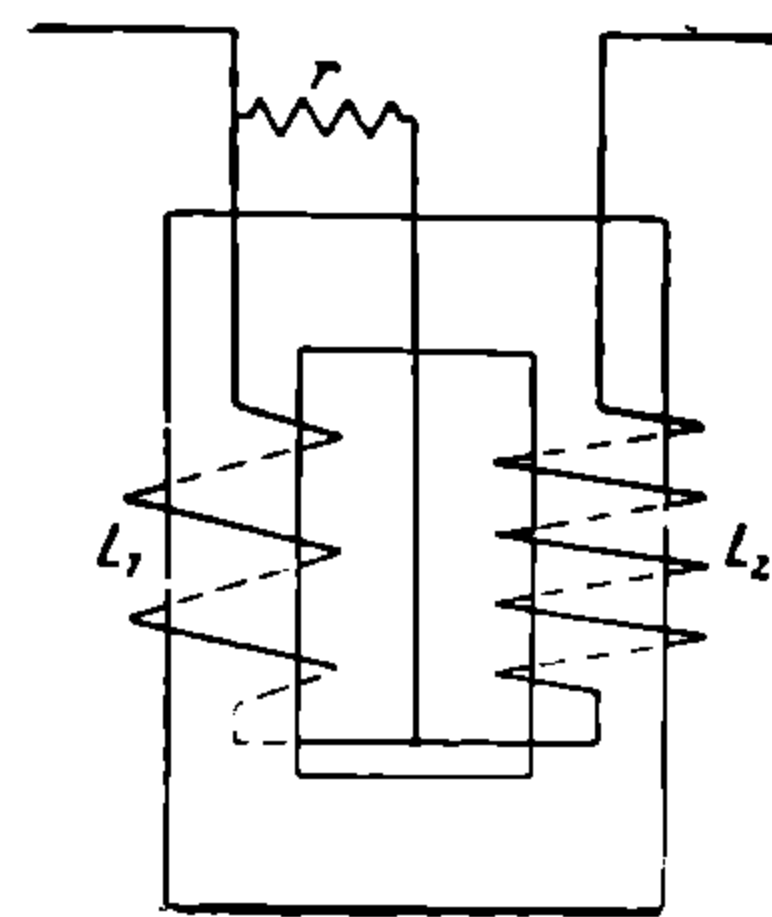
При малом L_1 становится малым и r . Последнее может оказаться невыполнимым, так как сама шунтированная дроссельная катушка имеет омическое сопротивление, уже как бы включенное параллельно индуктивности.

Можно как-будто получить удовлетворительные результаты, выбрав например

$$L_2 = 4 L_1$$

тогда получим

$$r \cong \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_2}{C_0}} = \frac{1}{12} \sqrt{\frac{L_2}{C_0}}.$$



Фиг. 115.

Однако при попытке конструктивного осуществления этого решения мы натолкнемся на непреодолимые трудности. Рассмотрим в чем эти трудности заключаются.

Можно ли достигнуть полной магнитной сопряженности? Конечно нет. Общий железный сердечник был бы решением вопроса. Однако железный сердечник отнимает у дроссельной катушки ценное преимущество, которым обладает всякая неизменяющаяся индуктивность, применяемая для целей защиты, а именно, преимущество одинаково реагировать на волны любого напряжения.

Отказавшись поневоле от железного сердечника, можно ввести чередование витков обоих дросселей. Однако в этом случае получаются большие разности потенциалов, могущие вызвать пробивания изоляции, что создает новую, значительно большую опасность для установки.

Совершенно очевидно, что эксплуатационный инженер не будет доволен тем, что возможность пробивания витков попросту перенесена из обмоток трансформатора в обмотку дроссельной катушки. Он охотно согласится установить одну или две дроссельные катушки, однако он будет вполне прав, отказавшись от таких дросселей, которые требуют частой смены, как плавкие предохранители.

Таким образом мы видим, что полностью сопряженные дроссели оказываются неприменимыми. Можно было бы все же применить общий магнитопровод, расположив каждую катушку на кернах как показано на фиг. 115, что безусловно уничтожило бы опасность пробивания.

Прежде чем рассмотреть эту возможность, необходимо проверить нельзя ли достигнуть желательных результатов с двумя дросселями независимыми в магнитном отношении. Очевидно такое устройство было бы практически самым выгодным.

74. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ДВУХ ДРОССЕЛЕЙ, НЕЗАВИСИМЫХ ДРУГ ОТ ДРУГА В МАГНИТНОМ ОТНОШЕНИИ.

Так как обе дроссельные катушки не зависят друг от друга в магнитном отношении, то отсутствует между ними и взаимная индукция. В общем уравнении следует принять

$$M_{12} = M_{21} = M = 0,$$

тогда для собственных колебаний в цепи трансформатора мы получим уравнение

$$L_1 L_2 \cdot \frac{d^3 i}{dt^3} + r(L_1 + L_2) \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{L_1}{C_0} \frac{di}{dt} + \frac{r i}{C_0} = 0,$$

которое можно решить, допустив, как и прежде.

$$i = i_0 \cdot e$$

Это дает уравнение

$$L_1 \cdot L_2 \alpha^3 + r(L_1 + L_2) \alpha^2 + \frac{L_1}{C_0} \alpha + \frac{r}{C_0} = 0.$$

Это кубическое уравнение лишь при совершенно особенных обстоятельствах дает три действительных значения для α , а тем самым и апериодичность затухания тока. Приведем это уравнение к виду

$$\alpha^3 + r \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2} \alpha^2 + \frac{1}{L_2 C_0} \alpha + \frac{r}{L_1 L_2 C_0} = 0,$$

и введя новую переменную β

$$\alpha = \beta - \frac{1}{3} r \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2}$$

мы можем, как известно, освободиться от квадратного члена. Тогда мы получим

$$\beta^3 + \left[\frac{1}{L_2 C_0} - \frac{1}{3} \left(r \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2} \right)^2 \right] \beta + \left[\frac{2}{27} \left(r \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2} \right)^3 - \frac{1}{3 L_2 C_0} \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2} + \frac{r}{L_1 L_2 C_0} \right] = 0.$$

Условие действительности всех трех корней этого уравнения, (являющееся, конечно, в то же время и условием действительности трех значений α), выразится следующим образом:

$$\left[\frac{1}{27} \left(r \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2} \right)^2 - \frac{1}{6} \frac{L_1 + L_2}{L_2 C_0} + \frac{r}{2 L_1 L_2 C_0} \right]^2 + \left[\frac{1}{3 L_2 C_0} - \frac{1}{9} \left(r \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2} \right)^2 \right]^3 \leq 0,$$

или же в решенном виде

$$r \leq \sqrt{\frac{L_1}{C_0}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{8} + \frac{5}{2} \left(\frac{L_2}{L_1} \right) - \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^2} \pm \sqrt{\frac{1}{64} \left(1 - 8 \frac{L_2}{L_1} \right)^3}}{\sqrt{1 + \frac{L_2}{L_1}}}$$

Эти результаты весьма неблагоприятны. Для возможности получения действительных значений необходимо, чтобы подкоренное количество в выражении

$$\sqrt{\frac{1}{64} \left(1 - 8 \frac{L_2}{L_1} \right)^3}$$

было положительным, т.-е. чтобы

$$L_1 > 8 L_2.$$

В предыдущем параграфе мы выяснили, шунтированную дроссельную катушку не следует делать больше нешунтированной. Только что полученная зависимость повела бы к значительным падениям напряжения при нормальной работе.

После всего сказанного мы получили полное представление о совместной работе двух дроссельных катушек, шунтированной и нешунтированной.

Совершенно очевидно, что о независимых дросселях не может быть и речи, так как они нарушали бы нормальную работу установки, в случае если были бы рассчитаны на действительное сглаживание волн. Кроме того мы видим, что полная сопряженность обоих дросселей была бы очень полезна, однако это выполнимо лишь при общем сердечнике, при котором приходится отказываться от неизменяемости индуктивностей.

Среднего пути нет. Чем слабее магнитная связь, тем хуже становится отношение величин обеих индуктивностей. Кроме того, без железа трудно достигнуть удовлетворительной магнитной связи.

О. Бём¹⁾, исследовавший различные способы для затухания волн,

¹⁾ Arch. f. Elektrotechn. 1917. N. 12.

не мог предложить ни одного удовлетворительного решения вопроса. После всего сказанного, выход, как-будто, следует искать или в описанном здесь способе, или же в способе, изложенном в параграфе 71, представив решение остальных вопросов конструктору трансформатора.

Подобное решение проблемы перенапряжения было бы неудовлетворительным. Правда, в наших установках не могут появиться волны с крутыми фронтами, так как последние смягчаются самой линией передачи. Верно и то, что зачастую отпадает возможность резонанса в цепи трансформатора. Однако в том случае, когда одна из этих опасностей особенно угрожает, борьба с ней становится абсолютно необходимой. Новейшая техника требует полной безопасности установки. Разумеется, в таком существенном вопросе, как борьба с перенапряжениями, это требование не может быть понижено.

На деле, однако, мы часто наблюдаем пониженные условия безопасности трансформаторных станций. Это обстоятельство в значительной мере и объясняет жесткость существующих в этой области норм безопасности.

Пробивания в трансформаторах представляют собою, к сожалению, частые явления в эксплуатации. Эти пробивания вызывают большие издержки и значительно удорожают эксплуатацию. Решение должно быть найдено. Неудовлетворительность работы цепей потребителя в больших районных сетях может принять опасные размеры, уже по одному тому, что это будет узаконено недостаточной защитой. Существование больших установок не должно зависеть от небольшого защитного аппарата.

75. ДВОЙНАЯ ДРОССЕЛЬНАЯ КАТУШКА С ЖЕЛЕЗНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ.

Следует упомянуть о том, что именно в последнее время при помощи так называемого катодного осциллографа удалось подтвердить правильность воззрений на явления резонанса в цепи трансформатора, впервые высказанных О. Бёмом и разобранных нами в предыдущих параграфах. В журнале «Elektrizitätswirtschaft» № 413 за 1926 г Д. Габор (D. Gábor) дает существенные сведения по этому вопросу. Таким образом мы видим, что теория вопроса разработана в достаточной мере для того, чтобы попытаться найти и практическое решение вопроса.

К такому решению мы должны притти поневоле. Требуются безусловно две дроссельные катушки: шунтированная — для затухания колебательного контура и нешунтированная — для сглаживания фронта волны. Учитывая расходы и, прежде всего, падения напряжения при нормальной работе, следует шунтированную индуктивность выбирать меньшей, чем индуктивность нешунтированная. Поэтому обе дроссельные катушки должны быть по возможности полностью связаны между собою в магнитном отношении. Во избежании возможности их пробивания, их следует располагать на общем железном сердечнике так, как это предлагается на фиг. 115.

Железный сердечник оказывается совершенно неизбежным. Однако почему мы должны его избегать? Не потому ли что он нарушает неизменяемость индуктивностей? Действительно ли это опасно в такой мере, чтобы из-за этого избегать железа?

НТБ
ДНУЗТ

Для полной одинаково направленной сопряженности обеих индуктивностей мы нашли требуемое успокоительное сопротивление

$$r \cong \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_1}{C_v}} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}}$$

Железный сердечник допускает изменения индуктивностей, однако отношение $L_2 : L_1$ не меняется. Таким образом положение вещей не представляется больше столь опасным, как это может показаться на первый взгляд.

Однако обе индуктивности выступают в нашей проблеме также и в качестве самостоятельных факторов.

Изменяемость шунтированной индуктивности L_1 вызывает и изменяемость успокоительного сопротивления, с изменением L_2 меняется и характер сглаживания фронта волны.

Если индуктивности рассчитаны для определенного насыщения железа, т. е. для определенного тока волны, то при большем токе, а следовательно при большем напряжении волны фронт ее сглаживается меньше, тогда как именно здесь необходимо большее сглаживание. При возрастающем токе волны величина успокоительного сопротивления будет также приближаться к допустимым пределам. Она может стать чрезмерной. Ко всему этому следует прибавить и влияние нормального рабочего тока на насыщение железа. В короткий промежуток времени действия волны и рабочий ток может иметь некоторую определенную величину.

Однако и железо все же не так уже неустойчиво в своей магнитной проводимости, как это склонен предполагать конструктор, привыкший к высоким насыщениям. При небольших насыщениях эту проводимость можно считать довольно постоянной. Но чем меньше насыщение железных сердечников, тем полнее связываются магнитно обе дроссельные катушки.

Эти рассуждения намечают путь к решению вопроса. Очевидно обе дроссельные катушки должны быть рассчитаны на сумму двух токов: максимально возможного тока, вызванного волной, и максимального значения нормального рабочего тока, при чем насыщение железного сердечника, вызванное этим суммарным током, должно соответствовать точкам слабого насыщения на кривой намагничивания железа (часть кривой, расположенная ниже ее «колена»).

Если это решение возможно, если оно не наталкивается на какие-либо существенные эксплуатационные затруднения, то найденный выход можно считать правильным, а дальнейшие исследования следует производить именно в этом направлении.

Железный сердечник обеих дросселей должен иметь определенное сечение $F_{ж}$ [см²] и определенную длину $l_{ж}$ [см]. Эти данные его полностью определяют. Согласно основному условию, он должен иметь насыщение не большее чем B_0 , которое мы находим ниже «колена» кривой намагничивания.

Пусть одна дроссельная катушка имеет w_1 , а другая — w_2 витков; это дает желательное отношение индуктивностей:

$$\frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2$$

Здесь для получения необходимой индуктивности L_2 следует определить W_2 . Мы имеем

$$L_2 = \frac{4\pi}{10} \frac{w_2^2 \cdot F_{\text{ж}} \cdot \mu}{l_{\text{ж}}} 10^{-8} \text{ генри,}$$

где μ — магнитная проводимость железа сердечника в пределах от нуля до B_0 гауссов. При чем L_2 должно иметь значение определяемое уравнением (37).

Пусть вышеупомянутый суммарный ток (состоящий из максимального нормального тока и максимально возможного тока волны) равен I амперам, кроме того, из предосторожности примем, что успокоительное сопротивление не искажает тока волны, тогда мы получим условие

$$B_0 \cong \frac{4\pi}{10} \cdot \mu \cdot \frac{(w_1 + w_2)}{l_{\text{ж}}} \cdot I$$

и следовательно

$$F_{\text{ж}} \cdot l_{\text{ж}} \cong \frac{4\pi}{10} \cdot L_2 \left(1 + \frac{L_1}{L_2}\right)^2 \cdot \frac{I^2 \mu}{\left(\frac{B}{1000}\right)^2} \cdot 10^2 \text{ см}^3.$$

Отсюда ясно, что для этого необходимо употребить не меньше определенного количества материала.

Пример. Неоднократно приведенный в наших примерах 100 кВА-ный трансформатор для напряжения в 10 000 В требует для сглаживания волн индуктивность в 10 миллигенри.

Волновое сопротивление обмотки оказалось равным

$$40 \cdot 1440 = 57600 \text{ омов;}$$

оно сводит волновые токи к величинам меньшим одного ампера.

Максимальное значение нормального рабочего тока будет составлять

$$\frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 10000} \cdot \sqrt{2} = 8,5 \text{ А.}$$

Ради безопасности примем

$$I = 10 \text{ амперам.}$$

Примем, кроме того, отношение

$$\frac{L_2}{L_1} = 5,$$

а индукцию ограничим величиной

$$B = 7000 \text{ гауссов,}$$

то, применив доброкачественное железо с

$$\mu = 3000,$$

получим

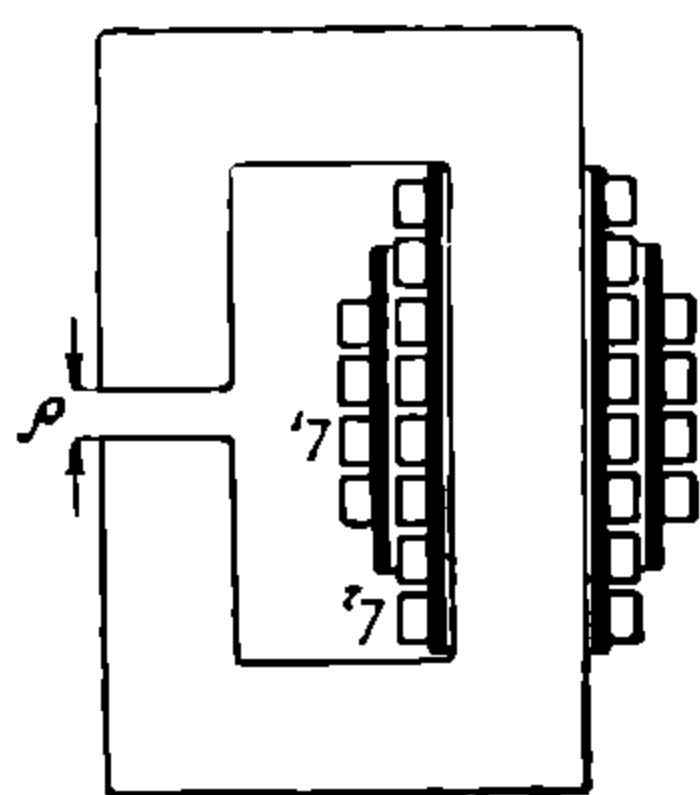
$$\frac{4\pi}{10} 10 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,2)^2 \frac{10^2 \cdot 3000}{7^2} \cdot 10^2 = 11 \cdot 10^3 \text{ см}^3,$$

т.е. приблизительно 80 кг железа.

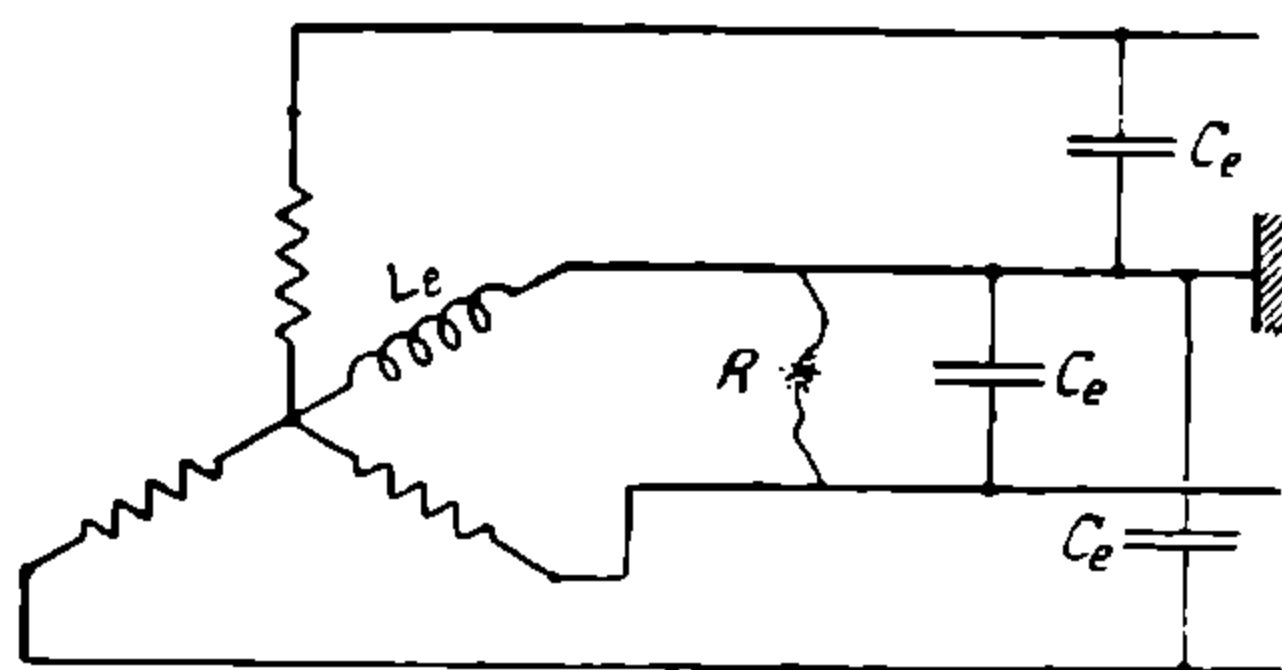
Решение вопроса, таким образом, оказывается возможным, однако, в нем еще много недостатков.

Совершенно недостаточно ограничивать величину индукции. Пример наглядно показывает, что здесь сильно сказывается влияние нормального тока. При набегании волны как-раз в момент прохождения нормального тока через нуль, насыщение железа уменьшится и будет составлять лишь незначительную часть своего предельного значения. При этом, однако, изменится и магнитная проводимость, так как она изменяется очень сильно именно при малых насыщениях. Сначала она быстро возрастает, а затем, по мере увеличения индукции, будет постепенно уменьшаться.

Если принять во внимание ту изменяемость проводимости, то придется снова сделать заключение о непригодности железного сердечника, по крайней мере в таком виде, в каком мы его до сих пор принимали. Однако эту конструкцию можно значительно улучшить, устроив на пути индукционных линий воздушный зазор, как указано на фиг. 116.



Фиг. 116.



Фиг. 117.

При длине воздушного зазора в δ сантиметров мы будем иметь

$$L_2 = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{\omega_2^2 F_{ж}}{\frac{l_{ж}}{\mu} + \delta} \cdot 10^{-8} \text{ генри.}$$

Изменяемость индуктивности остается теперь в рамках изменяемости выражения

$$\frac{l_{ж}}{\mu} + \delta.$$

Следует стараться, чтобы

$$\frac{l_{ж}}{\mu}$$

не было бы чересчур велико в сравнении с δ при чем воздушный зазор должен быть также и достаточно малым для того, чтобы удовлетворить условию возможно полной магнитной связи обоих дросселей. Возможно, однако, выбрать размеры индуктивности L_2 так, чтобы она изменялась не больше, чем на 100%, что вполне удовлетворяет требованиям эксплуатации. Несомненно, это решение осуществимо тем легче, чем меньше отличаются между собою максимальные величины волнового и нормального рабочего тока.

76. ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ. ЗАЗЕМЛЕНИЕ НУЛЕВОЙ ТОЧКИ.

Эти с большим трудом достигнутые результаты, все же в известной мере являются решением вопроса. Опыт должен показать в какой мере путь, запатентованный автором, может удовлетворительно решить проблему перенапряжения.

НТБ
ДНУЗТ

Сама обмотка трансформатора таит в себе возможности далеко не малых перенапряжений. Они интересуют исключительно конструктора. Он должен найти способы борьбы с ними после того, как учение об эксплуатации с своей стороны нашло удовлетворительные способы для борьбы с внешними опасностями в виде аппаратов для защиты от перенапряжений.

После подробнейшего анализа весьма существенной частичной проблемы полезно снова охватить всю проблему перенапряжения в целом для того, чтобы таким образом исчерпать ее полностью.

Рассматриваются три группы перенапряжений: перенапряжение от поля земли, перенапряжения при включении и перенапряжения при выключении. Величина перенапряжения от поля земли должна быть ограничена разрядником, напряжения при выключении понижаются до допустимых пределов масляным выключателем, напряжения же при включении ведут к удвоению рабочего напряжения.

Если величина напряжения может подняться лишь до двойного значения рабочего напряжения, чего нетрудно достигнуть, то необходимо ограничить еще и местное перенапряжение, т. е. сгладить крутой фронт волны. Это достигается дроссельной катушкой, что вызывает новые затруднения в виде возможных явлений резонанса. Лишь объединением двух дроссельных катушек мы намерены побороть и эту трудность.

Существует еще один опасный вид перенапряжения, принадлежащий в одинаковой мере всем трем вышеупомянутым группам, но в то же время не относящийся к разряду обычных перенапряжений. Речь идет о перенапряжении при прерывистом соединении с землей, открытом и исследованном Петерсеном, наметившем и средство для успешной борьбы с ним.

Пробивания на землю неизбежны. В обширных сетях они возникают часто. Они являются как бы нежелательными процессами включения. В момент заземления образуется такая же волна, как и при обычных актах включения. Однако это место нежелательного включения совершенно неопределенно и случайно, так как заземление может произойти в любом месте сети. Ток заземления включается и выключается самым неопределенным образом. Дуга разрывается при уменьшении рабочего напряжения. Ток заземления, к сожалению, не совпадает по фазе с напряжением. Перенапряжение при разрыве дуги может принять опасные размеры.

При возрастании рабочего напряжения дуга снова возникнет, чтобы затем снова потухнуть и т. д. Таким образом мы имеем здесь дело с непрекращающимися процессами включения и выключения. Масляного выключателя здесь нет. Кроме того возникают процессы заряда линии, обнаруженные в свое время Петерсеном. Все это должно, несомненно, повести к значительным повреждениям установки, а тем самым и соседних трансформаторных станций.

Эти волны включения и выключения, вызванные заземлением, поступают в обмотку трансформатора. Также и заряд линии будет осуществляться до самых зажимов трансформатора, находящегося на конце линии. Необходимо предусмотреть на трансформаторной станции приспособление, являющееся надежной защитой от перенапряжений при заземлении.

Подобной защитой можно считать заземление нулевой точки обмотки трансформатора. Каждое заземление таким образом превращается в короткое замыкание соответствующей фазы, вызывающее действие масляного выключателя. Однако осуществление этой идеи натал-

НТЬ
ДНУЗТ

квивается на две трудности: во-первых, нулевая точка не всегда доступна, что мы имеем в случае соединения треугольником и, во-вторых, масляный выключатель не разрывает заземления сразу, а лишь по истечении определенного времени выдержки. Наконец и эксплуатационный инженер будет возражать против того, чтобы каждое заземление обуславливало собой короткое замыкание.

Соединение треугольником лишь с виду представляет собой непреодолимое препятствие. Трансформаторы для передачи энергии на расстояние никогда не соединяются треугольником. Не имело бы смысла устанавливать на конце линии трансформаторы, соединенные треугольником, так как неравномерности в нагрузке фаз представляют собой лишь местное явление, на установку же в целом они практически не сказываются. Небольшие же осветительные трансформаторы в распределительных сетях расположены около силовых трансформаторов, а потому достаточно заземления одноако трансформатора. Из этого, в качестве попутного вывода, следует заключить, что соединение треугольником имеет еще и вышеуказанный недостаток.

Гораздо более существенными трудностями являются время выключения автомата и возражения эксплуатационного инженера против ненужных частых коротких замыканий. Эти трудности ведут к тому, что от простого заземления нулевой точки приходится отказаться.

Идею заземления нулевой точки все же можно выполнить. Нулевую точку обмотки можно заземлить через достаточно большое сопротивление. Такое приспособление дает двойную пользу: во-первых, ток заземления, не переходя в ток короткого замыкания, будет обнаружен масляным выключателем, а во-вторых, сдвиг фазы тока заземления, являющегося почти чисто емкостным током,—этот сдвиг фаз будет улучшен, что уменьшит возможность повторных зажиганий. Такие заземления нулевых точек через омические сопротивления на практике себя вполне оправдали.

Еще лучше осуществить заземление через так называемую заземляющую дроссельную катушку, так как она не только ограничивает величину тока заземления, но, кроме того, улучшает также и сдвиг фазы этого тока. Необходимо, поэтому, рассмотреть последнее решение подробнее.

77. ЗАЗЕМЛЯЮЩАЯ ДРОССЕЛЬНАЯ КАТУШКА.

При заземлении длинной линии переменного тока через сопротивление R дуги в землю проходит ток. Он имеет все признаки волнового тока, до тех пор пока не заземлена каким-либо способом нулевая точка близлежащего трансформатора. Заземление через индуктивность L_3 дает замкнутую цепь, по которой и течет ток заземления.

Через заземляющую индуктивность проходят и другие токи. Каждый из трех проводов длинной линии имеет некоторую емкость C_3 относительно земли. Возникающие три емкостных тока также используют путь через индуктивность к нулевой точке трансформатора, а оттуда через фазовые обмотки к трем проводам линии.

Таким образом мы получаем картину, изображенную на фиг. 117. Занявшись подсчетом, мы кроме того убедимся, что действие индуктивности обмотки здесь сильно сказывается. Поэтому необходимо в первую очередь определить в какой мере действует индуктивность обмотки.

Нетрудно притти к несколько неожиданному результату, что речь идет, главным образом, об индуктивности рассеяния обмотки. Главный

НТБ
ДНУЗТ

поток трансформатора не должен быть нарушен. Треугольник напряжений, приложенных к трансформатору, не искажается.

Индуктивность рассеяния, как мы увидим дальше, мала в сравнении с потребной индуктивностью заземляющей катушки. Без ущерба для правильности расчета можно индуктивностью рассеяния пренебречь. Можно, если угодно, учесть ее, прибавив одну треть ее значения к заземляющей индуктивности.

Как указано выше, через поврежденную фазу проходит как ток заземления i'_1 , так и емкостный ток i''_1 .

Конечно

$$i'_1 R = \int \frac{i''_1}{C_3} dt,$$

а суммарный ток равен

$$i_1 = i'_1 + i''_1.$$

В поврежденной фазе действует напряжение

$$E_1 = E \sin (\omega t + \alpha).$$

Тогда мы имеем

$$L_3 \frac{d(i_1 + i_2 + i_3)}{dt} + i'_1 R = E \sin (\omega t + \alpha)$$

и для обеих других фаз.

$$L_3 \frac{d(i_1 + i_2 + i_3)}{dt} + \int \frac{i_2}{C_3} dt = E \sin (\omega t + \alpha + 120).$$

или

$$L_3 \frac{d(i_1 + i_2 + i_3)}{dt} + \int \frac{i_3}{C_3} dt = E \sin (\omega t + \alpha + 240).$$

Сумма обоих последних уравнений дает выражение

$$2L_3 \frac{d(i_1 + i_2 + i_3)}{dt} + \int \frac{i_1 + i_2 + i_3}{C_3} dt = \int \frac{i_1 dt}{C_3} - E \sin (\omega t + \alpha),$$

так как

$$E \sin (\omega t + \alpha + 120) + E \sin (\omega t + \alpha + 240) = -E \sin (\omega t + \alpha).$$

Мы имеем также

$$\int \frac{i_1 dt}{C_3} = \int \frac{i''_1}{C_3} dt + \int \frac{i'_1}{C_3} dt = i'_1 R + \int \frac{i'_1}{C_3} dt$$

так что вводя обозначение i для тока в заземляющей катушке

$$i_1 + i_2 + i_3 = i,$$

мы получим два простых уравнения

$$2L_3 \frac{di}{dt} + \int \frac{i}{C_3} dt = i'_1 R + \int \frac{i'_1}{C_3} dt - E \sin (\omega t + \alpha),$$

и

$$L_3 \frac{di}{dt} = -i'_1 R + E \sin (\omega t + \alpha).$$

Их сумма

$$3 L_3 \frac{di}{dt} + \int \frac{i}{C_3} dt = \int \frac{i_1'}{C_3} dt$$

переходит после однократного дифференцирования в выражение

$$3 L_3 \frac{d^2i}{dt^2} + \frac{i}{C_3} = \frac{i_1'}{C_3}$$

Подставив в это выражение

$$i_1' = \frac{E \sin(\omega t + \alpha)}{R} - \frac{L_3}{R} \frac{di}{dt} \quad (41)$$

мы получим

$$3 L_3 \frac{d^2i}{dt^2} + \frac{L_3}{RC_3} \frac{di}{dt} + \frac{i}{C_3} = \frac{E \sin(\omega t + \alpha)}{RC_3}.$$

Вместо этого можно написать также и равенство

$$3 L_3 \frac{d^2i}{dt^2} + \frac{L_3}{RC_3} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{i}{C_3} = \frac{d}{dt} \left[\frac{E}{R\omega C_3} \cos(\omega t + \pi + \alpha) \right],$$

из которого заземляющий ток можно определить как ток, проходящий через эквивалентную цепь с последовательно соединенными индуктивностью $3 L_3$, омическим сопротивлением

$$\frac{L_3}{RC_3}$$

и емкостью C , под действием напряжения

$$\frac{E}{R\omega C_3} \cos(\omega t + \pi + \alpha) = \frac{E}{R\omega C_3} \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2}\right).$$

Длительный ток в заземляющей катушке будет равен

$$i = \frac{E}{R\omega C_3 \sqrt{\left(\frac{L_3}{RC_3}\right)^2 + \left(3\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right)^2}} \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2} - \varphi\right),$$

при чем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{3\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}}{\frac{L_3}{RC_3}}.$$

Однако целью подсчета является не ток в заземляющей катушке, а ток заземления i_1' . Его можно определить из уравнения (41)

$$i_1' = \frac{E \sin(\omega t + \alpha)}{R} - \frac{L_3 \omega}{R} \cdot \frac{E \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2} - \varphi\right)}{\sqrt{(\omega L_3)^2 + R^2(3\omega^2 L_3 C - 1)^2}}$$

или

$$i_1' = \frac{E}{R} \left[\sin(\omega t + \alpha) - \frac{\cos\left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2} - \varphi\right)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} \right],$$

что можно привести к виду

$$i_1' = \frac{E \sin \varphi}{R} \cos(\omega t + \alpha - c).$$

Ток заземления может быть совершенно прекращен при

$$\sin \varphi = 0,$$

что связано с условием

$$3 \omega L_3 = \frac{1}{\omega C_3}$$

Вынужденное колебание тока заземления начинается, конечно, с собственного колебания, выраженного уравнением

$$3 L_3 \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{L_3}{RC_3} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{i}{C_3} = 0.$$

Принимая

$$i = i_0 e^{\beta t},$$

где i_0 — первоначальное значение тока в заземляющей катушке, мы получим:

$$3 L_3 \beta^2 + \frac{L_3}{RC_3} \beta + \frac{1}{C_3} = 0.$$

Это выражение для случая

$$3 \omega L_3 = \frac{1}{\omega C_3}$$

приводится к виду

$$\beta^2 + \frac{L_3}{R} \cdot \omega^2 \beta + \omega^2 = 0.$$

Таким образом

$$\beta = \omega \left[-\frac{\omega L_3}{2R} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega L_3}{2R}\right)^2 - 1} \right]$$

Собственное колебание, несомненно, апериодично, так как индуктивное сопротивление заземляющей дроссельной катушки значительно больше сопротивления дуги. Ток заземления быстро падает до нуля и разряжает поврежденную фазу.

Возвращаясь к уравнению для определения длительного тока в заземляющей катушке, мы легко находим то максимальное значение, с которого этот ток может вообще начаться при правильном выборе индуктивности заземляющей катушки, а именно

$$i = \frac{E}{\omega L_3} = 3 E \omega C.$$

Он в три раза больше максимального значения нормального емкостного тока между проводом и землей. Он не очень велик.

78. ДЕЙСТВИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЙ КАТУШКИ.

Исследования предыдущего параграфа показали, что правильно рассчитанная заземляющая катушка является отличным аппаратом для защиты от заземления. Ее индуктивное сопротивление должно равняться трехкратному емкостному сопротивлению одного фазового провода относительно земли. В этом случае провод поврежденной фазы апериодически разрядится в чрезвычайно короткий промежуток времени

и примет потенциал земли. При этом установка беспрепятственно продолжает работать.

Конечно заземление должно быть устранено и указатели заземления на трансформаторных станциях должны при этом реагировать. Важность применения подобных указателей ясна без лишних рассуждений. Заземляющая катушка дает еще одно немаловажное преимущество. Блуждающие волны, несущие атмосферные заряды, используют все три фазовых провода в качестве параллельных путей. Поэтому, дойдя до нулевой точки обмотки трансформатора, они должны были бы, при отсутствии соединения с землей, полностью отразиться.

Отражение атмосферных блуждающих волн в нулевой точке обмотки ведет, конечно, к удвоению напряжения. Правда, фронт волны доходит до нулевой точки уже значительно сглаженным, однако, она тотчас же становится вдвое круче.

Заземляющая катушка завершает путь атмосферных блуждающих волн. Нелишне рассмотреть вытекающие из этого последствия. При этом полезно выбрать наихудший случай, когда все три набегающих волны подходят крутым фронтом к нулевой точке.

Пусть напряжение волны— E , волновое сопротивление одной фазовой обмотки Z_2 . Тогда, из фазовых обмоток идут в нулевую точку три одинаковых волновых тока

$$\frac{E}{Z_2} \text{ ампер.}$$

В этот момент к заземляющей катушке приложено напряжение $2E$, которое, конечно, повышается на $2\Delta E$, так как волна преломляется и в обмотке, и в земле. В индуктивности заземляющей катушки, которую мы предполагаем сосредоточенной, течет двойной преломленный волновой ток i_2 .

Таким образом мы имеем

$$2(E + \Delta E) = L_3 \cdot \frac{d(2i_2)}{dt}$$

и

$$\frac{3E}{Z_2} = \frac{3\Delta E}{Z_2} + i_2,$$

что дает

$$2E = L_3 \frac{di_2}{dt} + \frac{Z_2}{3} i_2.$$

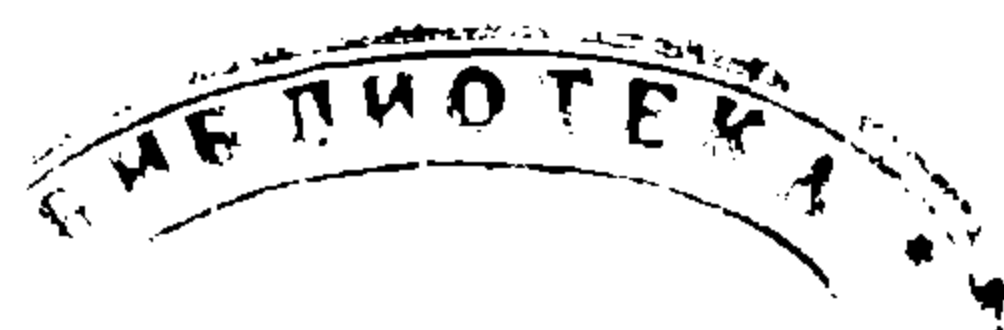
Решение гласит

$$i_2 = \frac{6E}{Z_2} \left[1 - e^{-\frac{Z_2}{3L_3} t} \right]$$

и

$$L_3 \frac{d(2i_2)}{dt} = 4E e^{-\frac{Z_2}{3L_3} t}$$

Блуждающая волна постепенно разряжается через заземляющую катушку и напряжение нулевой точки относительно земли падает по экспоненциальному закону. Если же блуждающая волна пришла к нулевой точке уже значительно сглаженной, то в этом случае заземляю-



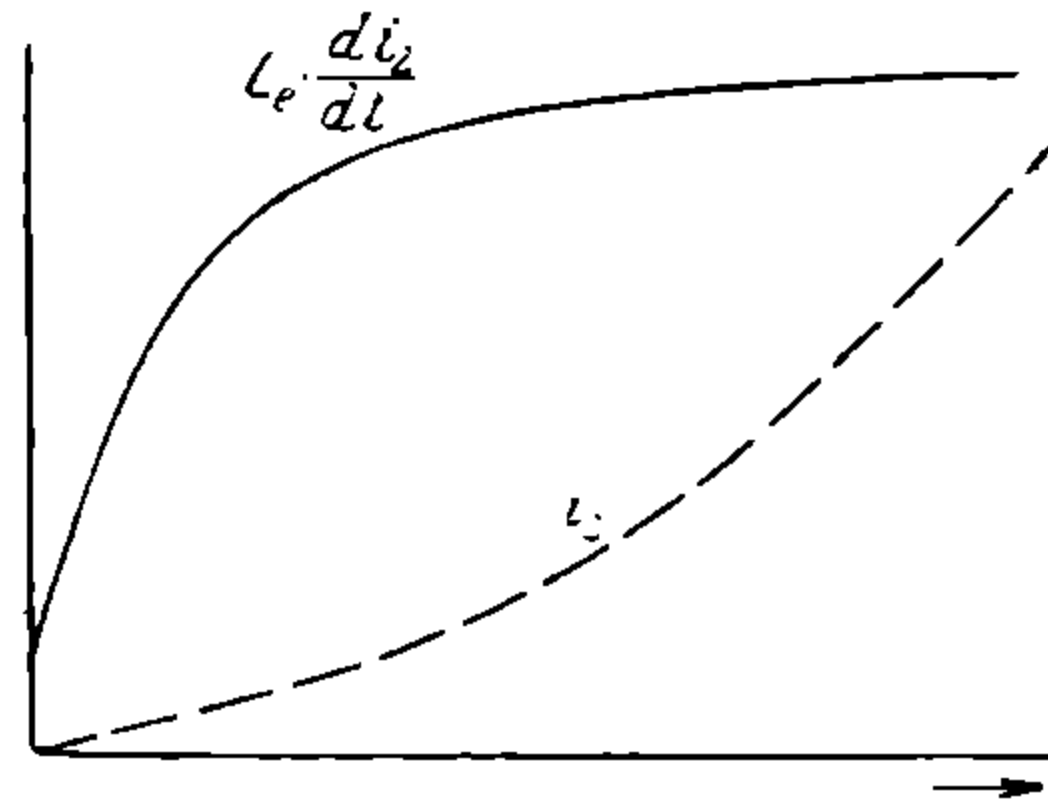
щая катушка действует безукоризненно. В этом нетрудно убедиться, если принять, например, прямолинейный подъем волны напряжения, что соответствует выражению

$$E = kt,$$

где k — постоянная величина.

Тогда мы имеем

$$2 kt = L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{Z_2}{3} i_2.$$



Фиг. 118.

Решение гласит

$$i_2 = \frac{3 kt}{Z_2} - \frac{9 kL_2}{Z_2^2} \left[1 - e^{-\frac{Z_2}{3L_2} t} \right].$$

Оно соответствует фиг. 118. При этом мы имеем

$$L_2 \frac{d(2i_2)}{dt} = \frac{6 kL_2}{Z_2} \left[1 - e^{-\frac{Z_2}{3L_2} t} \right].$$

Напряжение и ток возрастают в дроссельной катушке постепенно (фиг. 118).

VII. Охлаждение.

79. ПРОБЛЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ.

Забота о правильном отведении тепла от трансформатора является, собственно говоря, делом конструктора. Он должен так выполнить свою конструкцию, чтобы при полной нагрузке, ни в железе сердечника, ни в обмотках, ни в масляной ванне температура не перешла бы установленных нормами границ.

К сожалению, на проблему охлаждения установился чересчур упрощенный взгляд; эксплуатационный инженер считает что эта проблема его не касается. Он забывает, что конструктор при своих расчетах исходит из этого предположения, что трансформатор работает в помещении, температура которого никогда не переходит границ допускаемых нормами безопасности.

Забота о температуре помещения является безусловно делом эксплуатационного инженера и учение об эксплуатации должно ему об этом напомнить. Однако, рассматривая проблему охлаждения, учение об эксплуатации не должно ограничиться лишь рассмотрением вопроса о температуре помещения трансформаторной станции. Существует еще целый ряд вопросов охлаждения, касающихся как конструктора, так и эксплуатационного инженера и, след., требующих их согласованного решения.

Проблема осветительного трансформатора, рассмотренная выше, уже представляла собой в значительной мере часть проблемы охлаждения. Сюда же относятся и проблемы кратковременных нагрузок, которые должны быть разрешены эксплуатационным инженером.

Проблема нагревания трансформатора, взятая в целом, должна быть, хотя бы в грубых чертах, знакома эксплуатационному инженеру. В эксплуатации очень часто встречаются трудности, устранение которых возможно лишь при полном их понимании.

Эта часть учения об эксплуатации должна быть, след., начата с описания процессов охлаждения в трансформаторах. Необходимо установить, что следует требовать от конструктора. В эксплуатации охлаждение не должно быть нарушено из-за неудачного устройства.

Из этого вытекает проблема вентилирования камеры трансформатора, являющаяся чисто эксплуатационной проблемой. Как ни существенна эта проблема, ею все еще продолжают пренебрегать. Недостаточно охлаждаемые камеры все еще продолжают оставаться частым явлением.

Из проблемы трансформаторной будки вытекает очень существенная и до сих пор мало рассмотренная проблема выбора способа охлаждения мощных трансформаторов. Почти всегда представляется возможным ввести или водяное или масляное охлаждение.

Выбор между этими двумя способами охлаждения является задачей эксплуатационного инженера.

Существует целый ряд вопросов охлаждения, которые должны быть рассмотрены учением об эксплуатации. Было бы удивительно, если бы проблема занимавшая в последние десятилетия конструктора не касалась эксплуатационного инженера.

Каждый конструктор имевший случай сталкиваться с эксплуатационными трудностями, знает, что очень часто приходится бороться против полного непонимания учения об эксплуатации. В малых предприятиях единственным, хотя и негодным, прибором для измерения температуры еще до сих пор продолжает оставаться рука дежурного. Во многих предприятиях все еще продолжают требовать от трансформаторов невозможного. До сих пор еще не исчезло мнение о «беспредельной» выносливости трансформаторов.

И эксплуатационный инженер должен наконец согласиться с тем, что единственно экономически правильным решением является приближение допустимой длительной нагрузки вплотную к таким значениям, при которых достигается предел допустимого нагревания. Из-за небрежности многих эксплуатационных инженеров при определении номинальной мощности приобретаемого трансформатора во многих предприятиях плохо используется ценный и дорогой материал.

Эксплуатационный инженер вполне прав в том случае, если он извлекает из своих трансформаторов все возможное и допустимое. Но для этого требуется полное знакомство с существенными вопросами охлаждения, являющимися частью учения об эксплуатации трансформатора.

Учению о трансформаторостроении удалось наконец подвести научный фундамент под проблему охлаждения и тем самым устранить грубые методы опытного решения ее. Проблема охлаждения, в части касающейся конструктора, вполне разрешима. В своей книге «Die Transformatoren» (Berlin, 2 Auflage, Julius Springer, 1925) автором даны все необходимые для конструктора подробные сведения. Необходимо чтобы и эксплуатационный инженер получил удовлетворительные сведения в своей части.

Таким путем можно избежать многих неприятностей в эксплуатации. Избежит при этом незаслуженных обвинений и конструктор. Для правильного проектирования трансформаторных станций именно в эксплуатационной проблеме охлаждения необходима полная ясность.

80. ОТВЕДЕНИЕ ТЕПЛА И ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ЭТИМ.

Работающий трансформатор длительно расходует в железе сердечника и в обмотках энергию, которая проявляется в виде тепла и повышает температуру материалов над температурой окружающей среды. Потеря энергии частично зависит от нагрузки. Потери в железе остаются практически постоянными, так как они зависят исключительно от напряжения, потери же в меди пропорциональны квадрату тока нагрузки.

Чувствительность изоляционных материалов и, прежде всего, хлопчатой бумаги, употребляемой для оплетки проводов обмотки, к высокой температуре налагает как на конструктора, так и на эксплуатационного инженера обязанность следить за тем, чтобы температура в любом месте трансформатора не перешла допустимые границы.

В главе III мы уже видели, что при коротких замыканиях кратковременные превышения над допустимой предельной температурой неизбежны. Здесь идет речь, конечно, лишь о секундах. Желательные же

НТБ
ДНУЗТ

перегрузки длятся большее время. Они не должны вызывать температуру больше предельной.

Конструктор должен рассчитывать по самому худшему случаю, а потому заранее принимает длительные нагрузки. Для этого наиболее тяжелого случая он и определяет еще допустимую нагрузку. Таким образом возникает понятие о номинальной мощности, а также и о максимальных длительно допустимых потерях в железе и меди.

Каким образом трансформатор отводит длительно эти потери? Ясно, что в каждую единицу времени он отводит столько тепла, сколько его возникает. В противном случае наблюдалось бы накопление тепла, которое неминуемо проявилось бы в виде повышения температуры. Таким образом должен возникнуть тепловой поток, источником которого является работающие железо и медь. Этот поток, практически, заканчивается на поверхностях железа и обмотки.

Однако, это лишь часть всего теплового потока, так называемая внутренняя часть. Здесь он течет аналогично току в проводнике. Он непрерывно подает поверхностям железного сердечника и обмотки тепло, следуя при этом, как и электрический ток, закону Ома. «Падение температурного напряжения» тем больше, чем длиннее путь и меньше поперечное сечение потока.

У поверхности нагревающегося тела тепловой поток разветвляется. Часть подведенного тепла излучается с горячей поверхности на более холодные поверхности тел, окружающих трансформатор, как-то, на стенки трансформаторной будки и т. д. Остальное тепло течет от горячей поверхности к более холодным маслу или воздуху, окружающим трансформатор.

Как воздух так и масло нагреваются. Они являются плохими проводниками тепла, а потому последнее должно в трансформаторе накапливаться. Однако, при этом тотчас же возникает движение нагретых у поверхности трансформатора слоев масла или воздуха, иначе говоря, образуется охлаждающий поток, продолжающий отводить тепло. Такое отведение тепла представляет собой чрезвычайно существенное явление.

При трансформаторе с масляным охлаждением эксплуатационный инженер в этом случае имеет еще право на выжидательное бездействие. Конструктор должен еще сначала проследить, куда направляется поток масла и осуществляет ли он в дальнейшем отдачу тепла. Этот поток не должен задерживать тепла. Если на место ушедших нагретых частиц масла не будет поступать новых еще холодных, то длительное охлаждение немислимо. Тепло должно покинуть и масляную ванну.

Нагретое масло скопляется в верхней части кожуха трансформатора. Там оно приходит в соприкосновение со стенками кожуха, отдает ему тепло, следовательно охлаждается, а потому становится тяжелее и падает вниз. Поток масла, снимающий тепло с поверхности трансформатора, направляется вверх. Поток масла, отдающий тепло внутренней стенке кожуха, направляется вниз. Оба эти потока образуют таким образом естественный замкнутый поток масла, непрерывно передающий тепло от поверхности трансформатора к поверхности кожуха.

Наконец с наружной поверхности кожуха происходит отдача тепла в окружающую среду частью излучением, а частью конвекцией. У стенки кожуха возникает воздушный поток, такой же как у поверхности сухого трансформатора, или, скажем, такой же как масляный поток у поверхности трансформатора с масляным охлаждением. Об этом воздушном потоке, так же как и о воздушном потоке в сухом трансформаторе, конструктор заботится лишь в той мере, в какой речь идет о поверхности

его конструкции. Остальное он предоставляет эксплуатационному инженеру. Он, конечно, иначе и не может поступить, так как не знает, где будет установлен его трансформатор.

Эксплуатационный инженер охотно будет рассматривать трансформаторную будку как кожух, отнимающий своими внутренними стенками тепло у воздушного потока и отдающий это тепло через внешние стенки атмосфере. Однако стенка кожуха состоит из тонких железных листов, хорошо проводящих тепло, стенки же будки представляют собой каменную конструкцию, которую практически можно считать нетеплопроводной. Лишь железную трансформаторную будку можно сравнить с кожухом трансформатора. Каменные трансформаторные будки представляют собою трудную эксплуатационную проблему, которой нельзя пренебречь.

81. ВНУТРЕННИЙ ТЕПЛОВОЙ ПОТОК.

Тепловой поток в железе сердечника или в обмотке представляет собою сложное явление. Уж одно то обстоятельство, что по пути к этому потоку притекают все новые и новые количества тепла, так как теплота возникает в каждом элементе меди или железа—это обстоятельство придает потоку несколько своеобразный характер. К тому же вопрос осложняется еще и тем, что теплопроводность как в железном сердечнике, так и в массиве обмотки, не повсюду одинакова. В железном сердечнике тепловой поток должен протекать также и от листа к листу. При этом он поочередно встречает на своем пути то хорошо проводящее железо, то плохопроводящие промежуточные прослойки. В обмотке поток течет от витка к витку в поперечном направлении. Здесь он встречает на своем пути попеременно то отличный проводник тепла — медь, то плохопроводящую тепло изоляцию витков.

Для изучения явления проще всего принять, что тепло протекает при некоторой средней теплопроводности в теплопроводе с постоянным поперечным сечением в один квадратный дециметр (фиг. 119). На пути в dx [dm], на расстоянии x [dm] от начала будет расходоваться «температурное напряжение» dt [°C], пропорциональное dx , а также и величине теплового потока в этом месте [ватты] и обратно пропорциональное поперечному сечению, а также и теплопроводности λ_T .

$$\frac{dt}{dx} = \frac{w}{\lambda_T}$$

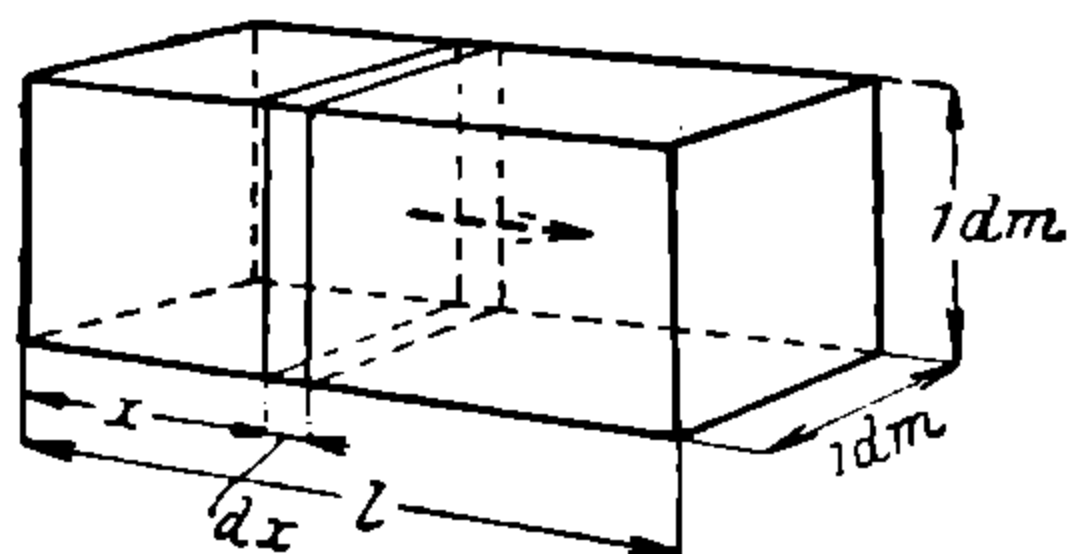
Если в единице объема [dm³] возникают потери w [W/dm³],

то мы получим

$$- dt = \frac{wx}{\lambda_T} \cdot dx,$$

а по всей длине l [dm] теплопровода

$$- \Delta t = \frac{w \cdot l^2}{2 \cdot \lambda_T}.$$



Фиг. 119.

Внутреннее температурное напряжение растет пропорционально квадрату расстояния самой горячей точки от охлаждающей поверхности. Это положение не изменится даже и в том случае, если учесть, что поперечное сечение внутреннего теплопровода почти всегда увеличивается по мере приближения к поверхности.

Эксплуатационный инженер обязан знать, что внутренняя часть теплопровода подчиняется вышеупомянутому закону. Как распределить имеющееся суммарное температурное напряжение (составляющее у трансформаторов с масляным охлаждением — 70° C), следовательно,

НТБ
ДНУЗТ

какую часть этого напряжения положить для внутреннего теплового потока, это — дело конструктора. Однако внутреннее температурное напряжение между самой горячей точкой и поверхностью трансформатора не должно быть слишком большим. В этом легко убедиться.

В нормах предусматривается среднее превышение температуры для меди в 70°C , а не максимальное, так как среднее превышение температуры меди легко определить по увеличению сопротивления, тогда как максимальное превышение не поддается измерению. Нормы ограничивают также и превышение температуры масла, а тем самым и превышение температуры поверхности обмоток. Это превышение составляет 60°C . Неправильно, будто трансформатор совершенно в порядке, если в нем средняя температура меди составляет 69°C , а превышение температуры масла — 50°C . Чем больше температурное напряжение между поверхностью обмотки и охлаждающим веществом, тем больше добавочное температурное напряжение от средней до максимальной температуры меди. Лишь это добавочное напряжение является критерием безопасности для хлопчатобумажной оплетки.

Существует лишь одна защита против выделяемых значительных количеств тепла. Необходимо укоротить длину внутреннего теплопровода, обмотка и железный сердечник должны быть по возможности, разделены так, чтобы охлаждающая поверхность повсюду соприкасалась с внутренними рабочими частями меди и железа.

Охлаждающие каналы вызывают увеличение объема обмоток. Разделение железного сердечника и обмотки несомненно удорожает конструкцию. Однако это безусловно необходимо. На это обстоятельство было указано и в параграфе 5. Эксплуатационный инженер должен чрезвычайно недоверчиво относиться к конструкциям, в которых проявляется стремление к большим экономиям в объеме.

Этим вопрос не исчерпывается. Существенна также и средняя теплопроводность массива обмотки. И эта теплопроводность должна быть рассмотрена, как и длина теплопровода. Далеко не безразлично имеет ли катушка из круглого провода между своими витками лишь воздух или же относительно хорошо теплопроводящий состав для пропитывания обмоток.

Непропитанные катушки нехороши. Для них в нормах предусматривается более низкая предельная температура. Однако, для эксплуатационного инженера этот вопрос приобретает особое значение, что безусловно необходимо отметить.

Трансформаторы, строящиеся в настоящее время, имеют хорошо пропитанные катушки, в которых отсутствуют какие-либо раковины или пустоты. Пропитывание производится в специальных мастерских. Таких мастерских на электрических станциях нет. Эксплуатационный инженер, перематывающий у себя на предприятии поврежденную катушку, этим самым как бы вводит в трансформатор непропитанную катушку.

Он не должен при этом забывать, что установкой такой катушки он понизил предел нагревания, а следовательно и допустимую длительную мощность трансформатора. Об этом обстоятельстве мало думают. Кустарничество дает лишь с виду экономию. Лучше всего такую, изготовленную собственными средствами, катушку немедленно заменить фабричной.

Для временной работы катушка своего изготовления, конечно, приемлема, так как она дает все же возможность продолжать подачу тока.

82. ИЗЛУЧЕНИЕ ТЕПЛА.

Внутренняя часть теплового потока подает тепло на поверхность железа сердечника и обмотки. Здесь он более или менее равномерно распределяется с плотностью, являющейся мерой внутреннего и внешнего температурного напряжения.

Однако дело обстоит не просто так, будто только теряемое тепло, распределенное по поверхности охлаждаемого тела, дает понятие о плотности потока. Для излучения тепла мы имеем совершенно другие соотношения.

Отдача тепла через излучение происходит в сухом трансформаторе непосредственно, а в трансформаторе с масляным охлаждением—лишь через внешнюю поверхность кожуха. Полезно рассмотреть это ответвление теплового потока несколько подробнее.

Излучение тепла аналогично излучению света. Из какой-либо внешней точки мы видим не действительную поверхность рассматриваемого тела, а лишь проекцию этой поверхности. Тень дает представление лишь о неправильностях поверхности, но она вводит в заблуждение относительно объема видимого предмета. Поверхность излучает не так как она есть, а лишь своей проекцией на плоскость перпендикулярную к главному направлению. Трансформатор со своим сложным очертанием поверхности обмоток излучает лишь поверхностью цилиндра, окружающего его обмотки. Кожух из волнистого железа излучает, как гладкий кожух. Железный сердечник со своей необработанной поверхностью излучает как-будто бы он был массивным, а не составленным из отдельных листов.

Возьмем маломощный сухой трансформатор с обыкновенным расположением обмоток, потерями в меди V_m и определенной поверхностью охлаждения обмотки. Увеличив все размеры этого трансформатора в x раз, не изменив при этом его формы, мы получим (при одинаковой плотности тока в меди и одинаковой индукции в железе) мощность в x^4 раза большую прежней. Потери в меди будут $V_m x^3$, поверхность охлаждения увеличится в x^2 раз. Несомненно, плотность теплового потока на поверхности обмоток увеличилась в x раз.

Отсюда становятся ясными все трудности проблемы охлаждения. Ясно и то, что с возрастающей мощностью увеличение поверхности охлаждения можно достигнуть лишь за счет дальнейшего подразделения обмотки. Мощные трансформаторы несмотря на искусственное охлаждение выполняются с значительным количеством небольших катушек.

Однако проекцию поверхности обмотки нельзя получить из закона роста. Обмотка излучает прямо независимо от того состоит ли она из одной или 10 катушек.

Таким образом совершенно очевидно, что по мере возрастания мощности теплоотдача через излучение должна все более и более отставать от теплоотдачи через конвекцию. В более или менее мощных трансформаторах излучение тепла будет меньше на несколько процентов от суммарной теплоотдачи.

Но во всяком случае излучаемой частью внешнего теплового потока нельзя пренебречь, особенно если речь идет о маломощных трансформаторах. Отсюда ясно, что эксплуатационный инженер должен все это учитывать. Конструктор заранее предполагает, что его трансформатор будет свободно излучать, что он будет окружен поверхностями охлаждения, температура которых соответствует температуре воздуха. Такое предположение должно, по возможности, оправдываться в эксплуатации.

Если в предприятии два трансформатора расположены близко друг к другу, то этим самым отнимается у них в значительной мере возможность излучения. Они направлены друг к другу большими поверхностями с одинаковой температурой, между которыми обмен тепла немислим.

Работа трансформаторов значительно улучшится, если между ними будет находиться холодная стена камеры. Однако по мере возрастания мощности, такое взаимодействие расположенных рядом трансформаторов становится все менее опасным. Нежелательные результаты могут получиться в том случае, если маломощный трансформатор поставлен рядом с мощным.

С достаточной точностью можно допустить, что излучение пропорционально температурному напряжению между излучающей поверхностью и поверхностью на которую происходит излучение. Поэтому у малых сухих трансформаторов обращенные друг к другу поверхности сторон катушек охлаждаются значительно хуже, чем свободные наружные поверхности, так как первые охлаждаются лишь конвекцией, а вторые, кроме того, и излучением.

К этой разнице сводится несколько расплывчатое понятие «действующей» поверхности сухого трансформатора. Поэтому в поисках особо нагретых мест измеряется также и температура в междукатушечном пространстве.

Железный сердечник и обмотка нагревают друг друга излучением. Керн может отдавать тепло лишь через ярмо. При этом образуется весьма длинный внутренний теплопровод, приблизительно от середины керна. Этот теплопровод обуславливает высокую температуру в мало доступном месте. В таком месте обмотка подвергается большой опасности. Охлаждающий канал между обмоткой и керном не должен быть загражден. Очень часто этому уделяют недостаточно внимания.

83. ОТВЕДЕНИЕ ТЕПЛА ДВИЖУЩИМИСЯ ОХЛАЖДАЮЩИМИ ЖИДКОСТЯМИ.

Для хорошего охлаждения самым главным является отведение тепла охлаждающим воздушным или масляным потоком. Воздух или масло повсюду должны иметь доступ к нагретым поверхностям. Кроме того поток охлаждающей жидкости должен иметь возможность не только притекать, но и утекать.

Расположение охлаждающих каналов, расстояние между отдельными катушками, между обмоткой и керном — все это является исключительно делом конструктора. На обязанности же эксплуатационного инженера — наблюдать за охлаждающим аппаратом и содержать его в порядке.

Сущность явления отведения тепла уже вкратце описана. С нагретой поверхности тепловой поток идет по охлаждающей жидкости как по теплопроводу. Таким образом теплопроводность этой охлаждающей жидкости имеет большое значение.

Поверхность охлаждения не должна быть загрязнена. Пыль и продукты разложения масла являются злейшими врагами охлаждения. Их не должно быть между рабочей поверхностью и воздухом или маслом.

Нельзя трансформатор долгие годы попросту предоставить самому себе. Правда, первосортные масла мало загрязняются. Однако время делает свое дело. В мощных трансформаторах с внутренним водяным охлаждением поверхности охлаждения подвергаются сильному загрязнению как со стороны масла, так и со стороны воды.

НТБ
ДНУЗТ

В правильно построенных трансформаторах охлаждающая жидкость удачно используется и в качестве изолирующего материала. Опасность пробивания, при наличии пыли и продуктов разложения масла, больше, чем опасность плохого охлаждения. Чистота значительно удлиняет срок существования трансформатора.

Для отведения тепла имеет большое значение теплоемкость охлаждающей жидкости. При том же приращении температуры, чем больше тепла можно передать единице объема охлаждающей жидкости, тем короче тепловой поток, проходящий от нагретой поверхности по прослойкам жидкости. Длина же теплового потока обуславливает необходимое температурное напряжение на поверхности.

Масло является значительно лучшим проводником, чем воздух. Оно имеет значительно большую теплоемкость и удельный вес, что дает ему значительные преимущества при отведении тепла.

Охлаждение маслом дало хорошее решение проблемы охлаждения трансформатора, одновременно и проблемы его изоляции. Трудности охлаждения поверхности обмотки, при растущей мощности, были в значительной мере уничтожены введением масляного охлаждения. Эти трудности все же всплывают при охлаждении поверхности кожуха.

Однако поверхность кожуха теоретически можно увеличить до каких угодно размеров, сделав ее волнообразной. Масляная ванна не только отводит от трансформатора тепло, но дает еще и возможность значительно повысить плотность тока в меди в сравнении с сухим трансформатором.

Как уже упомянуто, проекция поверхности кожуха строго подчиняется закону роста. Поэтому с возрастающей мощностью, действительная поверхность кожуха должна все более и более увеличиваться в сравнении с поверхностью проекции. иначе говоря, железо кожуха должно быть все более и более волнистым. Например, при 2 000 *kVA* глубина волны железа в 300 *mm* может оказаться не совсем достаточной.

Такие стенки кожуха вызывают лишний расход масла. Естественное масляное охлаждение связано с все большими и большими издержками. Закон роста для проблемы охлаждения сказывается здесь полностью. Мы приходим, наконец, к мощности, при которой из экономических соображений окажется необходимым лучшее охлаждение.

Отведение тепла естественно движущимся потоком жидкости зависит еще от одного фактора — от скорости передвижения нагретых частей жидкости. Воздушный поток гораздо подвижнее масляного. Первый проходит несколько дециметров в секунду, тогда как второй — лишь несколько миллиметров. Несмотря на это, масло, конечно, следует предпочитать.

Сопротивления потоков сильно зависят от внутреннего трения жидкости. Для воздуха эти сопротивления имеют определенную величину. Иначе обстоит дело с маслом. Чем больше масло нагрето, тем оно подвижнее и тем лучше оно охлаждает. Если мы с известным приближением будем считать, что отведение тепла в воздушной ванне пропорционально температурному напряжению на поверхности, то для масляной ванны получим возрастание почти пропорциональное квадрату температурного напряжения.

Масло лучше действует при нагрузках а также при временных перегрузках. Однако эксплуатационный инженер не должен, заказывая масло, забывать о требовании его достаточной вязкости. Вопрос о вязкости масла подробно рассматривается в нормах. Масло представляет собой в эксплуатации весьма важный материал, на котором не следует чересчур экономить.

НТБ
ДНУЗТ

84. ЗНАЧЕНИЕ ХОРОШЕГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ КАМЕРЫ.

При расчете отведения тепла от поверхности трансформатора, конструктор попросту рассматривает тот «отрезок» охлаждающего потока жидкости, который приходит в соприкосновение с нагретой поверхностью. Для такого «отрезка потока» ему известны и движущая сила и сопротивление его течению.

Если трансформатор находится в очень большом помещении, то забота об охлаждающем воздушном потоке излишня. Этот поток может расширяться, ему остается преодолеть лишь внутреннее трение воздуха (после того как отпало значительное трение об охлаждаемую поверхность), кроме того он отдает свое тепло в воздух через теплопроводность.

Помещения для испытания трансформаторов обычно отличаются большими размерами. Поэтому при испытании трансформатора не возникает никаких затруднений, связанных с его охлаждением (конечно, если он соответствующим образом рассчитан).

В условиях эксплуатации его часто устанавливают в небольшой будке. В этом случае соотношения изменяются не в пользу хорошего охлаждения и поток, отводящий тепло, находится, разумеется, далеко не в благоприятных условиях. Результатом этого явится нарушение нормальной работы трансформатора и неизбежные разногласия между эксплуатационным инженером и конструктором.

Конструктор иначе не может поступать. Ему неизвестно в каких условиях придется работать его трансформатору, да если бы и знал, он все же не мог бы согласиться с таким положением, при котором ему приходится приспосабливаться к отдельным случаям. Он не имеет права допустить такую экономическую ошибку. Он должен требовать, чтобы в трансформаторной будке были условия благоприятные для отведения тепла.

Таким образом возникает важнейшая проблема учения об эксплуатации, а именно, — проблема охлаждения. Как она ни существенна, ею все же часто пренебрегают. Она кажется трудной собственно говоря потому, что она является проблемой течения воздуха. Однако, эта трудность лишь кажущаяся. На деле же можно найти достаточно исходных точек, дающих возможность найти удовлетворительное практическое решение проблемы.

Прежде всего следует отметить, что через каменные стенки трансформаторной будки тепло не может быть отведено. С другой стороны это тепло не должно оставаться и в самой будке. Необходимо чтобы эксплуатационный инженер сам в этом убедился из простого расчета.

При полной нагрузке трансформатор имеет потери — V ватт. Если это тепло от потерь будет нагревать воздушную ванну трансформаторной будки (объем которой равен Q m^3), то температура в ней очень быстро примет недопустимые пределы. Каждый кубический метр воздуха весит приблизительно $1,25$ kg , а один килограмм воздуха требует одну киловатт-секунду для того, чтобы нагреться на $1^\circ C$. После одного часа полной нагрузки температура воздуха, след., повысилась бы на

$$\frac{3600 V 10^{-3}}{1,25 Q} \text{ } ^\circ C.$$

Пример: Трансформатор мощностью в 100 kVA , имеющий потери при полной нагрузке в 3000 W , помещен в закрытую будку, объем которой равен 25 m^3 . Прирост температуры воздуха оказался бы равным

$$\frac{3600 \cdot 3000 \cdot 10^{-3}}{1,25 \cdot 25} = 345 \text{ } ^\circ C.$$

Эти числа кажутся невероятными и не соответствующими опытным данным. Тем не менее они верны и дают ясное представление об опасности, возникающей при наличии закрытых трансформаторных будок. Почему же трансформатор, помещенный в такую закрытую будку, не сгорает? Через каждую трещину стены, особенно через щели окна и двери уходит нагретый воздух и на его место поступает холодный. Кроме того некоторую часть тепла отводит и стена. Совершенно очевидно, что самая лучшая конструкция окажется непригодной в условиях закрытой будки. Остается лишь один путь — хорошая вентиляция. Нагретый воздух должен непрерывно отводиться, а холодный — подводиться. Вышеприведенный пример показывает насколько подобная вентиляция необходима.

В больших городах часто встречаются трансформаторные камеры такого небольшого объема, что при заказах трансформаторов приходится предписывать их размеры. Нетрудно понять, что следует ожидать от подобной установки. Нигде, пожалуй, не требуется в такой степени вмешательства учения об эксплуатации, как в случае трансформаторной камеры.

Камеры должны вентилироваться. Непрерывно проходящий через камеры воздушный поток нагревается, конечно, на несколько градусов Цельсия, именно, на $\Delta t^\circ \text{C}$. Если сила потока равна $Q \cdot \text{m}^3/\text{сек}$, то мы должны получить

$$\Delta t = \frac{V \cdot 10^{-3}}{1,25 Q} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Пример. Допуская в будке трансформатора, рассмотренного в последнем примере, нагревание воздуха в 10°C , мы получаем необходимый воздушный поток силой в

$$Q = \frac{3000 \cdot 10^{-3}}{1,25 \cdot 10} = 0,24 \text{ m}^3/\text{сек}.$$

Проблема оказывается легко разрешимой. Вентиляция приносит значительную пользу. Однако, несмотря на простоту этого решения, еще до сих пор существуют трансформаторы, страдающие от недостаточной вентиляции. Проблема вентилирования трансформаторной будки имеет свои тонкости, разъясняющие некоторые непонятные моменты. Вышеприведенное описание явления выполнено в несколько грубых чертах; его необходимо значительно уточнить, что видно из самой сути проблемы охлаждения.

85. ВЕНТИЛИРУЮЩИЙ ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК В ТРАНСФОРМАТОРНОЙ КАМЕРЕ.

Вентилирование трансформаторной будки теоретически разрешается просто, тогда как практически оно сталкивается с некоторыми затруднениями. Последние вытекают из требований эксплуатационного инженера, заключающихся в том, что воздушный поток должен создаваться без дополнительного оборудования вентиляционными машинами

Это требование понятно и вполне законно. Особый вентилятор расходует энергию, которую с полным правом можно причислить к потерям энергии в трансформаторе. Более того. Всякая искусственная вентиляция требует специального надзора, что отпадает при естественном охлаждении и вентиляции. Вентилятор может испортиться и остано-

ДРУЗЬ

виться и тем самым подвергнуть трансформатор большой опасности, тогда как при естественном воздушном потоке этого случиться не может.

Мыслимы случаи, когда эксплуатационный инженер все же прибегнет к помощи вентилятора. Однако, это будет неприятно не только эксплуатационному инженеру. Искусственное охлаждение создает неискренние отношения между конструктором и эксплуатационным инженером.

Оба они знают, что отведение тепла от трансформатора сильно зависит от скорости охлаждающего потока. Им обоим ясно, что искусственное вентилирование может увеличить скорость охлаждающего потока, а при известных обстоятельствах оно ее и увеличивает. Вентилятор здесь является как бы скрытым признанием несостоятельности конструкции.

Таким образом центром тяжести проблемы вентиляции является естественность вентилирующего воздушного потока, а тем самым и отсутствие лишнего расхода энергии. Обслуживающий персонал дорожит надежностью охлаждения естественным воздушным потоком не подлежит сомнению. После всего сказанного ясно, что единственно правильным является охлаждение трансформаторных будок естественной воздушной тягой.

Легко понять, какие затруднения возникают при этом. Сила вентилирующего потока задана. При данной возможной скорости движения воздуха упомянутая сила потока может быть обеспечена лишь при определенном сечении каналов для приходящего и уходящего воздуха. Скорость же движения воздуха зависит от разности высот между концами приводящего и отводящего каналов. Поперечные сечения каналов и разности высот вызывают трудности при устройстве камеры. Более подробное исследование должно показать, как разрешить эти трудности, но как бы то ни было, сила вентилирующего потока является для них хорошим критерием.

Из исследования предыдущего параграфа несомненно вытекает, что сила вентилирующего потока зависит, прежде всего, от температурного напряжения, устанавливающегося между приходящим холодным и отходящим нагретым воздухом. Объяснения между конструктором и эксплуатационным инженером будут поэтому, в первую очередь, вращаться вокруг этого вопроса.

Ясно, что в трансформаторной будке воздух нигде не может быть более нагретым, чем у самой поверхности трансформатора. Было бы поэтому ошибочно для вентилирующего потока допустить большее температурное напряжение, чем для отведения тепла от трансформатора. Об этом никто и не думает. При отведении тепла как от поверхности обмотки, так и от наружной поверхности кожуха мы имеем дело с температурным напряжением равным 40°C .

Допустимое температурное напряжение вентилирующего потока должно быть взято меньше вышеуказанной величины. Прежде всего это следует и из распределения температуры в отводящем потоке. Как уже известно, в теплопроводе температура уменьшается по мере удаления от нагретой поверхности к охлаждающему воздуху. В воздушной прослойке у охлаждаемой поверхности температура падает по мере удаления от этой поверхности. Вследствие плохой теплопроводности воздуха температурное напряжение, приблизительно в 40°C , расходуется уже на небольшом расстоянии в несколько миллиметров. Таким образом температура воздуха в середине отводящего потока больше температуры окружающего неподвижного воздуха лишь на 20°C .

Как только отводящий поток покидает нагретую поверхность, установившееся в нем прежде распределение температуры, конечно, исчезает. Вместо разной температуры в отдельных слоях устанавливается некоторое среднее превышение температуры над окружающим воздухом. Для вентилирующего потока предельными значениями температурного напряжения будут являться лишь эти 20°C . Однако нельзя принимать и таких больших значений. Над трансформатором происходит дальнейшее нагревание воздушных масс, которое неизбежно и желательно. С этим нагреванием новых воздушных слоев тесно связано и некоторое снижение температуры основного потока.

Таким образом доказано, что вентилирующий поток должен быть рассчитан на температуру меньшую 20°C . Малые значения температурного напряжения вентилирующего потока конструктору желательны, эксплуатационному же инженеру они удорожают камеру. Оба они должны все же сойтись на какой-либо температуре приемлемой для обоих. Такой температурой оказывается 15°C , а при известном запасе 10°C .

Положив для температурного напряжения вентилирующего потока температуру в 15°C , что должно вполне соответствовать естественному охлаждению, мы этим самым значительно продвинем вперед проблему вентиляции. Остается решить лишь конструктивную задачу, определив размеры приводящего и отводящего каналов и разность высот между их поперечными сечениями. Однако эта задача может быть решена лишь при исследовании соотношений между течениями в вентилирующем потоке, что и будет выполнено в дальнейшем.

86. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ КАМЕРЫ.

Между выходным и входным отверстиями, следовательно между начальным и конечным поперечными сечениями вентилирующего потока, расположены два воздушных столба. Один из них находится снаружи на открытом воздухе, другой — внутри в самой будке. Высота их H м. Они неодинакового веса. В будке воздух достигнет температуры в 15°C , а в общем случае, в $\Delta t^{\circ}\text{C}$, что составляет в среднем грубо говоря, превышение температуры в $\frac{\Delta t}{2}$ над наружным воздухом. Удельный вес этого воздуха, таким образом, в

$$\frac{1}{1 + \frac{\alpha \cdot \Delta t}{2}} \text{ раз}$$

меньше удельного веса наружного воздуха. Здесь α — коэффициент расширения воздуха.

Таким образом на один квадратный метр входного отверстия мы имеем давление

$$H \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{\alpha \cdot \Delta t}{2}} \right) \cdot \gamma \text{ кг},$$

где γ — удельный вес холодного наружного воздуха в кг/м^3 .

Это выражение не точнее остального расчета. Следовало, собственно говоря, в обоих случаях веса воздуха отнести к 0°C . Однако это не имело бы смысла, так как в остальном расчете речь идет лишь о приблизительных величинах.

Давление, передвигающее воздух, должно преодолеть сопротивление течению. Как известно это сопротивление пропорционально так называемому скоростному напору: $\frac{v^2}{2g}$,

ИТЬ
ДНУЗТ

где;

v — скорость движения воздуха в $m/сек$,

g — ускорение силы тяжести в $m/сек^2$.

Введя для сопротивления течению коэффициент сопротивления ξ , мы можем выразить сопротивление течению

$$\xi \frac{v^2}{2g}.$$

и окончательно написать

$$H \cdot \frac{\alpha \Delta t}{1 + \frac{\alpha \Delta t}{2}} \cdot \frac{\gamma}{2} = \xi \cdot \frac{v^2}{2g} \gamma.$$

В правой части уравнения скоростной напор умножен на удельный вес для того, чтобы сопротивление течению было выражено в kg/m^2 , вместо метров воздушного столба.

Таким образом, мы имеем

$$V = Q \cdot \gamma \Delta t \cdot 10^3 \cdot W,$$

или

$$V = F \cdot v \cdot \gamma \Delta t \cdot 10^3 \cdot W,$$

где F — поперечное сечение выходного и входного канала в m^2 .

Задаваясь значениями

$$\gamma = 1,25 \text{ } kg/m^3$$

$$\alpha = \frac{1}{273} \text{ } ^\circ C^{-1}$$

$$g = 9,81 \text{ } m/сек.^2$$

мы получим окончательное уравнение

$$F = 4,25 \quad V \quad 10^{-3} \sqrt{\frac{\xi}{H \Delta t^3}} \quad (42)$$

Весь расчет весьма приближителен. В нем исходят из условия равенства скоростей воздуха в приводящем и отводящем каналах. В самой камере воздух течет, конечно, значительно медленнее.

Однако и при изменяющейся скорости воздушного потока, сопротивление течению легко можно свести к какой-либо одной скорости, например, к скорости в отводящем канале. Необходимо попросту определить во сколько раз скорость в отводящем канале больше скорости вентилирующего потока. Это задается коэффициентом ξ . В этом случае уравнение (42) дает необходимую величину поперечного сечения выходного канала.

Коэффициент ξ можно определить следующим образом. Для того, чтобы воздух вообще мог протекать, в подводящем канале должна расходоваться вся энергия скоростного напора. Коэффициент равен единице, когда поперечные сечения подводящего и отводящего каналов равны между собой, а также и в том случае, если в основании расчета положено поперечное сечение выходного канала.

В случае, если скорость притекания в k раз меньше скорости утекания, то будет составлять

Каждое колено в каналах расходует энергию скоростного напора, приблизительно, в $1\frac{1}{2}$ раза больше. Для сопротивления же решеток, устанавливаемых для защиты каналов от проникновения посторонних тел, берем множитель единицу. При этом предполагается, что с обеих сторон колена или решетки существует одна и та же скорость.

Из подводящего канала воздух приходит в камеру, где скорость сильно уменьшается. Таким образом в отводящем канале должна снова возникнуть полная прежняя скорость.

Предполагая, что в подводящем и отводящем каналах окажется по одной решетке и по одному колену и положив в основание расчета поперечное сечение выходного канала, мы получим

$$\xi = \frac{1 + 1,5 + 1}{k^2} + 1 + 1,5 + 1 = 3,5 \left(1 + \frac{1}{k^2}\right),$$

что при одинаковых поперечных сечениях дает

$$\xi = 7.$$

Во всяком случае уравнение (42) дает необходимую величину поперечного сечения выходного канала. Поперечное сечение входного канала будет в k раз больше. Таким образом, мы имеем все необходимые данные для практического расчета. Однако для учения об эксплуатации играет большую роль обзор проблемы вентиляции при различных мощностях.

87. МОЦНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ С ЕСТЕСТВЕННЫМ МАСЛЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ.

При малых и средних мощностях затруднения почти не встречаются. На самом верху и в самом низу камеры предусматриваются обыкновенные отверстия, покрытые решетками. Здесь мы не имеем дело с подводщими и отводящими каналами в собственном смысле этого слова. Правда воздушный поток образует колена как при входе, так и при выходе. Однако сопротивление течению не следует здесь принимать равным 1,5-кратному скоростному напору, так как полная скорость имеется лишь с одной стороны. При одинаковых поперечных сечениях каналов, ξ будет не больше 5.

Для трансформатора мощностью в 100 kVA с потерями при полной нагрузке в 3 000 W, при температурном напряжении в 15° С в вентилирующем потоке, потребуется поперечное сечение канала лишь в

$$F = 4,25 \cdot 3,0 \cdot \sqrt{\frac{5}{5 \cdot 15^3}} = 0,22 \text{ m}^2,$$

в случае, если высота тяги равна $H = 5 \text{ m}$.

Однако с увеличением мощности соотношения значительно ухудшаются. Высота тяги возрастает очень медленно, а потому приходится прибегать к искусственному увеличению этой высоты путем устройства трубы. Сами приводящие и отводящие каналы увеличивают сопротивления течения. При этом тепловые потери быстро возрастают.

Уже при мощности в несколько тысяч kVA получаются громадные сечения каналов. Для грубого подсчета можно допустить, что эти сечения пропорциональны тепловым потерям. Устройство камеры обходится все дороже и дороже. Зачастую остается лишь один выход—искусственная вентиляция.

При установке мощных трансформаторов с естественным охлаждением необходимо учитывать и расходы по вентиляции. Такое требование совершенно понятно и все же, несмотря на это его редко выполняют

НТБ
ДНУЗТ

Нередко эксплуатационный инженер prepares заранее помещение, для которого он затем покупает трансформатор. Было бы совершенной случайностью, если в таких установках не произошло бы осложнений. Эксплуатационный инженер не задумывается над трудностями вентиляции; не задумывается об этом и конструктор, который исходит из того, что с вопросом о помещении для трансформатора все обстоит благополучно. Таким образом в случае порчи трансформатора, между эксплуатационным инженером и конструктором возникнут неизбежные недоразумения.

Дело заключается не просто в том, чтобы после установки трансформатора производить необходимые строительные изменения. Прежде всего эти изменения не всегда возможны. Кроме того они требуют временного прекращения только что начатой подачи тока. Наконец они вызывают издержки, которые не учитываются, но которые изменяют экономическую картину.

В этом центр тяжести вопроса.

При крупных мощностях эксплуатационный инженер решается на введение естественного охлаждения лишь на основании экономического расчета. Он знает, что при искусственном охлаждении трансформатор становится дешевле. Но он учитывает и то, что доставка воды для искусственного охлаждения также связана с расходами. Кроме того приходится платить и дежурному, что не требуется при естественном охлаждении. При мощностях, находящихся на границе между естественным и искусственным охлаждением, особенно нужен правильный расчет, в противном случае совершенно неожиданно оказываются необходимыми строительные расходы.

В таких случаях обычно виноват эксплуатационный инженер. У него имеются все данные для того, чтобы рассчитать вентиляцию. От него лишь требуется знание этой существенной проблемы охлаждения.

Еще до сего времени наблюдается неудовлетворительное обращение с трансформаторами, охлаждение которых расположено на границе между естественным и искусственным. В Европе долгое время считали мощность, приблизительно, в 2 000 kVA предельной мощностью для естественного охлаждения и большие мощности выполнялись почти исключительно с водяным охлаждением. Действительно, при больших мощностях волнистые кожухи становятся весьма громоздкими, что вызывает потребность в уменьшении нагрузок в меди и железе.

Однако вопрос решается не кожухом. В Америке строятся трансформаторы с самоохлаждением до 10 000 kVA. Трубчатые кожухи и кожухи с радиаторами в значительной мере разрешают трудности связанные с отведением тепла. Главная трудность связана с вопросом о вентиляции.

Для открытых станций вопрос о вентиляции вообще отпадает. В Европе они, правда, еще относительно редки. Они создают неверное представление о трудностях проблемы охлаждения. Самоохлаждение в открытой подстанции совершенно отличается от самоохлаждения в каменной будке.

Вопрос о вентиляции чрезвычайно прост и ясен. При очень больших мощностях мы вынуждены, в конце-концов, прибегнуть к водяному охлаждению. В остальных случаях берут перевес преимущества естественного охлаждения, заключающиеся в полной надежности и нетребовательности. От этих преимуществ трудно отказаться особенно если учесть, что при естественном охлаждении сокращаются эксплуатационные потери трансформатора.

88. МОЦНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ С ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ.

При переходе с воздушного охлаждения на масляное, отведение тепла с поверхности обмоток значительно улучшается. В дальнейшем трудности проблемы охлаждения сводятся к отведению тепла с поверхности кожуха. Сама поверхность трансформатора расходует всего лишь несколько градусов Цельсия.

Закон роста, из которого вытекает увеличение «плотности теплового потока» пропорционально корню четвертой степени из мощности, продолжает сказываться и в дальнейшем. По мере возрастания мощности возникает все больше и больше трудностей. Наконец при больших мощностях, как отведение тепла масляным потоком, так и отведение тепла наружным воздушным потоком, становятся недостаточными.

Мы не знаем другой жидкости, отличающейся такими же хорошими охлаждающими и в то же время изолирующими свойствами, как масло. Можно было бы применять воздух или другие газы под большим давлением. Возможность практического применения этой идеи пока еще мала.

Существует все же один способ отведения всего тепла от наружных стенок кожуха. Масло можно охлаждать водой, при чем следует строго следить за тем, чтобы вода не попадала в масло. Как известно, самые незначительные количества воды приводят масло в совершенную негодность, чрезвычайно быстро уменьшая его диэлектрическую прочность. Охлаждение водой выполняется двояко. В одном случае вода пропускается через трубчатые змеевики, проходящие через нагретое масло трансформатора. В другом случае вода помещается в особых каменных каналах. Через эти каналы проходят из трансформатора трубы с нагретым маслом. Охладившись оно возвращается в трансформатор. В обоих случаях используется значительная теплоемкость и теплопроводность воды, короче говоря, ее способность отведения тепла.

Здесь обнаруживается одно большое преимущество водяного охлаждения: наружная стена кожуха больше не должна охлаждать, воздушный поток оказывается излишним и проблема вентиляции сама по себе отпадает. Трансформатор с водяным охлаждением, таким образом, займет очень мало места.

Водяное охлаждение дает и еще преимущества. Усиленное охлаждение масла вызывает и усиление внутреннего масляного потока у нагретой поверхности трансформатора. При внутреннем водяном охлаждении, под действием насоса непосредственно передвигается вода, однако при этом попутно движется и отводящий тепло масляный поток. Но улучшить отведение тепла маслом можно лишь увеличением скорости движения масла, так как отведение тепла возрастает пропорционально квадратному корню из скорости.

Особенно энергично поэтому действует внешнее водяное охлаждение, при котором трубы с текущим по ним маслом расположены в водяных каналах. Здесь под действием насоса непосредственно передвигается масло. Однако это передвижение масла неизбежно обуславливает собой и соответствующее увеличение скорости масла в самом кожухе.

Водяное охлаждение является средством настолько сильным, что мощные трансформаторы (по крайней мере в настоящее время) не испытывают недостатка в охлаждении. Они в эксплуатации почти совершенно холодны. Они переносят значительные длительные перегрузки, часто до 100%. Причины, по которым возможность таких длительных перегрузок не используется, заключаются в больших эксплуатационных потерях, сопровождающих подобные перегрузки.

НТБ
ДНУЗТ

Разумеется, водяное охлаждение имеет также и то преимущество, что позволяет конструктору сильно увеличить нагрузки в меди и железе, что при естественном охлаждении невозможно.

Плотность тока в меди может достигнуть 5 A/mm^2 , а индукция в железе — $15\,000 \frac{\text{инд. линий}}{\text{см}^2}$.

Мощный трансформатор с водяным охлаждением значительно дешевле такого же трансформатора без водяного охлаждения. Правда, для него требуется специальный водяной или масляный насос, однако, кожух его значительно дешевле. За водяное охлаждение говорит и то, что при нем отпадают трудности проблемы вентиляции.

С другой стороны водяное охлаждение имеет и свои недостатки.

Прежде всего должен иметься налицо водяной источник. Кроме того, очень часто водяное охлаждение останавливается из-за недостатка воды. Значительные нагрузки в меди и железе вызывают большие потери энергии. Наконец, трансформатор с водяным охлаждением требует около себя постоянные дежурства, так как необходимо следить за работой насоса.

Преимущество естественного охлаждения, заключающееся в безусловной его надежности, у искусственного охлаждения заменяется другим преимуществом, а именно: возможностью регулировать охлаждение. Работу насоса с охлаждающей установкой можно сделать зависимой от нагрузки. Насос будет при этом перекачивать масло или воду с соответствующей скоростью.

В больших установках, при параллельной работе многих мощных трансформаторов, один из них может почему-либо выбыть из строя. В этом случае, при наличии водяного охлаждения, нагрузка этого трансформатора легко может быть передана остальным. Самоохлаждающиеся трансформаторы имеют свою строго определенную способность к перегрузке. Вопрос об эксплуатационном резерве решается при водяном охлаждении значительно проще и дешевле, чем при естественном охлаждении.

Насос является настолько существенной частью водяного охлаждения, что было бы эксплуатационной ошибкой чересчур экономить на нем. Можно, конечно, приводить в движение охлаждение многих трансформаторов одним насосом, Однако слишком далеко заходить в этом направлении не рекомендуется. Насос может почему-либо испортиться. Без насоса этот колосс беспомощен. Поэтому при водяном охлаждении необходим резерв для насоса, а не для самого трансформатора.

Действительно, тепло в конечном счете отводится именно насосом. Он заменяет (по крайней мере при внутреннем охлаждении) вентиляционное устройство трансформатора при естественном охлаждении. Искусственная вентиляция также дает возможность регулировки охлаждения, однако, значительно более слабую. Решаясь на искусственное охлаждение, следует остановить свой выбор на наиболее действительном способе. Полумеры в таких случаях дороги и плохи.

89. ВНУТРЕННЕЕ И НАРУЖНОЕ ВОДЯНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ.

Эксплуатационный инженер должен точно знать разницу между внутренним и наружным водяным охлаждением, для того, чтобы в случае возникшей надобности суметь сделать надлежащий выбор. Необходимо поэтому сопоставить преимущества и недостатки этих двух способов охлаждения.

При внутреннем охлаждении змеевики, по которым течет вода, можно погрузить непосредственно в нагретое масло, накопившееся в верхней части трансформатора. Это несомненно большое преимущество. Здесь используется максимальное температурное напряжение между маслом и водой.

И труба с маслом, помещаемая при наружном охлаждении в водяной канал, может отводить сверху горячее масло, а снизу возвращать в кожух совершенно остывшее масло. Однако эта труба отводит масло не таким широким фронтом и подает в кожух не такой широкий поток масла, и охлаждение сразу охватывает не такие большие поверхности, как в случае внутреннего водяного охлаждения.

В пользу внутреннего охлаждения говорит и тот факт, что отведение тепла водой происходит гораздо быстрее, чем отведение его маслом. Однако, несомненно, поверхность змеевика при наружном охлаждении легче увеличить (напр., насадкой охлаждающих ребер), чем при внутреннем охлаждении. Поверхность змеевика с маслом выполняется с самого начала большей. Поэтому такой змеевик должен быть предоставлен для масла, а внутренний — для воды.

В пользу внутреннего охлаждения говорит, кроме того, и меньший объем устройства. Для трубы с маслом приходится строить специальный водяной канал. Правда, водяная труба, монтированная в кожухе, увеличивает вместимость кожуха, а тем самым и потребность в масле.

Все же очень важное обстоятельство говорит в пользу наружного охлаждения. Охлаждающий масляный поток находится под некоторым давлением, создаваемым насосом. Все время будет наблюдаться избыточное давление на стенки трубы, направленное наружу. Под действием этого давления, при наличии неплотностей в трубе, некоторое количество масла будет переходить из трубы в водяную ванну, что, конечно, неопасно. Проникновение воды в масло здесь было бы невозможно.

Недопущение воды в масляную ванну является большим преимуществом наружного охлаждения. Однако на деле это преимущество имеет мало значения, так как автогенная сварка дает возможность выполнения совершенно плотных соединений охлаждающих труб. Несмотря на это, безопасность наружного охлаждения играет, конечно, большую роль.

Следующий весьма существенный недостаток внутреннего охлаждения это — разедание водяных труб. Опасность от водяных отложений на внутренних стенках труб очень велика, так как эти отложения сильно препятствуют проникновению тепла через стенки труб. Трубы очень трудно поддаются чистке.

Таким образом, если внутри труб будет масло, а снаружи вода, уход за таким устройством будет значительно легче, а повреждения в нем скорее обнаруживаться.

Вышеописанное преимущество необходимо полностью использовать. Змеевики с маслом должны быть так расположены в водяном канале, чтобы они были всегда доступны. Расходы, связанные с таким устройством, безусловно себя оправдают.

Безопасность в эксплуатации — вещь настолько важная, что наружное охлаждение, повидимому, вытеснит внутреннее. К началу второго десятилетия этого столетия начали вводить мощный трансформатор с внутренним водяным охлаждением. Наружное охлаждение применялось и раньше, однако, лишь с развитием конструкций трансформаторов с большим разделением обмоток, водяным охлаждением стали пользоваться успешно. С этого момента в трансформаторостроение и начинает проникать наружное охлаждение.

ИТЬ
ДНУЗТ

Наружное охлаждение искусственно, вообще говоря, в двух смыслах. Во-первых, искусственно передвигается масляный поток в охлаждающих змеевиках, во-вторых, и водяной поток в охлаждающем канале движется не под действием рабочей теплоты. Существует множество трансформаторов с наружным охлаждением, имеющих, кроме того, и собственные водяные насосы для охлаждения масляных змеевиков. В таких случаях охлаждающий аппарат может быть построен весьма экономным.

В таких конструкциях эксплуатационный инженер может решать вопрос с двух сторон: со стороны водяного насоса и со стороны масляного насоса. Водяной насос обеспечивает лишь удаление тепла из трансформатора, масляный же насос способствует непосредственному отведению тепла от нагретых поверхностей трансформатора.

Эта возможность улучшения непосредственного отведения тепла от поверхности обмоток имеет крупное значение в эксплуатации. Однако эта возможность не всегда имеется. Вызванная масляным насосом скорость масла в кожухе относится к скорости масла в змеевике, как поперечное сечение змеевика к свободному горизонтальному поперечному сечению кожуха. При малых сечениях охлаждающих змеевиков приведенное отношение может стать настолько мало, что поток отводящий тепло с поверхности трансформатора остается при своей естественной скорости.

Именно при искусственном водяном охлаждении, когда имеется и водяной насос наряду с масляным, получаются такие большие расчетные значения для змеевиков, что масляный насос не в состоянии проникнуть в самый кожух. Однако на отношение между поперечными сечениями змеевиков и кожуха обращают слишком мало внимания.

Для того, чтобы тепло под действием данного температурного напряжения переходило от масла к воде, охлаждающий змеевик должен иметь определенную поверхность. Последний не должен иметь большого поперечного сечения, в противном случае масло не будет охлаждаться, что вызовет потребность в удлинении змеевика.

Охлаждающий змеевик лучше всего выполнить из многих, относительно коротких параллельно включенных змеевиков. Суммарное поперечное сечение всех параллельно включенных змеевиков обуславливает тогда скорость движения масла в кожухе. Кроме того, температура масла в змеевике получается гораздо более равномерной.

После всего сказанного мы видим, что многое зависит от правильного расположения охлаждающих змеевиков.

Эксплуатационному инженеру должно быть совершенно ясно, что с искусственным увеличением скорости масла значительно улучшается и отведение тепла. Отведение тепла возрастает, приблизительно, пропорционально квадратному корню из скорости движения масла. Эксплуатационный инженер должен об этих соотношениях подумать уже при покупке трансформатора. Он не согласится теперь приобретать змеевики с большим сечением и с сильным искусственным водяным охлаждением, если это даст экономию только места.

90. НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ОХЛАЖДЕНИЕМ.

Задачей учения об эксплуатации не является изучение всех тонкостей процесса охлаждения, а лишь выяснение обязанностей эксплуатационного инженера при регулировании отведении тепла.

Изучение тонкостей — дело конструктора.

Вентиляция трансформаторной будки и бесперебойная работа водяного охлаждения, и то и другое относится к одной и той же области. Строгое наблюдение совершенно необходимо. Этого сравнительно нетрудно достигнуть.

Невозможно измерять максимальную температуру в меди, нельзя также и постоянно заниматься измерениями сопротивления для определения среднего превышения температуры в меди. Однако возможно и легко доступно измерение температуры нагретого масла, что значительно облегчает наблюдение за охлаждением. Существование трансформатора с масляным охлаждением без термометра, дающего возможность в любой момент отсчитывать температуру масла, совершенно недопустимо, даже и в том случае, если нагрузка трансформатора в любой момент известна. Масло может загрязниться и хуже охлаждать. Вентиляция камеры может вследствие какой-либо причины ухудшиться. Все это может быть обнаружено термометром, помещенным в масле.

При искусственном охлаждении опасностей больше. Охлаждающее устройство может внезапно испортиться. Термометр должен по возможности скорей уловить эту порчу. Поэтому рекомендуется устраивать термометр так, чтобы он при определенной максимальной температуре замыкал сигнальную цепь, или даже выключал автомат.

При искусственно охлаждаемых трансформаторах, эксплуатационный инженер должен, прежде всего, выяснить производительность своей охлаждающей установки. Практические испытания в данном случае значительно полезнее данных конструктора. Трансформатор с искусственным охлаждением — это такой аппарат, который можно хорошо использовать лишь основательно овладев им.

К сожалению во многих предприятиях вопросом охлаждения сильно пренебрегают. Большинство трансформаторов идут в эксплуатацию без предварительного испытания на нагрев. Очень многие трансформаторы работают вначале под малой нагрузкой, а потому остаются холодными. Когда через значительное время нагрузка сильно возрастет, гарантийные сроки оказываются уже истекшими.

Трансформатор следовало бы подвергать основательному испытанию на нагревание. Более того. Если на месте испытания он оказался в порядке, то его следует испытать еще и в камере для того, чтобы иметь суждение о вентиляции.

Подобные испытания выполняются очень редко. Поэтому неизбежны постоянные недоразумения между конструктором и эксплуатационным инженером. К этому же следует учесть и то обстоятельство, что очень часто вместо трансформатора, ставшего недостаточным по мощности, устанавливается более мощный.

До этого вентиляция могла быть удовлетворительной, после установки нового трансформатора вентиляция может оказаться недостаточной.

С вопросом о нагревании обстоит неблагоприятно также и потому, что эксплуатационный инженер недостаточно задумывается о чувствительности хлопчатой бумаги, служащей оплеткой для проводов обмотки трансформатора. Он не принимает всерьез пункта норм гласящего, что при длительной температуре большей 110° С хлопчатая бумага быстро портится. Он этому не верит, так как не видит этого. Распадение происходит невидимо. Наконец появляется пробивание от витка к витку — единственный вид аварии, против которой еще не найдено способа защиты.

Совершенно справедливым является то обстоятельство, что защита от чрезмерных токов именно в этом случае обрекает на гибель всю

обмотку. Каждое внутреннее короткое замыкание появляется почти всегда в результате ошибки эксплуатационного инженера. Фабричные ошибки редки и приемочные испытания их вскрывают. Остальное осуществляется защитой от чрезмерных токов и от перенапряжения. По мере усовершенствования способов защиты, эксплуатационному инженеру все труднее найти оправдание своим ошибкам. И недостаточность самой защиты трансформатора является, конечно, также его ошибкой.

И нормы безопасности отчасти недостаточно строги в вопросах о нагревании. Не потому, собственно, что в них допускаются в эксплуатации слишком высокие превышения температуры. Также и не потому, что они ограничивают не максимальное, а лишь среднее превышение температуры меди. Тем самым, что под наблюдением находится и превышение температуры масла, безопасность, требующаяся в эксплуатации, обеспечена в достаточной мере. Дело в том, что нормы слишком мало внимания уделяют вентиляции.

Нормы безопасности ограничивают температуру воздуха в рабочем помещении значением в 35°C , при чем термометр должен находиться на расстоянии 1 и 2 м. Воздух около термометра должен быть неподвижным.

В каждой трансформаторной будке и на указанных расстояниях наблюдаются значительные движения воздуха. Иначе немислима вентиляция. Правда, эти скорости движения воздуха незначительны. Они достигают не больше одного или двух дециметров в секунду. Однако движение все же имеется.

Ясно, что нормы предусматривают испытание на нагревание лишь на месте изготовления трансформатора. Именно поэтому в нормах плохо учитываются действительные нужды эксплуатации. Но будет гораздо правильнее, если предписать испытание на нагревание в самой камере перед началом эксплуатации трансформатора.

Конструкторы могли бы облегчить себе задачу, требуя сами подобных испытаний. Это избавило бы их от многих неприятностей. Им пришлось бы в этих случаях самим заботиться о трансформаторных будках. Этот трудный вопрос должен быть рано или поздно решен.

91. ПРЕРЫВИСТАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ.

Проблема охлаждения имеет еще много тонкостей, которые не рассматриваются в предыдущих параграфах, где предполагалась исключительно полная нагрузка трансформатора. Разумеется, прежде всего принято разбирать самые трудные случаи. Однако для учения об эксплуатации и другие случаи имеют большое значение.

Дело как будто обстоит так, что с рассмотрением самых трудных случаев исчерпываются и все остальные случаи. Если охлаждающее устройство хорошо работает при полной длительной нагрузке, оно как будто должно удовлетворительно охлаждать и при более слабых нагрузках.

Это несомненно верно. Но исследования главы II уже показали, что существуют и другие случаи важные в эксплуатации, которые должны быть рассмотрены. Сюда относятся все прерывистые нагрузки, а в частности и уже рассмотренная осветительная нагрузка.

Часто бывает так, что трансформатор в отдельные промежутки времени то нагружается, то разгружается. За время нагрузки имеется возможность отвести от него тепло. Работая с такими перерывами, он все время охлаждается, что несомненно способствует его работе с большей мощностью.

НТБ
ДНУЗТ

Теория прерывистого режима стара. Она занималась исследованием специфического характера нагревания. Однако она исходит из того положения, что трансформатор является однородным телом, что безусловно не правильно. Наоборот. Исследование осветительного дела в главе II показало, что обмотка и масляная ванна следуют совершенно отличным друг от друга законам изменения температуры по времени.

Небесполезно исследовать точнее прерывистую работу трансформаторов и учесть ту большую разницу, которая наблюдается при нагревании обмоток и масляной ванны. Таким путем можно получить очень существенные результаты. Именно для эксплуатационного инженера важно знать, что он может получить от трансформатора.

Искусственно охлаждаемые трансформаторы образуют группу, о которой уже достаточно говорилось. Если применение искусственной вентиляции неизбежно, то оно должно поддаваться регулированию. Этим самым проблема уже решена.

Трансформатор с естественным масляным охлаждением работает при переменной нагрузке следующим образом. Температура масляной ванны колеблется очень мало; она медленно следует за нагрузкой. Значительно скорее изменяется температурное напряжение между нагретым маслом и нагретой медью.

Приведем некоторые полезные числовые данные. Наружная поверхность кожуха расходует на воздушный охлаждающий поток и излучение температурное напряжение в 45 до 50° С. Охлаждающееся масло расходует у внутренней стенки кожуха лишь несколько градусов Цельсия. Нагретое же масло в верхней части трансформатора имеет при полной нагрузке превышение температуры над воздухом приблизительно в 60° С.

В действительности это не является максимальным превышением температуры масла. У горячей поверхности трансформатора температура масла по мере отдаления от поверхности падает. Отведение тепла маслом обуславливает поверхностное температурное напряжение от 10 до 15° С. Охлаждающий масляный поток нагревается посередине лишь наполовину, т. е. на 5 до 7,5° С; масло же непосредственно у поверхности трансформатора нагрето на 5 до 7,5° С больше, чем наверху под крышкой трансформатора, где выравнивание температур уже достигнуто.

Если, таким образом, поверхность обмотки нагрета на 5 до 7,5° С больше, чем масло в верхней части трансформатора, то в распоряжении внутреннего проводящего потока оказывается лишь несколько градусов Цельсия, а именно от 5 до 2,5° С. В действительности можно все же допустить двойное температурное напряжение, так как не максимальное, а среднее превышение температуры в меди не должно превосходить 70° С.

Для проблемы прерывистого режима возникает трудность даже и в том случае, если температуру масла считать неизменяющейся. Внутреннее температурное напряжение в обмотке изменяется пропорционально квадрату мощности. Температурное напряжение у поверхности обмотки приблизительно пропорционально мощности. Отведение тепла в масле, как уже упомянуто, сильно зависит от вязкости масла. Постоянная времени обмотки настолько мала, что накоплением тепла в обмотке можно пренебречь.

Считая, для удобства подсчета, температуру масла неизменяющейся и принимая нормальную мощность за единицу, мы получим следующее выражение

$$\Delta\tau_{mc} + \Delta\tau_o \cdot x + \Delta\tau_n \cdot x^2 \leq 70,$$

где:

$\Delta\tau_{mc}$ — превышение температуры масла ($^{\circ}\text{C}$),

$\Delta\tau_o$ — половинное температурное напряжение при отведении тепла от поверхности обмотки ($^{\circ}\text{C}$),

$\Delta\tau_{\text{в}}$ — половинное внутреннее увеличение температуры в обмотке ($^{\circ}\text{C}$).

Кроме того, для дальнейших рассуждений мы примем:

t_1 — секунд длительной x -кратной нормальной нагрузки,

t_2 — секунд длительной разгрузки.

Вышеприведенное выражение действительно, конечно, лишь в том случае, если температура масла за время разгрузки имеет возможность возвращаться к своей первоначальной величине.

Отсюда ясно, что при прерывистых нагрузках придется допустить меньшие средние превышения температуры масла. Если принять

$$\Delta\tau_{mc} = 50^{\circ}\text{C}$$

и

$$\Delta\tau_o = \Delta\tau_{\text{в}} = 6^{\circ}\text{C},$$

то мы получим

$$x^2 + x = 5,$$

т. е.

$$x = 1,8.$$

Для отведения тепла масло имеет время $t_1 + t_2$ секунд, температурное же напряжение зато понижено с 60 на 50°C . Таким образом, мы имеем

$$\frac{t_1 x^2}{t_1 + t_2} = \frac{50}{60}$$

При этом не учтено то обстоятельство, что тепло в железе остается неизменным и, кроме того, что отведение тепла принято пропорциональным температуре масла. Было бы приемлемо отношение

$$\frac{t_2}{t_1} = 2,88.$$

Пример показывает, что всегда возможны значительные прерывистые перегрузки. Расчет относительно прост и, конечно, весьма приблизителен. Он нужен эксплуатационному инженеру лишь для уяснения вопроса. Точный же расчет должен быть проведен конструктором.



VIII. Разные эксплуатационные проблемы.

92. ПРОБЛЕМА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

Существует целый ряд эксплуатационных вопросов различной степени важности, имеющих значение и для конструктора. Эти вопросы, хотя и не укладываются целиком в рамках учения об эксплуатации все же занимают в нем известное место. Как они ни разнообразны, их все же следует объединить в одну группу. Большинство из них слишком малы для того, чтобы быть рассмотренными отдельно. В дальнейшем изложении они будут следовать один за другим без какого-либо строго определенного порядка.

Самым существенным из этих вопросов является вопрос о параллельной работе трансформаторов. Этот вопрос давно решен, но все же имеет некоторые стороны, вызывающие постоянные разногласия между конструктором и эксплуатационным инженером, а потому полезно этим вопросом заняться.

Параллельное включение двух трансформаторов вызывает лишь одну трудность, которую следует изучить. Обе параллельно включенные обмотки, вместе с проводами или шинами их соединяющими, образуют как с первичной так и с вторичной стороны замкнутую цепь (фиг. 120). В такой замкнутой цепи не должен проходить ток, так как внутренний ток не производит никакой работы в сети, а лишь бесполезно нагревает обмотку.

В этом вся суть вопроса. Решение его заключается в том, что сумма напряжений в такой замкнутой цепи должна равняться нулю. Однако это не так просто, как кажется. Если речь шла бы лишь о равновесии напряжений, индуктированных главным магнитным потоком в обмотках, то проблема параллельного включения была бы проста. Она проста и в случае холостого хода. Коэффициенты трансформации легко выполнить одинаковыми. Но при нагрузке появляются падения напряжения. Разность между падениями напряжения составляет, в свою очередь, напряжение, могущее действовать в замкнутой цепи обмоток.

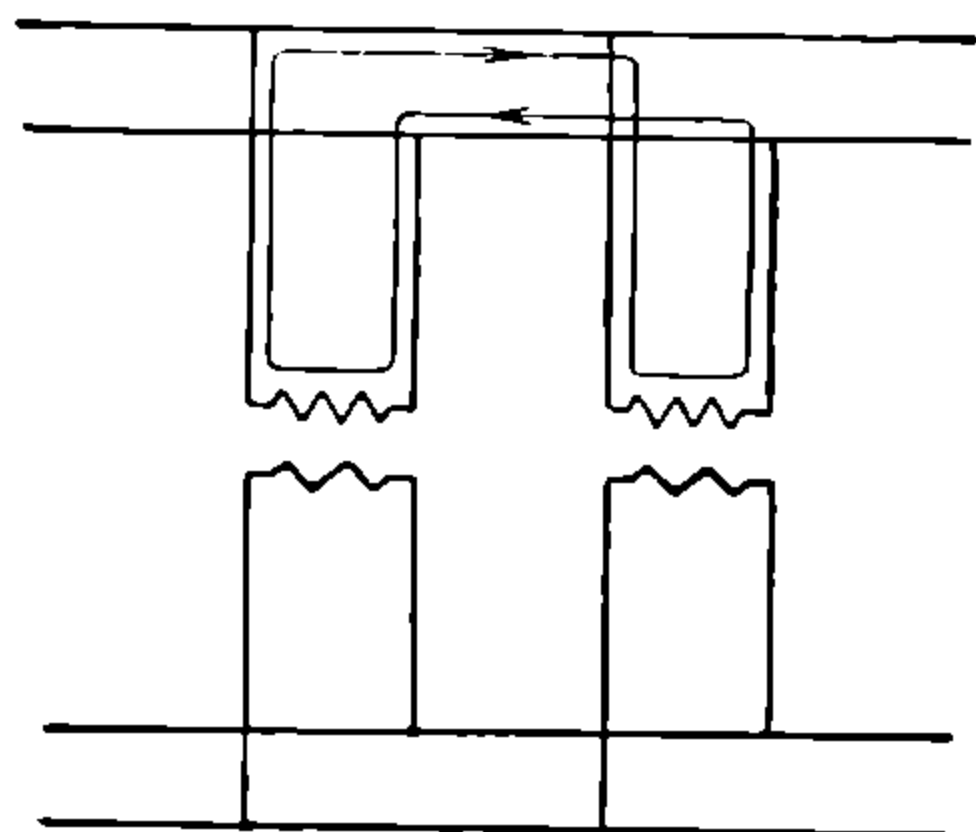
Проблему можно заранее упростить, если при исследовании не рассматривать трудностей, которых можно избежать. Если установлено, что равенство напряжений, индуктированных главным магнитным потоком в обмотках, может быть установлено, то в дальнейшем мы можем этих напряжений не учитывать. Остается лишь вопрос о возможности равенства падений напряжения в обеих параллельно включенных обмотках.

Для эксплуатационного инженера вопрос все же не так прост. Ему известны лишь данные из таблички трансформатора и по этим данным он должен заказать новый трансформатор для параллельной работы. Необходимо обратить его внимание на одну опасность, скрывающуюся в табличке.

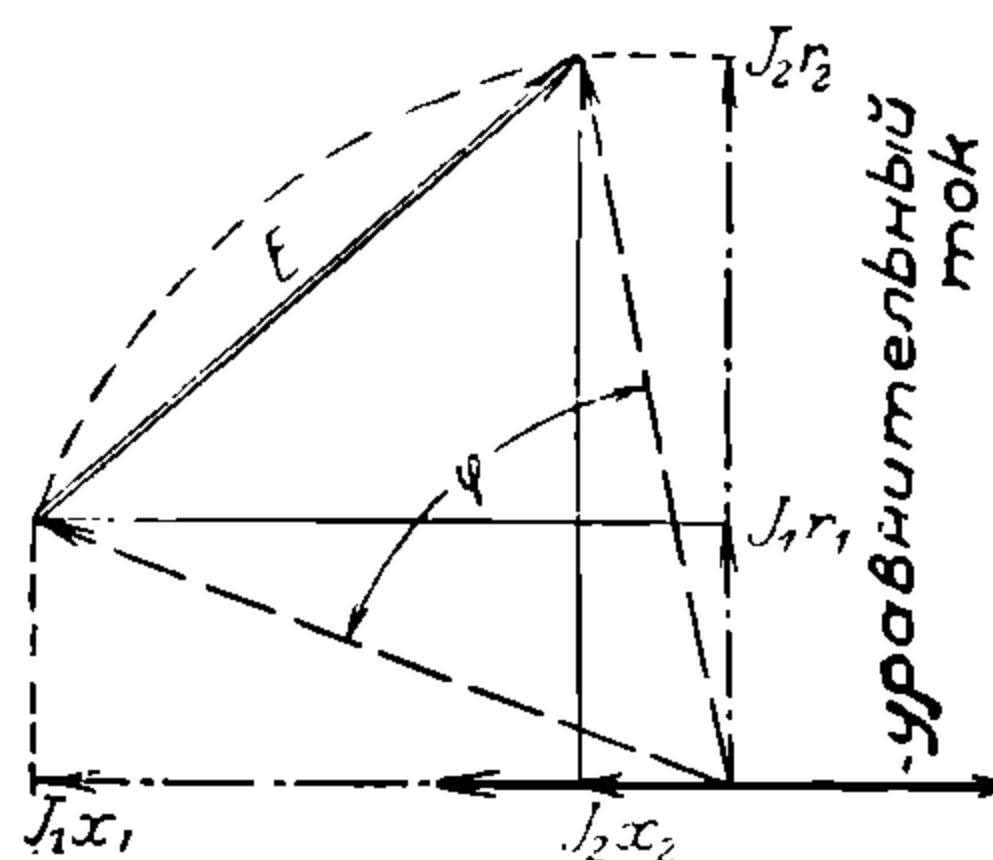
НТБ
ДНУЗТ

Согласно новейших норм безопасности *V.D.E.*, на табличках указывается номинальное вторичное напряжение, отношение которого к номинальному первичному напряжению в точности равно отношению числа витков обмоток. Иначе говоря, на табличке указывается вторичное напряжение при холостом ходе. На более старых трансформаторах указывается часто вторичное напряжение при полной нагрузке с обычным углом сдвига фаз, как-то $\cos \varphi = 0,7$ или $0,8$. Таким образом, возможны ошибочные заказы. При известной внимательности эти ошибки можно избежать.

Исследование проблемы параллельной работы можно и дальше упростить. Нет необходимости рассматривать замкнутые цепи обеих параллельно включенных обмоток и с первичной и с вторичной стороны. Все падения напряжения можно мыслить и лишь с вторичной стороны, так как первичные падения напряжений на деле также трансформируются. После всего сказанного требование безупречной параллельной работы заключает в себе следовательно положение: равенство суммарных падений напряжения обоих параллельно работающих трансформаторов при номинальной мощности каждого из них.



Фиг. 120.



Фиг. 121.

Может показаться, что подобному требованию удовлетворяет конструктивное условие равенства напряжений короткого замыкания. Как известно, под напряжением короткого замыкания мы подразумеваем напряжение необходимое только для прохождения тока через обмотку трансформатора. Оно составляет несколько процентов от рабочего напряжения и в таком процентном выражении и указывается на табличке трансформатора.

Однако условия равенства напряжений короткого замыкания все же недостаточно для безупречной параллельной работы. Кроме величины этого напряжения следует учесть также и его сдвиг фаз. Удовлетворительная параллельная работа предполагает в обоих трансформаторах также и токи одинаковые по фазе. Таким образом, если токи хотя и равны, но вызывают в обмотках суммарные падения напряжения сдвинутые между собой по фазе, то в замкнутой цепи возникнет напряжение, как указано на фиг. 121 (соответственно обозначениям параграфа 94).

После этого становится понятным требование старой теории параллельной работы, заключающее в себе не только равенство напряжений короткого замыкания, но и омических падений напряжения, что, конечно, предполагает и равенство индуктивных падений напряжения. В этом месте должно сказать свое слово учение об эксплуатации.

93. ДОПУСТИМАЯ И ИЗЛИШНЯЯ ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА.

От параллельной работы трансформаторов одинаковой мощности легко перейти к более общему рассмотрению проблемы параллельного включения, при котором мощность каждого аппарата не играет никакой роли. Для замкнутой цепи обмотки критерием является не величина токов нагрузки, а лишь падения напряжения в ней. Все будет в порядке, если падения напряжения, выраженные в процентах от рабочего напряжения, будут равны между собою (конечно при данном распределении нагрузок, соответствующем обоим номинальным мощностям).

С этой обобщенной точки зрения, старая теория параллельного включения, приведенная в предыдущем параграфе, совершенно неприемлема для конструктора. Он не может строить мощные и маломощные трансформаторы с одним и тем же удельным омическим падением напряжения. Из параграфа 6 уже известно, что в пределах одного типового ряда потери в меди, отнесенные к единице мощности, уменьшаются пропорционально корню четвертой степени из мощности. Этот факт должен быть ясен эксплуатационному инженеру, ссылающемуся на старые требования теории.

С другой стороны, конструктор не может требовать от эксплуатационного инженера параллельной работы трансформаторов лишь одинаковой мощности. Собственно говоря конструктор должен был бы предъявить еще более жесткие требования. Трансформаторы даже одинаковой мощности, но разного изготовления имеют обычно несколько отличающиеся между собой потери в меди.

Однако это еще не все. Трансформаторы одинаковой мощности и одинакового происхождения, правда, могут быть выполненными с одинаковыми омическими падениями напряжения. Осуществление этого возьмет на себя любой конструктор. Но будут ли трансформаторы при этом иметь и одинаковые индуктивные падения напряжения? Ни один конструктор не сможет утвердительно ответить на такой вопрос. Ему придется признать, что заранее определить напряжение короткого замыкания с точностью большей чем 15% — невозможно.

При данном положении вещей учение об эксплуатации должно определенно заявить, что в полной мере безупречной параллельной работы вообще не бывает и что эксплуатационный инженер должен, наконец, с этим фактом примириться. Нет смысла упрекать конструктора, если при параллельной работе обнаруживаются неточные распределения нагрузок.

В нормах безопасности *V.D.E.*, это действительное положение вещей предусмотрено. Нормы считают параллельную работу удовлетворительной в том случае, если напряжение короткого замыкания обоих параллельно работающих трансформаторов отклоняются от своего среднего значения не больше, чем на $\pm 10\%$. Этим самым они допускают разницу в 20%.

Нормы безопасности советуют не соединять для параллельной работы трансформаторов, у которых отношение номинальных мощностей больше чем 3:1. Этим самым нормы указывают эксплуатационному инженеру на то обстоятельство, что трансформаторы с разными мощностями невозможно выполнять с одинаковыми удельными омическими падениями напряжения.

Если все же неудовлетворительную параллельную работу придется по каким-либо соображениям допустить, то при этом учение об эксплуатации должно разъяснить эксплуатационному инженеру с какими отклонениями от идеальной работы он будет иметь дело.

НТБ
ДНУЗТ

Очень часто вводится совершенно излишняя параллельная работа. Иногда параллельным включением хотят обойти вопрос об эксплуатационном резерве. Разбивают необходимую мощность на две или три частичные мощности. Такие два или три трансформатора работают параллельно, не имея резерва, и дают, таким образом, возможность, при повреждении одного трансформатора, продолжать частичную подачу тока.

Подобная параллельная работа мало целесообразна. Иначе обстоит дело при колебании мощности. Здесь при одной нагрузке оказывается достаточным один трансформатор, а при возросшей нагрузке присоединяется второй. В данном случае речь идет о разделении мощности с целью уменьшения потерь холостого хода.

В обоих описанных случаях вопрос может быть решен экономическим подсчетом. Этот подсчет будет правильным лишь в том случае, если учесть и те неромальности, которые следует ожидать при параллельной работе.

Два отдельных трансформатора стоят дороже одного с суммарной мощностью. Из параграфа 3 известно, что в пределах одного типового ряда, цена отнесенная к единице мощности падает, приблизительно, пропорционально корню четвертой степени из мощности. Кроме того, следует учесть и большие потери. Они подчиняются тому же закону роста, что и покупная цена. Наконец необходимо принять во внимание и потребность в большем помещении и двойной аппаратуре.

Целый ряд существующих и предполагаемых установок с параллельно работающими трансформаторами, при более добросовестном расчете, вероятно, не были бы выполнены. Этим самым конструктор, а также и эксплуатационный инженер были бы избавлены от многих недоразумений.

Несомненно, многие трансформаторные станции устроены совершенно необдуманно. К сожалению, мало уделяют внимания расчету. Правда, многие станции разрастаются очень медленно. По истечении времени они представляют собою установку с несколькими параллельно включенными трансформаторами.

94. ВБЛИЗИ РАСПОЛОЖЕННЫЕ, ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ.

Трудности проблемы параллельного включения возникают именно вследствие близкого расположения друг к другу параллельно работающих трансформаторов. Эти трудности являются как бы постоянным напоминанием о недостатках установки, о необходимости найти правильное и простое решение вопроса. Параллельно включенные трансформаторы, соединенные друг с другом длинными проводами, получающими питание во многих местах, — подобные трансформаторы работают совершенно удовлетворительно. Они к тому же и неизбежны в эксплуатации.

Что, собственно, является причиной такой значительной разницы? На этот вопрос нетрудно ответить. Проводник, соединяющий между собой трансформаторы, является также частью замкнутой цепи обмоток. Он также обладает известным сопротивлением и может вызвать падение напряжения. Чем длиннее этот проводник, тем сильнее сказывается его влияние и тем легче он выравнивает разницу между напряжениями короткого замыкания в обеих обмотках трансформаторов.

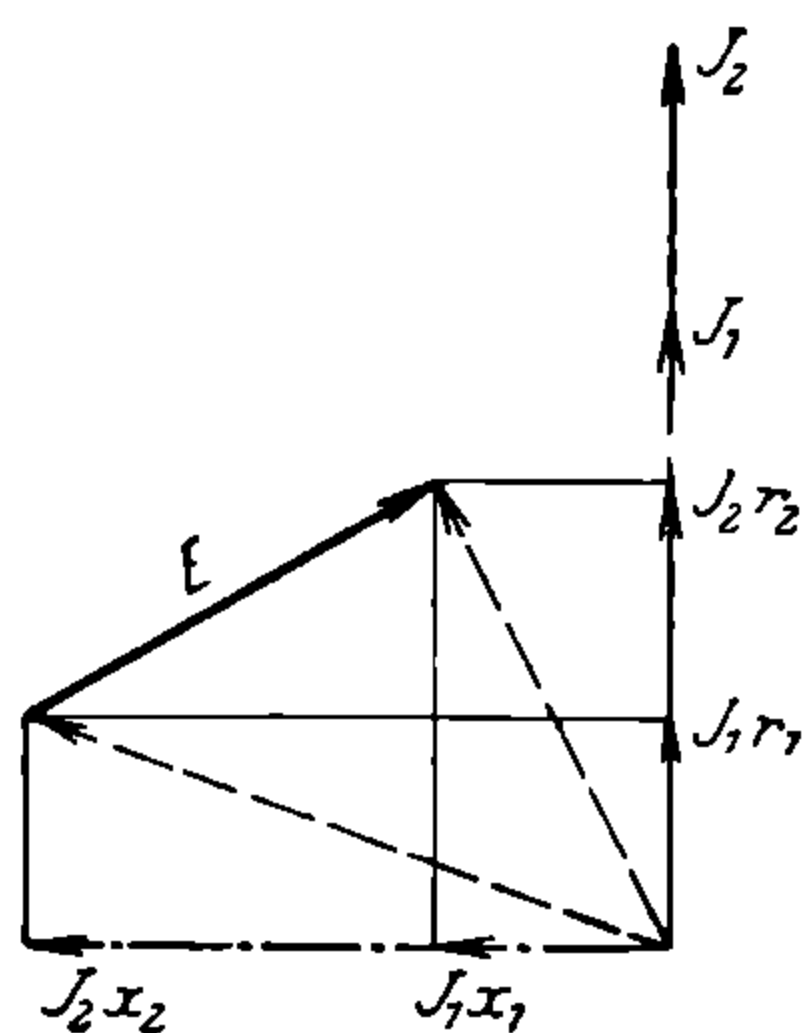
При питании общей сети в точках, значительно удаленных одна от другой, двумя параллельно работающими трансформаторами, послед-

ние распределят между собою лежащую между ними сеть так, что в замкнутой цепи обмоток уравнительный ток будет отсутствовать. Этому условия совершенно достаточно для удовлетворительной параллельной работы.

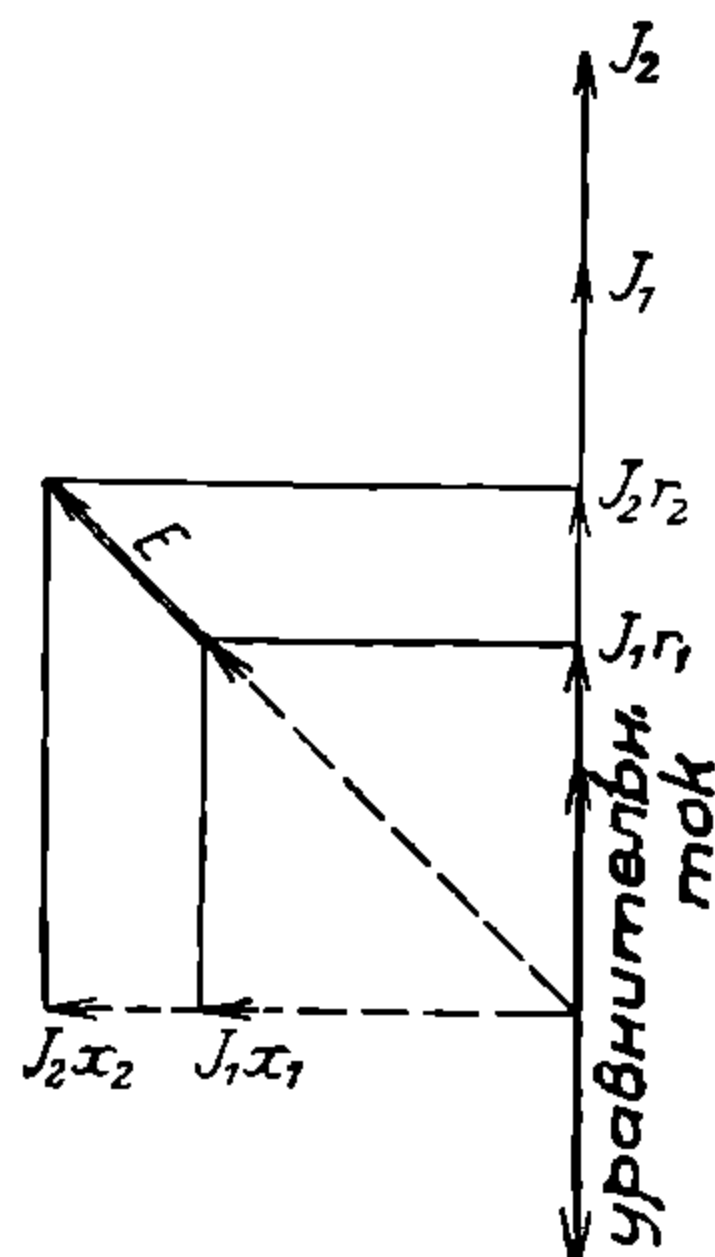
При работе большого числа трансформаторов на общую сеть, условия эксплуатации еще более удовлетворительны. Нагрузка распределяется в этом случае между всеми трансформаторами, при чем «центр тяжести» нагрузки сети постоянно меняется в зависимости от включения или выключения тех или других трансформаторов.

Лишь в том случае, если два трансформатора расположены рядом и между ними отсутствует какая-либо нагрузка, которую можно было бы распределить, лишь в данном случае проблема параллельного включения встает перед нами во весь рост. Ее необходимо изучить по возможности подробнее.

Очень трудно найти общее решение только-что поставленной проблемы параллельного включения, без учета влияния проводов, соединяющих трансформаторы. Все же об этом полезно иметь хотя бы общее представление.



Фиг. 122.



Фиг. 123.

Лучше всего исходить из предположения, что каждый из трансформаторов находится под полной нагрузкой. Следует, конечно, также предположить, что сдвиг фаз у всех трансформаторов одинаков, что всегда наблюдается при удовлетворительной параллельной работе.

В общем случае, при принятом правильном распределении нагрузок, падения напряжения в обмотках не равны между собою. Речь идет о том, чтобы определить напряжение замкнутой цепи обмоток, а вместе с ним и уравнительный ток. Складывая последний с током нагрузки, мы получим результирующий ток при несовершенной параллельной работе.

На фиг. 122 токи I_1 и I_2 , при идеальном распределении нагрузки, совпадают по направлению оси ординат. Омические падения напряжения $I_1 r_1$ и $I_2 r_2$ имеют те же направления. Индуктивные падения напряжения $I_1 x_1$ и $I_2 x_2$ должны быть, очевидно, перпендикулярны омическим. Нетрудно, след., определить напряжение E , действующее в замкнутой цепи обмоток.

Полезно определить и среднее суммарное падение напряжения

$$\frac{I_1 r_1 + I_2 r_2}{2} + \frac{I_1 x_1 + I_2 x_2}{2}.$$

Это падение напряжения, согласно нормам, и является критерием для допустимой разности обоих напряжений короткого замыкания, или, что то же самое, суммарных падений напряжения обоих трансформаторов (фиг. 122).

Уравнительный ток в замкнутой цепи обмоток, конечно, пропорционален напряжению E . Он проходит через суммарное сопротивление

$$\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}.$$

Для определения сдвига фаз уравнительного тока требуется еще одно построение, так как его нельзя получить из векторной диаграммы фиг. 122. В этом и заключается значительная часть трудностей при попытке решить в общем виде проблемы двух рядом расположенных, параллельно работающих трансформаторов.

Для учения об эксплуатации и не требуется решения проблемы в общем виде. Не требуется этого и для учения о конструировании. Как конструктора, так и эксплуатационного инженера интересует лишь самый трудный случай.

Самый трудный случай характеризуется двумя особенностями. В первую очередь, конечно, — максимально возможным напряжением замкнутой цепи обмоток. Кроме того трудным будет и случай равенства сдвига фаз уравнительного тока и одного из двух токов нагрузки. Здесь уравнительный ток будет складываться с токами нагрузки алгебраически, что вызовет большое возрастание суммарного тока в одной обмотке и сильное уменьшение суммарного тока в другой.

Максимальное напряжение в замкнутой цепи обмоток возникнет тогда, когда разность между обоими напряжениями короткого замыкания достигает полного значения, допускаемого нормами. С другой стороны, уравнительный ток совпадает или противоположен по фазе с токами нагрузки при идеальной параллельной работе лишь в том случае, если суммарные падения напряжения в обоих трансформаторах равны по фазе. Действительно, если

$$\frac{r_1}{x_1} = \frac{r_2}{x_2},$$

то

$$\frac{I_1 r_1 + I_2 r_2}{I_1 x_1 + I_2 x_2} = \frac{r_1 + r_2}{x_1 + x_2}.$$

95. ПЕРВЫЙ ПРЕДЕЛЬНЫЙ СЛУЧАЙ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ БЛИЗКО РАСПОЛОЖЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

Трудный случай параллельной работы, предельно допускаемый нормами, при строгом следовании этим нормам, ведет к значительным осложнениям. Максимальное напряжение в замкнутой цепи обмоток мы получим не тогда, когда оба суммарных падения напряжения равны по фазе и отклоняются на 10% от своего среднего значения, а лишь тогда, когда эти падения напряжения противоположны по фазе.

Такой случай, конечно, практически исключается. Суммарные падения напряжения будут почти равны по фазе. Разность фаз будет всегда незначительна. Все же нормы кажутся несколько неудовлетворительно средактированными.

Если принять нормы для параллельной работы в их обычной редакции, то исследование будет значительно затруднено. Наихудший случай не определяется единообразно, а потому его и нельзя разобрать непосредственно.

НТБ
ДНУЗТ

Рассмотрим сначала случай суммарных падений напряжения одинаковых по фазе и, в первую очередь, рассмотрим его последствия. Если после этого рассматривать большую разность фаз между суммарными падениями напряжения (конечно при условии близости этой разности к пределам, существующим в действительности), то мы получим второй предельный случай.

В первом случае напряжение, вызывающее уравнивающий ток, мало, но зато последний совпадает (или противоположен) по фазе с идеальным током нагрузки. Во втором случае уравнивающий ток становится значительно больше, но зато он оказывается сдвинутым по фазе. Однако критерием доброкачественности параллельной работы является окончательная величина суммарного тока. Последняя определяет степень использования обоих параллельно работающих трансформаторов.

Как ни прост с виду первый предельный случай, он все же имеет свои тонкости. При равенстве фаз у обоих суммарных падений напряжения и при отклонении их в обе стороны от своих средних значений на 10%, в замкнутой цепи обмоток возникает напряжение, достигающее 20% среднего значения напряжений короткого замыкания (фиг. 123). Однако, из этого можно заключить, что уравнивающий ток достигнет 10% от тока полной нагрузки лишь для двух трансформаторов одинаковой мощности. Лишь в этом случае ему предстоит пройти через двойное суммарное сопротивление одного трансформатора.

Этот особый случай имеет практическое значение. Небесполезно рассмотреть его подробнее. Он, собственно, дает такое распределение нагрузки, при котором один трансформатор берет на себя 45% суммарной нагрузки, а другой — 55%.

Отсюда непосредственно следует, что в этом особом случае, допустимом нормами безопасности, трансформаторная группа используется не полностью. Нельзя перегружать один трансформатор. Пусть требуется распределить нагрузку в 200 kVA поровну между двумя параллельно работающими трансформаторами. В этом случае не следует брать просто два одинаковых трансформатора по 100 kVA каждый. При подобном распределении один трансформатор брал бы на себя 110, а другой — 90 kVA , что безусловно недопустимо. Эксплуатация будет нормальной лишь при наличии двух трансформаторов по 110 kVA каждый.

Мы видим, что такие трансформаторные пары являются источником больших трудностей для эксплуатационного инженера. К счастью, именно при двух трансформаторах одинаковой мощности особенно велика вероятность, что они будут друг от друга отличаться только своими индуктивными падениями напряжения. Все же рассмотренный случай представляет большой интерес и безусловно будет способствовать уменьшению случаев неудовлетворительных параллельных включений.

Если оба трансформатора не равны между собой, а суммарные падения напряжения равны по фазе и отклоняются от среднего значения на $+10$ или -10% , то картина еще больше осложняется. Правда, напряжение все еще равно пятой части среднего напряжения короткого замыкания. Однако это напряжение приложено к двум различным по величине, последовательно включенным суммарным сопротивлением в замкнутой цепи обмоток.

Пусть ток полной нагрузки одного трансформатора равен I . У второго трансформатора с мощностью в x раз большей ток полной нагрузки будет равен xI . Пренебрегая, простоты ради, разницей между величинами обоих напряжений короткого замыкания, принятых одинаковыми

по фазе,—мы должны считать суммарное сопротивление у малых трансформаторов в x раз большим, чем у больших.

Уравнительный ток в малом трансформаторе будет в

$$\frac{2}{1 + \frac{1}{x}} \text{ раз}$$

больше, чем в случае, если бы рядом с ним находился равный ему трансформатор. В большом же трансформаторе уравнительный ток будет меньше в

$$\frac{2}{1 + x} \text{ раз.}$$

Он составляет при двух трансформаторах равной мощности 10% от тока полной нагрузки, так что для малого трансформатора он будет теперь составлять

$$\frac{20}{1 + \frac{1}{x}} \%,$$

а для большого

$$\frac{20}{1 + x} \%$$

от полной нагрузки.

При отношении мощностей 3 : 1 мы будем иметь 15 и 5%.

Теоретически меньший трансформатор всегда находится в менее выгодном положении. Его уравнительный ток относительно больше во столько раз, во сколько раз его мощность меньше мощности параллельно работающего с ним трансформатора. Это понятно само собой, так как в замкнутой цепи обмоток проходит один общий ток.

Мы знаем, почему в нормах безопасности не рекомендуется параллельная работа трансформаторов, отношение мощностей которых больше 3 : 1. Однако, с другой стороны имеется также и известное преимущество в том, что больший трансформатор должен быть лишь на 5% больше, чем при идеальной параллельной работе (разумеется, предполагая, что у этого трансформатора — меньшее напряжение короткого замыкания). Распределение нагрузки будет особенно невыгодным в том случае, если малый трансформатор возьмет на себя добавочную нагрузку, иначе говоря, его напряжение короткого замыкания меньше. Поэтому при неодинаковых напряжениях короткого замыкания, нормы безопасности рекомендуют выбрать большее из них для меньшего трансформатора.

Пределный случай совпадающих по фазе напряжений короткого замыкания дает ясное представление о трудностях параллельной работы двух рядом расположенных трансформаторов. Эти трудности несомненно значительны и весьма вредны для эксплуатации. Уверения в том, что вышеописанные случаи мало вероятны, для эксплуатационного инженера совершенно недостаточны. Согласно нормам они допускаются, а потому и возможны.

Если на деле оказывается необходимым поставить два трансформатора вместо одного, то остается лишь учесть все возможные последствия с самого начала и заранее ограничить суммарную нагрузку. В противном случае трансформатор подвергается слишком длительной перегрузке и, тем самым, верной гибели. Этого не случится, если мы прибегнем к искусственным мерам улучшения параллельной работы, о чем речь будет впереди.

96. ВТОРОЙ ПРЕДЕЛЬНЫЙ СЛУЧАЙ РЯДОМ РАСПОЛОЖЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

Второму случаю предельно допустимой параллельной работы двух рядом расположенных трансформаторов соответствует случай с большой разностью сдвигов фаз у напряжений короткого замыкания. Кроме того предполагается еще и наличие допускаемой нормами разности в $+10$ и -10% между величинами этих напряжений и их средними значениями.

Фиг. 121 не соответствует полностью такому предельному случаю. Однако последний можно значительно упростить, если вообще пренебечь разностью между напряжениями короткого замыкания. После такого упрощения этот случай можно будет рассматривать по фиг. 121, несмотря на неточность изображенной на нем векторной диаграммы.

Углу сдвига фаз φ обоих напряжений короткого замыкания соответствует напряжение в замкнутой цепи обмоток в

$$2 \sin \frac{\varphi}{2} \text{ раз}$$

большее, чем среднее напряжение короткого замыкания. На самом деле напряжение в замкнутой цепи при более или менее крупных значениях φ — лишь незначительно больше.

Отсюда мы непосредственно видим, что, при сильно отличающемся характере обоих напряжений короткого замыкания, возникнут очень большие уравнивательные токи.

Последние возникнут и в том случае, если напряжения короткого замыкания вообще равны между собой, что, согласно нормам, должно дать удовлетворительную параллельную работу. Этим и объясняется жесткость норм, обоснованных прежней теорией параллельной работы.

Из фиг. 121 можно непосредственно получить и сдвиг фазы уравнивательного тока. Относительно токов нагрузки, в собственном смысле слова, он имеет сдвиг фаз в 90° . Конечно в одном трансформаторе он будет опережать ток нагрузки, а в другом — отставать от тока нагрузки.

Рассматривая снова особый случай параллельной работы двух одинаковых по мощности трансформаторов, мы будем иметь уравнивательный ток в

$$\sin \frac{\varphi}{2} \text{ раз}$$

большой, чем сам ток нагрузки. Суммарный ток в обоих трансформаторах будет, следовательно, в

$$\sqrt{1 + \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \text{ раз}$$

больше, чем при идеальной параллельной работе.

Возникает нежелательное ухудшение в эксплуатации. При разности сдвигов фаз в 60° обоих напряжений короткого замыкания, оба трансформатора перегружаются, приблизительно, на 12% . Такие большие разности сдвигов фаз мало вероятны, особенно у трансформаторов одинаковой мощности, имеющих все же приблизительно равные потери в меди. Однако такие разности мыслимы. Мощности могут быть одинаковы, а конструкции — различны. Потери в меди зависят от производительности охлаждающего устройства. Трансформатор с масляным охлаждением выдерживает значительно большие потери в меди

НТБ
ДНУЗТ

чем сухой трансформатор той же мощности. В последнем, при его больших междуобмоточных и междукатушечных промежутках, будут возникать большие напряжения. Параллельная работа трансформаторов с различными видами охлаждения и, кроме того, разного возраста всегда будет неудовлетворительной.

Различие в мощностях обоих трансформаторов не вносит ничего нового в проблему. Уравнительный ток для меньшего трансформатора будет представлять нагрузку во столько раз большую, во сколько раз мощность большего трансформатора превосходит мощность меньшего. Из этого следует заключить, что и здесь меньший трансформатор находится в невыгодных условиях. Более того, в данном случае он находится в еще менее выгодных условиях, чем в рассмотренном первом предельном случае, где малый трансформатор все же разгружался большим.

Можно, однако, отметить одно преимущество у трансформатора, у которого уравнительный ток опережает ток нагрузки в собственном смысле слова. Его намагничивающий ток исходит, очевидно, из трансформатора работающего с ним параллельно. Однако это преимущество настолько незначительно, что практически оно не играет никакой роли.

Результаты исследования обоих допустимых предельных случаев параллельной работы двух рядом расположенных трансформаторов оказались весьма неутешительными. При этом все время предполагалось, что коэффициенты трансформации в точности равны между собой.

Конечно следует во что бы то ни стало стремиться к выполнению этого условия. При авариях однако, может случиться, что для параллельной работы будут соединены трансформаторы с несколько различными коэффициентами трансформации. Поэтому следует рассмотреть и такой недопустимый случай.

Собственно говоря, разница между вторичными напряжениями при холостом ходе не вносит ничего нового. Она проявляется точно также, как и разница между суммарными падениями напряжения, а потому, разумеется, должна быть мала.

В трансформатор с меньшим вторичным напряжением пойдет ток из трансформатора с большим вторичным напряжением. Сдвиг фаз этого тока определяется общим суммарным сопротивлением обмоток. Такой ток будет представлять собой опережающий ток нагрузки. Для трансформатора же с большим вторичным напряжением уравнительный ток будет отстающим током нагрузки.

Этот уравнительный ток совершенно не зависит от величины нагрузки и все время течет по замкнутой цепи. Если, кроме того, и напряжения обоих трансформаторов не равны между собою, то этот уравнительный ток складывается с уравнительным током параллельной работы, образуя суммарный добавочный ток.

Собственно говоря, неточный коэффициент трансформации не всегда оказывается вредным. Каждый из обоих уравнительных токов, образующих суммарный добавочный ток, может быть больше последнего. Все же существует одна трудность. Уравнительный ток, вызванный неравенством напряжений короткого замыкания, пропорционален величине нагрузки, тогда как другой — от нагрузки не зависит.

Если у параллельно включенных трансформаторов при изменении суммарной нагрузки меняется и распределение ее между трансформаторами, то это доказывает неравенство коэффициентов трансформации.

НТБ
ДНУЗТ

Удовлетворительную параллельную работу можно достигнуть лишь в том случае, если трансформатор с меньшим коэффициентом трансформации будет иметь большее напряжение короткого замыкания. У эксплуатационного инженера имеется хороший способ борьбы с неудовлетворительной параллельной работой двух рядом расположенных трансформаторов с одинаковыми коэффициентами трансформации. Правда, не всегда, но все же большей частью трансформаторы имеют ответвления, дающие возможность изменить коэффициент трансформации. Если устроены ответвления с регулировкой в $\pm 4\%$, то в замкнутой цепи обмоток можно получить уравнивающее напряжение равное 4% от рабочего напряжения. Если разность суммарных падений напряжения будет уравниваться таким уравнивающим напряжением (что особенно возможно в случае сильного сдвига фаз между обоими напряжениями короткого замыкания), то этим самым параллельная работа будет значительно улучшена.

Применение этого способа возможно, однако, лишь при полной нагрузке и в ограниченных пределах. Его нельзя считать в достаточной мере удовлетворительным, так как он, кроме того, и далеко не безопасен и может применяться эксплуатационным инженером лишь при полном понимании происходящих явлений.

Отсюда мы видим, что способы, улучшающие параллельную работу, все же существуют. Кроме того описанный способ обращает наше внимание на опасности возникающие при параллельной работе из-за наличия ответвлений.

97. УЛУЧШЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ДРОССЕЛЬНЫМИ КАТУШКАМИ.

Имеются другие способы для улучшения параллельной работы. У них отсутствует недостаток, заключающийся в различном действии при различных мощностях. Все они преследуют одну цель — уменьшить уравнивающий ток при параллельной работе.

Напряжение, действующее в замкнутой цепи обмоток обоих трансформаторов, зависит от величины обоих напряжений короткого замыкания и сдвига фаз между ними (конечно, при одинаковых коэффициентах трансформации). Конструкцию трансформаторов изменить впоследствии невозможно, следовательно нельзя изменить и величины уравнивающего напряжения.

Уравнивающий ток зависит не только от уравнивающего напряжения, но и от суммарного сопротивления уравнивающей цепи. Это сопротивление очень легко изменить. Именно у двух рядом расположенных трансформаторов сопротивление соединяющих их проводников мало. Эти соединительные проводники могут включать в себе добавочное сопротивление, уменьшающее величину уравнивающего тока.

Для этой цели могут быть использованы как омические, так и индуктивные сопротивления. Удобнее и лучше всего применять индуктивное сопротивление. В уравнивающей цепи почти всегда, особенно при больших мощностях, предпочитают индуктивное сопротивление. Таким образом введением добавочного индуктивного сопротивления мы легко достигнем увеличения суммарного сопротивления.

Кроме того омическое сопротивление вызывает потери энергии, что почти исключается при индуктивном сопротивлении. Возможность избежать потерь энергии имеет большое значение.

Задачей добавочного сопротивления является выравнивание напряжений короткого замыкания обоих трансформаторов. Это сопро-

вление становится как бы частью обмотки, имеющей меньшее напряжение короткого замыкания. Подобный взгляд на добавочное сопротивление дает возможность легко его подсчитать.

Установка индуктивного выравнивающего сопротивления, т.-е. дроссельной катушки вызывает некоторые трудности. Дроссельную катушку приходится изготовлять с железным сердечником, в противном случае она будет слишком дорога. Железо же, благодаря своей переменной проницаемости, вызывает нежелательные изменения индуктивного добавочного сопротивления.

В дроссельной катушке с железным сердечником следует предусмотреть воздушный зазор, что выровнит ее характеристику. Полезно сделать воздушный зазор регулируемым, что облегчит наилучшее распределение нагрузки в эксплуатации.

Подобные дроссели оказались весьма пригодными в параллельной работе. Они не вызывают ни больших издержек, ни значительных потерь энергии в омическом сопротивлении и являются хорошим способом борьбы с трудностями параллельной работы.

Однако и правильно построенная дроссельная катушка имеет свой недостаток. Она может сделать одинаковыми напряжения короткого замыкания, однако она не может совершенно уничтожить сдвига фаз между ними. Последнее возможно лишь при одновременном введении и омического добавочного сопротивления.

Требования эксплуатации все же так далеко не заходят. Главная трудность обычно скрывается в различии между индуктивными падениями напряжения обоих параллельно включенных трансформаторов. Именно поэтому дроссель является самым приемлемым и в большинстве случаев вполне достаточным средством для улучшения параллельной работы.

Полный обзор параллельной работы двух рядом расположенных трансформаторов подтверждает те заключения, которые делались на основе частичных данных. Эксплуатационный инженер должен, по возможности, избегать зачастую лишней параллельной работы. Если он все же на это решается, то должен своевременно учесть все последствия. Идет ли он на уменьшение мощности или на установку дроссельной катушки, все равно оказывается необходимым оплачивать устройство, устраняющее неизбежные недостатки эксплуатации.

Нетрудно убедиться в том, что параллельная работа будет протекать гораздо лучше, если оба трансформатора будут совместно питать большой участок сети. Сопротивление подводных проводов будет играть здесь роль уравнивающих сопротивлений, при чем добавочных потерь энергии не будет возникать, так как все дело сведется к неизбежным потерям в проводах.

Более того. К проводникам, соединяющим два параллельно работающих трансформатора, приключены разные потребляющие приборы. Нагрузка последних распределится между трансформаторами соответствующим образом и точка раздела сдвинется так, что падения напряжения окажутся равными.

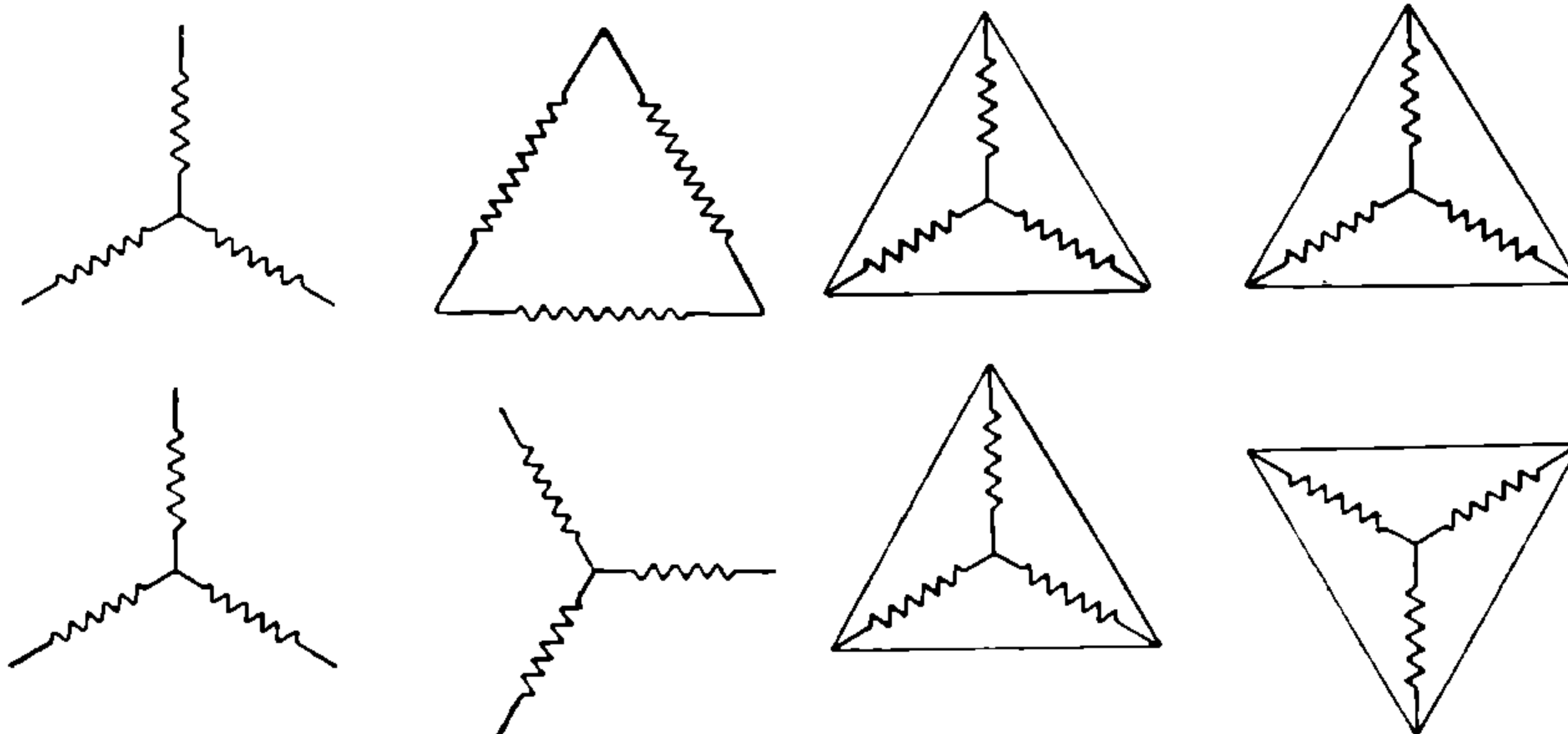
Правда, упомянутый вспомогательный проводник представляет собою, главным образом, омическое сопротивление, а потому совершенно не приспособлен к полному улучшению сдвига фаз между напряжениями короткого замыкания. Исследование обоих предельных случаев параллельной работы двух рядом расположенных трансформаторов показывает, что речь идет о выравнивании разниц, составляющих, приблизительно, лишь 10% от мощности одного трансформатора.

Эти различия настолько стираются при достаточно большом расстоянии между трансформаторами, что и эксплуатационный инженер останется вполне удовлетворенным. В этом случае параллельная работа теряет свои неприятные свойства, конечно лишь при условии соблюдения норм о параллельной работе.

98. ВКЛЮЧЕНИЕ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ.

Чисто практические вопросы параллельной работы сравнительно просты. Однако они требуют от эксплуатационного инженера некоторой внимательности особенно при покупке трансформатора. Правда, и во время эксплуатации могут возникнуть трудности, которые должны быть рассмотрены эксплуатационным инженером.

Кроме равенства напряжений короткого замыкания и коэффициентов трансформации, эксплуатационного инженера должен интересовать еще и род соединения трансформатора. Ему в этом помогают нормы, в которых рассматриваются различные группы соединений, вообще применяемых при параллельной работе.



Фиг. 124.

Фиг. 125.

Равенство напряжений короткого замыкания и коэффициентов трансформации не помогут, если напряжения вторичных обмоток обоих трансформаторов сдвинуты друг относительно друга по фазе. Если один трансформатор соединен по схеме «звезда-звезда», а другой — «треугольник-звезда», то ни о какой параллельной работе не может быть и речи. Фиг. 124 показывает, что треугольники, приложенных с первичной стороны напряжений, после трансформации, с вторичной стороны у обоих трансформаторов оказываются не равными по фазе.

Параллельная работа может оказаться невозможной и при двух трансформаторах с соединениями «звезда-звезда» в том случае, если они выполнены не с одинаковым направлением обмоток. Впрочем, эту трудность (которая ясно видна из фиг. 125) можно преодолеть. Необходимо попросту поменять с первичной или вторичной стороны фазовые обмотки одного трансформатора.

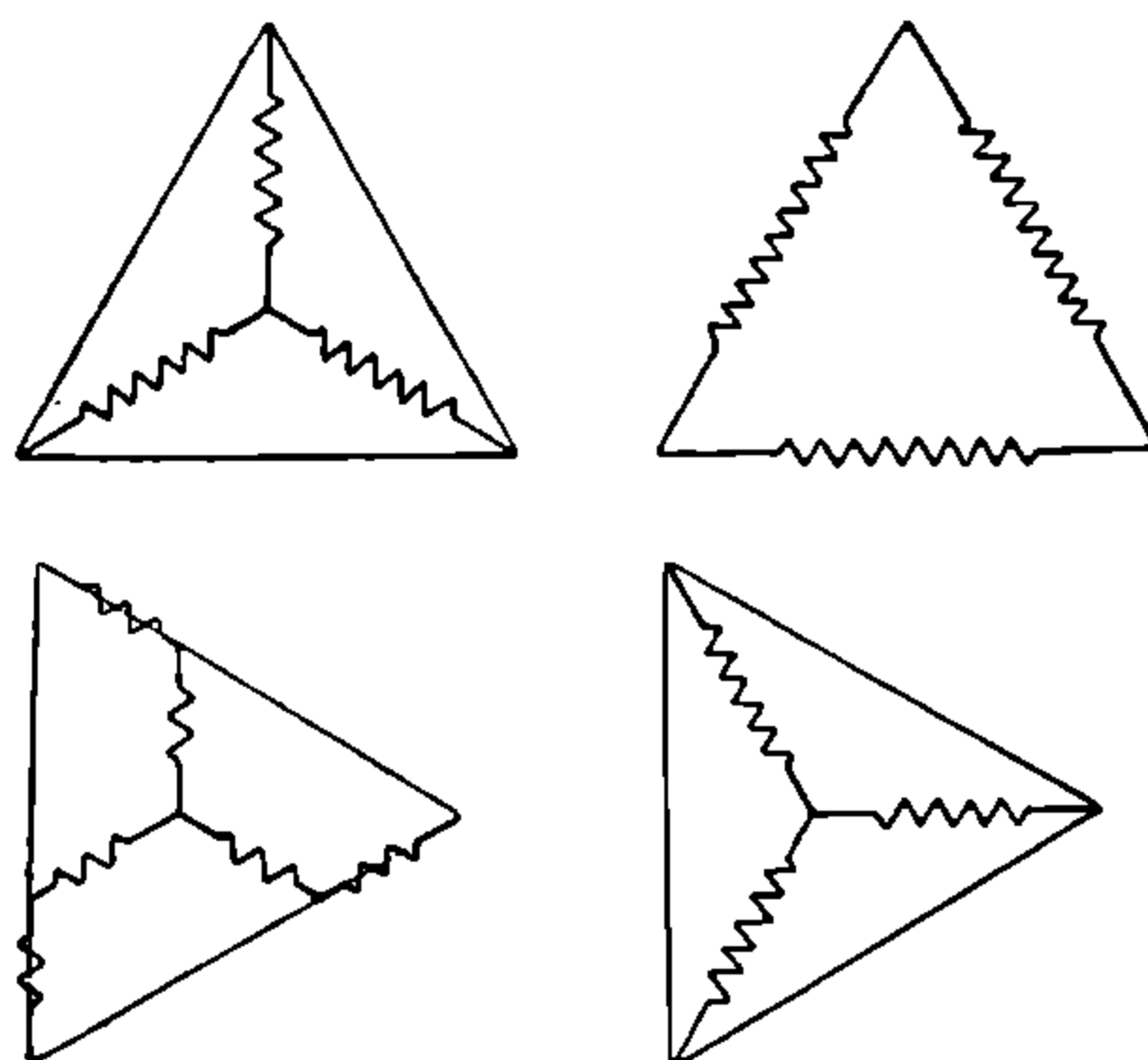
Самой существенной группой для параллельной работы является «треугольник-звезда» с одной и «звезда-зигзаг» — с другой стороны. Она существенна потому, что на основании опыта эксплуатационный инженер испытывает к ней недоверие, несмотря на ее полную пригодность.

Из фиг. 126 мы видим, что треугольник приложенных с первичной стороны напряжений, трансформируется в обоих трансформаторах в виде совершенно одинаковых вторичных напряжений. Остается вопрос лишь о том, не обосновано ли в какой-либо мере недоверие эксплуатационного инженера.

Все будет в порядке до тех пор, пока оба параллельно включенных трансформатора с указанными соединениями будут находиться под симметричной полной нагрузкой. При этом предполагается заранее, что все остальные известные нам условия параллельной работы выполнены.

Именно соединения «треугольник-звезда» и «звезда-зигзаг» предназначаются, в первую очередь, для односторонних осветительных нагрузок. Здесь нам приходится считаться с несимметричными нагрузками и вопрос о том, не основательны ли в действительности возражения против подобной параллельной группы, остается в полной силе.

Соединение «треугольник-звезда» является нормальным соединением, не вызывающим никаких осложнений. Соединение «звезда-зигзаг» представляет собой более трудное соединение. В параграфе 29



Фиг. 126.

было доказано, что при однофазных нагрузках в соединении зигзагом возникает добавочное падение напряжения, исчезающее при симметричных нагрузках.

Отсюда непосредственно вытекает, что опасения эксплуатационного инженера на деле оправдываются. Если параллельная группа удовлетворительно работает при симметричной полной нагрузке, то при односторонних нагрузках она будет вызывать трудности. Вполне мыслим случай, когда параллельная работа станет вообще недопустимой.

На учении об эксплуатации лежит, таким образом, обязанность разъяснить невыгодность применения пригодной в обычных условиях параллельной группы для работы при односторонних нагрузках. Каждое предприятие должно заранее решить вопрос, выберет ли оно для всех своих осветительных трансформаторов соединения «треугольник-звезда» или же оно раз навсегда остановится на соединении зигзагом. Преимущества и недостатки обоих соединений известны уже из исследования главы III.

Кроме рассмотренных выше вопросов, соединения не представляют каких-либо других трудностей в эксплуатации. В связи с вопросом о параллельной работе следует упомянуть и о случае трансформации напряжения двух разных сетей и подачи его на одну общую вторичную сеть.

В этом случае с первичной стороны могут оказаться различные напряжения и равенство коэффициентов трансформации будет немыслимо. Однако, вторичные напряжения, индуктированные главными магнитными потоками обоих трансформаторов, должны быть равны между собой.

В таких необычных параллельных включениях следует как-будто учитывать новый фактор, а именно, число периодов. В действительности это не так. Конечно равенство вторичных напряжений предполагает собою и равенство числа периодов. Такое равенство обеспечивается обоими источниками тока, соединенными параллельно при посредстве трансформаторов. Уравнительные токи параллельной работы обоих источников тока представляют собой нагрузку и для трансформаторов.

Проблема параллельного включения трансформаторов отличается всеми особенностями общей проблемы параллельного включения в электротехнике. Параллельное включение имеет свои недостатки, сводящиеся главным образом к неравенствам параллельных ветвей. Повсюду в электротехнике конструктор по возможности избегает параллельных включений. Лучше всего, если и эксплуатационный инженер пойдет по этому пути, тогда он будет мало сталкиваться с трудностями параллельной работы.

99. ПРОБЛЕМА ОТВЕТВЛЕНИЙ.

Весьма существенным эксплуатационным вопросом трансформаторостроения является вопрос об ответвлениях. Он гораздо сложнее, чем кажется и, к сожалению, ему мало уделяют внимания. Еще до сих пор строят ответвления весьма необдуманно. Как конструктор, так и эксплуатационный инженер в одинаковой мере заинтересованы в том, чтобы внести ясность в этот вопрос.

Ответвления служат для изменения коэффициента трансформации. Они очень часто удовлетворяют желание эксплуатационного инженера и вводят необходимые улучшения в эксплуатации. Они делают трансформатор более перемещаемым и дают возможность лучше использовать его в различных местах сети.

Электрическая станция, вступающая в эксплуатацию, обычно вначале находится под слабой нагрузкой. Падение напряжения на конце линии передачи еще мало. Величина напряжения в распределительной сети будет нормальная. Трансформатор трансформирует с относительно высокого напряжения длинной линии на более низкое установленное напряжение распределительной сети.

Постепенно соотношение меняется. Нагрузка возрастает. Новые потребители присоединяются к сети. Падение напряжения в линии передачи возрастают. Одновременно с этим возникает падение напряжения и в распределительной сети.

Для компенсации падения напряжения в линии передачи можно, конечно, повысить напряжение источников тока на центральной станции. Однако сам генератор имеет свое внутреннее падение напряжения, с которым он в первую очередь должен справиться.

Таким образом становится понятным желание эксплуатационного инженера несколько увеличить напряжение на конце длинной линии. Этого можно достигнуть, устроив трансформатор так, чтобы он давал необходимое напряжение в распределительной сети также и при уменьшенном первичном напряжении. Его следует выполнить с различными, мало отличающимися друг от друга коэффициентами трансформации.

С этой точки зрения, ответвления обеспечивают долгий срок службы трансформатора. Их существование оправдывается в новых центральных станциях, где предвидится возрастание нагрузки за короткое время. В старых предприятиях, имеющих строго определенный круг потребителей, ответвления не нужны (конечно, в случае если они не имеют каких-либо специальных назначений).

Падение напряжения в линиях передачи создает в различных местах линии различные первичные напряжения. Желание эксплуатационного инженера обеспечить применимость трансформатора для большей части установки — это желание вполне законно. И с этой точки зрения ответвления полезны.

Проблема ответвлений может стать особенно интересной в эксплуатации при наличии большой осветительной нагрузки. В этом случае, в пределах 24 часов приходится до нескольких раз менять коэффициент трансформации.

Сильное влияние времени на коэффициент трансформации ставит перед нами новый вопрос. Решив вопрос о необходимости выбора меньшего коэффициента трансформации (т.-е. о применении ответвления) к началу осветительного периода, мы этим самым не решаем вопроса о целесообразности ответвлений вообще, в случае, если их нельзя применять без перерыва в подаче тока.

Нелегко найти еще какие-либо веские обоснования необходимости ответвлений. Все остальное представляет собой лишь продукт неясных предчувствий эксплуатационного инженера. Он рассчитывает на неизвестные случайности, когда ему могли бы пригодиться ответвления. В действительности мы видим, что заказы на ответвления не прекращаются, несмотря на то, что они обычно заказываются без особой нужды.

Можно было бы не возражать против лишних ответвлений, если они не имели бы своих недостатков. Можно примириться с недостатками, если они уравновешиваются определенными преимуществами. Причина необдуманных заказов на ответвления заключается в том, что эксплуатационному инженеру известны все преимущества ответвлений, недостатки же, к сожалению, не все известны. Задачей учения об эксплуатации является заполнение этого пробела.

Один недостаток ответвлений, правда хорошо известен эксплуатационному инженеру, это — удорожание трансформатора. Без ответвлений трансформатор дешевле. Однако расход на ответвления составляет лишь несколько процентов от стоимости всего трансформатора. Такой расход не может удерживать от заказа ответвлений, тем более, что от них ожидаются одни лишь названные выше преимущества.

Однако ответвления вредны не только из-за связанных с ними издержек. Они ухудшают во многих отношениях самый трансформатор, как это видно из дальнейших рассуждений. Самый большой недостаток заключается в том, что изменение числа витков происходит у обмотки, имеющей много витков, т.-е. у обмотки высокого напряжения. Лишь в виде исключения можно устраивать строго определенные ответвления со стороны низкого напряжения, так как здесь каждый виток играет крупную роль.

Устройство ответвлений у обмотки высокого напряжения связано, однако, с целым рядом конструктивных вопросов, осложняемых наличием высокого напряжения. Существует и кроме этого ряд трудностей. Проблема ответвлений часто представляет собой головоломную задачу.

100. КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ОТВЕТВЛЕНИЙ.

Обычно ответвления используются редко. Для того, чтобы оказалось необходимым использовать наличные ответвления, соотношения в эксплуатации должны для трансформатора очень сильно измениться. Поэтому времени бывает всегда достаточно для того, чтобы сделать необходимые переключения.

Это и являлось причиной того, что в прежнее время ответвление представляло собой конец обмотки, тщательно изолированной для избежания опасностей от напряжения. Для присоединения к зажимам приходилось разматывать одно ответвление и заматывать действовавшее до этого ответвление.

При появлении масляного охлаждения такой простой способ оказался эксплуатационному инженеру неудобным. Он отнимал слишком много времени. Необходимо было вынимать трансформатор из масляной ванны, выждать пока с него не стечет все масло, а лишь затем приступить к выполнению необходимого переключения. Это и вызвало к жизни конструкции с легко доступными ответвлениями.

Конец самой обмотки и ответвления были подведены к специальной доске, находившейся под крышкой трансформатора в масляной ванне. Здесь было удобно осуществлять необходимые переключения. Это устройство предохраняло и от опасностей, связанных с наличием конца обмотки возле других ее витков.

И это оказалось эксплуатационному инженеру недостаточным. Он вообще не хотел иметь дело с внутренним оборудованием трансформатора. Он требовал устройства ответвлений вне кожуха, доступных и легко регулируемых в любой момент.

Осуществить это можно было двумя способами. Один способ заключается в том, что доска с зажимами оставляется под крышкой кожуха, а доска с переключателем устанавливается снаружи. Появился, таким образом, целый ряд конструкций, удовлетворительно решивших эту задачу. Второй способ заключается в том, что ответвления выводятся наружу через крышку кожуха или через одиночные изоляторы, или же через общие вводы.

Ответвления и относящийся к ним конец обмотки имеют друг относительно друга незначительные напряжения. Поэтому оказывается возможным пропускать все ответвления одной фазы через один ввод, на котором располагаются зажимы.

Все упомянутые конструкции, очень удобные для эксплуатационного инженера, однако, становились все дороже и дороже. Издержки переставали себя оправдывать. Подобные решения проблемы, ответвлений были бы окончательными, однако этому помешал постепенный рост напряжений. Все более и более сказывалось то обстоятельство, что ответвления возможны лишь со стороны высокого напряжения. Конструкции, которые при умеренных напряжениях обходились недорого, сильно удорожались по мере роста напряжений.

Раньше всех отпали конструкции с общими многократными вводами. Они недостаточно надежны и представляют собою трудно выполнимую конструкцию. Кроме того они неудовлетворительны из-за постепенной порчи зажимной доски. При высоких напряжениях само выведение наружу концов обмоток представляет уже значительные трудности.

Необходимо помнить, что проводник, соединяющий конец обмотки с зажимом, должен миновать ярмо, остов и соединения других фаз, не касаясь при этом близко и стенки кожуха. Эти трудности при высо-

НТЬ
ДНУЗТ

ких напряжениях очень велики. Ответвления, так же как и конец обмотки, подходят к крышке кожуха. Этим самым многократный ввод как бы доходит до самой обмотки.

Все эти трудности возникают лишь тогда, когда ответвления выполнены у входных витков (что имеет ряд веских оправданий). Прежде всего все трудности ответвления разрешаются одновременно с увеличением изоляции входных витков. Входные катушки можно подобрать так, чтобы ответвления отходили от концов катушек.

Гораздо меньшие трудности связаны с ответвлениями, выполненными у нулевой точки. Безразлично, в каком месте обмотки уменьшать или увеличивать число витков. Выполняя ответвления со стороны нулевой точки, не имеющей все же никакого напряжения относительно железного сердечника, мы избавимся от всех вышеописанных трудностей. Это—действительное средство и его следует использовать. Сдвигание нулевой точки соответствующими ответвлениями нетрудно выполнить на доске, смонтированной под крышкой кожуха. Нетрудно выполнить и обслуживание извне.

Ответвления как в начале обмотки, так и в конце ее, обладают одним общим недостатком. При концентрическом расположении обмоток, наличие ответвлений вызывает сдвиг обмотки высокого напряжения в направлении оси керна. Обмотка высокого напряжения принимает различные положения относительно обмотки низкого напряжения в зависимости от того, какое ответвление используется.

Поле рассеяния чувствительно к таким несимметричностям. Влияние последних сказывается особенно сильно при механических усилиях, возникающих вследствие короткого замыкания. У мощных трансформаторов при коротком замыкании возникают осевые усилия, весьма опасные для них.

Этим объясняется то обстоятельство, что во многих конструкциях ответвления выполняются посередине обмотки. При этом снова возникают прежние трудности, связанные с напряжением. Эти трудности колеблются между трудностями, вытекающими из устройства ответвлений у входных витков, и трудностями, связанными с устройством ответвлений у нулевой точки.

Рассмотренные здесь трудности конструктивного разрешения проблемы ответвлений должны убедить эксплуатационного инженера в том, что ненужных и лишних ответвлений следует избегать. Это относится особенно к ответвлениям, значительно изменяющим коэффициент трансформации. Они не должны быть слишком редкими. Чем больше изменение, тем дороже ответвление и тем ощутительнее вредные электрические последствия.

Потенциал-регулятор значительно лучше регулирует напряжение и, что особенно важно, выполняет это во время эксплуатации. Конечно он значительно дороже ответвлений. Но во многих случаях потенциал-регулятор гораздо выгоднее ответвлений, особенно тогда, когда речь идет о больших изменениях напряжения. Не следует выполнять ответвлений больше, чем на 5%.

101. КОНСЕРВАТОР ДЛЯ МАСЛА.

Эксплуатационным вопросом, который безусловно должен быть рассмотрен, является вопрос о так называемом консерваторе для масла. Он имеет внутреннюю связь с целым рядом других вопросов, касающихся масляной ванны трансформатора.

Потребность в консерваторе для масла вытекает из того, что масляная ванна из-за своей чувствительности должна быть удалена от внеш-

них влияний. На деле масло в обыкновенном кожухе без консерватора мало защищено. Кожух закрывает масло лишь с виду. Воздух со свойственной ему влагой имеет все же доступ в кожух.

Трансформатор с масляным охлаждением дышит. При полной нагрузке масло значительно нагревается и заметно расширяется. При уменьшении нагрузки оно снова охлаждается и возвращается к первоначальному объему. Ясно, что у холодного трансформатора без консерватора кожух вообще не должен быть наполненным маслом до краев. Расширяющееся масло будет во время эксплуатации вытекать и даже, при известных обстоятельствах, разорвет кожух.

Наполняя кожух маслом не до самых краев, мы тем самым допускаем в него влажный воздух. Более того. После каждого рабочего периода воздушная прослойка возобновляется. Все новые и новые количества влаги проникают в масло. Неудивительно поэтому, что многие трансформаторы после многолетней работы оказываются глубоко погруженными в воде, накопившейся как более тяжелая жидкость на дне кожуха.

Масло весьма чувствительно к влаге. Тоби (Tobey) доказал целым рядом опытов, что при содержании влаги в количестве меньшем одной промили прочность масла на пробивание уменьшается больше, чем на одну треть. Безопасность в эксплуатации сильно зависит от содержания масляной ванны в сухом виде.

Разумеется, наибольшей опасности от влаги подвергаются те трансформаторы, с которых нагрузка часто снимается. К этой группе относятся небольшие осветительные и силовые трансформаторы. Мощные трансформаторы, питающие обширные сети, находятся под более равномерной нагрузкой, а потому дышат меньше.

Впрочем, при проникновении воздуха в кожухе трансформатора маслу угрожает опасность не только со стороны влаги. Углекислота вызывает процессы сгорания в масле, дающие продукты разложения. Эти продукты разложения ведут к загрязнению охлаждающих поверхностей и к уменьшению прочности на пробивание.

Во избежание всех указанных недостатков желательно иметь трансформатор постоянно наполненным маслом, а дыхание его воспринимать особым резервуаром, в котором влияние воздуха в значительной мере уничтожено. Разумеется, кожух должен быть так соединен с этим добавочным масляным резервуаром, чтобы масло могло по этим сосудам передвигаться. Этот добавочный масляный резервуар и является масляным консерватором.

Остается еще открытым вопрос о том, нужен ли консерватор для каждого трансформатора с масляным охлаждением. Он имеет свои недостатки, с которых будет сказано ниже. Кроме того он защищает масло не полностью. Во время передвижения масла в консерватор и обратно возможно загрязнение масла.

Применение первосортного масла существеннее применения консерватора. Имеется ряд почти совершенно не загрязняющихся сортов масел. Превосходно по качеству русское масло. Хороши и американские масла. Галицийское и румынское трансформаторное масло оказалось хуже по качеству.

Необходимо самым энергичным образом настаивать на применении первосортных масел. Связанные с этим издержки хорошо себя окупают. Конструктор имеет право требовать, чтобы его конструкция не повреждалась в эксплуатации. Он должен конструировать для работы с хорошим маслом, ибо это ведет к удешевлению трансформатора. Отсюда нетрудно понять, почему заводы стремятся продавать транс-

НТЬ
ДНУЗТ

форматоры, наполненные маслом. Для заводов играет в данном случае роль не прибыль, извлекаемая при одновременной продаже масла. Они хотят, да и должны дать нечто цельное. Они этим хотят раз'яснить эксплуатационному инженеру вопрос о том, какое масло должно применяться для трансформатора и какие сорта масел легли в основу конструкции.

Однако одной лишь доставкой трансформатора, наполненного маслом, вопрос о масляной ванне для эксплуатационного инженера не исчерпывается. Гарантийный срок для масляной ванны составляет один год. О дальнейшей судьбе масляной ванны конструктор не заботится. На это обстоятельство учение об эксплуатации должно обратить внимание. На эксплуатационного инженера возложена обязанность заботиться о дальнейшем обновлении масляной ванны.

При правильном разрешении вопроса о масле роль консерватора значительно уменьшается. Применение консерватора, при современном состоянии вопроса о масле, создает одну психологическую опасность. Консерватор подает эксплуатационному инженеру повод к применению дешевых и плохих масел, что как будто само собой напрашивается. Разумеется такое мнение ошибочно.

102. РАЗМЕРЫ КОНСЕРВАТОРА ДЛЯ МАСЛА.

Объемный коэффициент расширения трансформаторного масла составляет приблизительно $0,0007^{\circ}\text{C}^{-1}$. Незначительность этого числа создает ошибочное представление о действительном изменении объема при «дыхании» трансформатора, что нетрудно доказать примерным подсчетом.

Покидая нагретую поверхность трансформатора, масло достигает превышения температуры до 60°C : Для подсчета воздушной «подушки» над маслом и консерватором приходится учитывать сначала не полное температурное напряжение, а меньшее. Масло, охлажденное у внутренних стенок кожуха, более холодно, чем масло под крышкой трансформатора, на величину, равную половине температурного напряжения у рабочей поверхности трансформатора. Поэтому при расчете достаточно исходить из превышения температуры в 50 до 55°C .

Но с другой стороны не следует забывать, что температура окружающего воздуха колеблется в течение года. Наиболее низкая температура масла зимой и наиболее высокая летом создадут температурное напряжение, безусловно, не меньшее чем 80°C .

Таким образом получается изменение объема на 5,6%. Конечно для выбора консерватора одного этого недостаточно. Безусловно необходимо, чтобы масло оставалось в консерваторе и при самой низкой температуре, в противном случае воздух будет иметь свободный доступ во внутрь кожуха.

Более того. При возможных в эксплуатации коротких замыканиях масло достигает значительно более высоких температур. В параграфе 35 было доказано, что приемлемое время выключения автомата мы получим лишь при приближении к крайним температурным пределам, а именно к температуре воспламенения масла.

Таким образом для консерватора окажется необходимым объем, равный 10% объема холодной масляной ванны. Такие конструкции выполняются в настоящее время очень часто. Однако этих размеров достаточно лишь в том случае, если при самых низких температурах в консерваторе остается лишь весьма незначительное количество масла.

Учитывая короткие замыкания, рекомендуется объем консерватора выбирать больше чем 10% объема холодного масла.

Короткое замыкание создает еще одну значительную опасность. Расширение масла при коротком замыкании происходит в продолжение нескольких секунд. За такое короткое время нагретое масло должно пройти из кожуха в консерватор. Наличие соединяющего канала небольшого сечения обуславливает значительные скорости движения масла, а тем самым и чрезмерное давление в кожухе. Этого явления нельзя недооценивать.

Пример. Пусть дан трансформатор мощностью в 100 kVA. При нормальной полной нагрузке его кожух наполнен и содержит 500 литров масла. При коротком замыкании приращение температуры может достигнуть 50° С. Масло должно получить расширение в 3,5% и в консерватор уйдет

$$0,035 \cdot 500 = 17,5 \text{ литров масла.}$$

Время для передвижения такого количества масла составляет, допустим, 2 секунды.

Если соединяющий канал имеет диаметр лишь в 20 mm, то масло приобретает в нем скорость

$$\frac{17,5 \cdot 4}{2 \cdot 0,2^2 \pi} = 280 \text{ дм./сек.} = 28,0 \text{ м/сек.}$$

Эта скорость соответствует давлению в

$$\frac{28,0^2}{2 \cdot 9,81} = 40 \text{ м}$$

масляного столба, что соответствует, приблизительно, избыточному давлению в 3,5 атмосферы.

Как мы видим, опасность весьма значительна. Отсюда легко объяснить причину выпучивания кожухов при коротких замыканиях. И недостаточность объема, и слишком большое наполнение консерватора вызывают те же опасности, что и недостаточность сечения соединительной трубы между кожухом и консерватором.

Соотношения в действительности оказываются еще худшими. Уменьшая поперечное сечение соединительной трубы посредством фильтра для масла, мы этим самым сильно увеличиваем скорость масла. Здесь требуются большие предосторожности. К сожалению до сих пор недостаточно обращают внимания на эту не малую опасность, вызываемую коротким замыканием.

Кроме того установка консерватора создает трудности, связанные с вопросом о плотности закрывания кожуха. Даже в обыкновенном кожухе с воздушной «подушкой» наблюдается образование неплотностей под его крышкой. Масло проникает через малейшие щели. Автогенная сварка дает плотные соединения лишь при удовлетворительном ее выполнении. При наличии консерватора давление в кожухе значительно увеличивается, кроме того, должны быть выполнены плотными и соединения у крышки и у изоляторов. Зачастую эту задачу бывает трудно решить, во всяком случае крышку трансформатора необходимо сильнее закреплять.

У кожуха без консерватора не должно быть плотного соединения крышки. Это значительно удешевит кожух и, кроме того, избавит его от выпучивания при коротких замыканиях.

Очень интересным является вопрос о том, следует ли применять специальные конструктивные меры против выпучивания после того, как выяснилась возможность его возникновения при коротких замы-

НТБ
ДНУЗТ

каниях. Эксплуатационный инженер выскажется за подобные меры. Действительно, существует много кожухов, у которых по воле заказчиков предусмотрены «спасательные пояса».

Кожух, стенки которого эластично воспринимают избыточные давления при коротком замыкании,—такой кожух будет являться сомнительной конструкцией, если у него не предусмотрена возможность удовлетворительного оттекания масла. Это в одинаковой мере действительно как для кожуха без консерватора, так и для кожуха с консерватором. Масло должно расширяться. В противном случае оно сорвет крышку.

Нельзя строить стенки кожуха способными сопротивляться давлению настолько, чтобы масло могло в них заключаться без добавочных приспособлений. Если у кожуха без консерватора отсутствует на крышке предохранительный клапан, или если консерватор соединен недостаточно длинным каналом с кожухом, то опасность при этом очень велика.

Такая опасность заключается во взрывах при коротком замыкании. Избегнуть взрывов можно лишь в том случае, если кожух способен выпучиваться. Наилучшим решением представляет собою кожух, оказывающийся устойчивым именно тогда, когда консерватор правильно наполнен. Невнимательный эксплуатационный инженер, употребляющий много масла, рискует привести в негодность кожух своего трансформатора. Предупредить такую возможность — это задача учения об эксплуатации, для которого проблема консерватора является немаловажной. Особенно в связи с дальнейшей проблемой о дыхании трансформатора.

103. НАДЗОР ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ.

Обзор учения об эксплуатации трансформатора убедительно показывает, что трансформатор все же не является попросту электрическим «передаточным приводом». С того времени, когда стали применяться трансформаторы с закрытыми кожухами, эксплуатационные инженеры иначе к ним и не относились. Там, где требовалось изменение напряжения, туда устанавливали трансформатор с обыкновенным кожухом и никто не заботился о его дальнейшей судьбе до тех пор, пока он сам не напоминал о своем существовании.

Требования эксплуатационного инженера постепенно возрастали. Конструктор по возможности им подчинялся. Невыполнимые требования вели к нежелательным столкновениям. Жесткость норм безопасности в значительной мере объясняется давлением эксплуатационного инженера.

В настоящее время он уже не так смотрит на вещи. Он, наконец, понял, что имеет перед собой все же машину. Он должен изучить ее, как и всякую другую машину. Одним коэффициентом трансформации вопрос не исчерпывается.

И трансформатор требует управления, наблюдения, обслуживания. И из трансформатора можно извлечь максимальную пользу при умелом обращении с ним.

В теории и в практике решающим является вопрос об экономичности трансформации. Удобства стоят денег, а небрежность уничтожает ценности. Следует учесть неопровержимый факт, что трансформатор весьма нетребователен, что лишь при покупке ему необходимо уделить много внимания, в эксплуатации же он требует редкого присмотра. Учитывая все это, мы приходим к выводу, что эксплуатационный инженер

НТБ
ДНУЗТ

должен в совершенстве овладеть эксплуатационной проблемой трансформатора и устанавливать наблюдение за его работой.

Наблюдение неразрывно связано с измерениями. Наблюдение начинается, собственно говоря, с момента приемки трансформатора. Однако, приемные измерения можно рассматривать как отдельную группу, поскольку они могут быть выполнены еще на испытательной станции конструктора, где имеется все необходимое для подобных испытаний.

В самой эксплуатации все измерения все же возможны да и, кроме того, необходимы. Приемные измерения производятся для снятия ответственности с конструктора, тогда как измерения при эксплуатации относятся к области надзора. Подобными измерениями учение об эксплуатации должно безусловно заняться.

Самыми существенными измерениями являются измерения при холостом ходе и коротком замыкании трансформатора, так как они дают полное представление о его особенностях. Такие измерения следует выполнить не только при приемке. Перерывы в эксплуатации должны быть использованы эксплуатационным инженером для повторения измерений при холостом ходе и коротком замыкании для того, чтобы своевременно заметить изменения, возникшие в главных свойствах трансформатора.

Представляется весьма трудным повторить простейшими способами опыты холостого хода и короткого замыкания. Для измерений при холостом ходе требуется полное рабочее напряжение, имеющееся всегда налицо в трансформаторной будке. При этом лучше всего присоединить трансформатор со стороны низкого напряжения к сети для того, чтобы можно было довольствоваться установкой вольтметра, ваттметра с переключателем и амперметра. Измерения при коротком замыкании можно выполнить при любом токе короткого замыкания. Разумеется, измерения лучше производить при небольших токах.

Напряжение короткого замыкания пропорционально току короткого замыкания, потери же в меди пропорциональны квадрату тока короткого замыкания.

Замыкая трансформатор накоротко со стороны низкого напряжения и включая его обмотку высокого напряжения в сеть низкого напряжения, мы получим достаточно малый ток короткого замыкания вполне пригодный для целей измерения. И здесь, как и при опыте холостого хода, достаточно трех приборов.

Для чего повторять опыты холостого хода и короткого замыкания? Что может измениться со временем? Как из изменения данных опыта заключить об изменениях особенностей материалов или конструкций?

Измерение при холостом ходе дает нам величину намагничивающего тока и величину потерь холостого хода, практически равных потерям в железе.

Потери в железе могут действительно изменяться. Они могут увеличиваться по двум причинам: из-за старения железа и из-за серьезной ошибки в устройстве железного сердечника.

Старение железных листов сердечника объясняется, главным образом, неправильной температурой обжига. Прежде всего увеличиваются потери на гистерезис. Кремний, содержащийся в современном высоколегированном железе, является хорошей защитой от старения. Во всяком случае — вина конструктора, если он применяет плохое железо. За гарантийный срок в один год подобные ошибки проявятся в виде увеличения потерь холостого хода. Уже по одной этой причине необходимо повторять измерения время от времени.

НТБ
ДНУЗТ

Гораздо хуже обстоит дело с болезнями железа. Железные сердечники, скрепленные болтами, быстро старятся. При построении сердечника диаметры отверстия для болтов часто оказываются недостаточными, особенно в случае, если отверстия в местах выполнены неточно и не совпадают. В таких случаях монтер прибегает к помощи разбуковки, что ведет к электрическому соединению железных листов. Возникающие токи короткого замыкания сваривают при этом отдельные части сердечника и постепенно превращают его в один сплошной железный массив. Потери в железе также постепенно возрастают. Измерение должно своевременно обнаружить этот недостаток.

Измерение короткого замыкания выявляет, главным образом, возможные изменения поля рассеяния. После больших коротких замыканий могут появиться остаточные изменения формы обмотки. Отсюда мы видим, что опыты короткого замыкания весьма необходимы.

Эксплуатационному инженеру рекомендуется хотя бы один раз устроить сильное короткое замыкание для того, чтобы убедиться, что конструкция действительно в порядке. Подобное испытание может быть выполнено даже еще при приемке, однако, обязательно в присутствии конструктора и в пределах гарантийного срока.

При опыте короткого замыкания мы получаем весьма точную величину потерь в меди. Во всяком случае эксплуатационный инженер должен обратить внимание на то обстоятельство, что эти потери зависят от температуры. Поэтому при приемке полезно поставить опыт короткого замыкания непосредственно после испытания на нагревание.

По потерям в меди в холодном состоянии нельзя непосредственно судить о потерях в нагретом состоянии. Дело в том, что наряду с чистыми потерями от джоулева тепла наблюдаются (особенно в мощных трансформаторах) еще и добавочные потери, вызываемые явлениями скинэффекта в проводниках с большим поперечным сечением.

Эти добавочные потери от вихревых токов при высокой температуре уменьшаются обратно пропорционально потерям на джоулево тепло. Таким образом рекомендуется выполнить два измерения короткого замыкания: одно измерение — при холодном трансформаторе, другое — при нормально нагретом трансформаторе. Такие измерения дают ясное представление о распределении суммарных потерь в меди. Однако для эксплуатационного инженера это распределение потерь имеет малое значение.

104. ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОПЫТАХ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.

Существуют трансформаторы, при заказе которых требуются определенные гарантии для их главных электромагнитных свойств. Правильная постановка опытов холостого хода и короткого замыкания у таких трансформаторов имеет большое значение.

Теплосиловые установки очень часто вынуждены строго следить за потерями трансформатора. Они требуют, поэтому, гарантий как для потерь в железе, так и для потерь в меди. Зачастую они назначают премии за понижение предписанных чисел потерь. При сетях, находящихся под большой нагрузкой, приходится требовать гарантию и для тока холостого хода. Иногда предписывают и напряжение короткого замыкания. Во всех этих случаях вместе взятых приемные испытания холостого хода и короткого замыкания очень существенны и могут представить много трудностей как конструктору, так и эксплуатационному инженеру.

Учение об эксплуатации должно безусловно избегать преувеличений. Заказчик должен в точности знать какие требования он вправе предъявить. Он должен также знать, какие измерения дают возможность проверить, выполнил ли конструктор свои обязательства.

Величину потерь нельзя предписать без определенных допусков. Конечно, конструктор может обойтись и без допусков. Он может заранее выбрать для своего расчета меньшие величины потерь и создать таким путем для себя допуск, зная, конечно, что против уменьшения этих величин возражений не встретится.

Потери в меди можно заранее подсчитать. Теплопроводность медной обмотки очень мало колеблется, что дает возможность с достаточной точностью подсчитать чистые джоулевы потери. Однако и потери от вихревых токов, возникающих вследствие скинэффекта в проводниках больших сечений, — и эти потери в трансформаторах могут быть достаточно точно подсчитаны.

Несмотря на это в измерениях при приемке встречаются отклонения, которые никак не могут быть объяснены исключительно неточностью расчета. Точный расчет должен определить потери в меди с точностью от 2 до 3%. На деле же разница бывает иногда больше 10%.

Ошибка зависит исключительно от неточного параллельного соединения обмоток. Параллельно соединенные катушки очень часто встречаются, главным образом, со стороны низкого напряжения. Небольшие неравенства полей рассеяния отдельных катушек вызывают значительные внутренние уравнительные токи.

При очень низких напряжениях потери в соединительных проводах обмотки низкого напряжения сказываются очень сильно. Конструктор должен, конечно, об этом знать. Однако и эксплуатационный инженер не должен этого упускать из виду для того, чтобы при приемке оценить этот недостаток соответствующим образом.

Конструктору должно быть вполне достаточно допуска в 10% для потерь в меди. Больших допусков не следует ему предоставлять, так как в случае нужды он сможет, правда, с несколько меньшей свободой, выполнить возложенную на него задачу.

Этим не исчерпывается вопрос о потерях в меди. В предыдущем параграфе уже указывалось, что измерения для опыта короткого замыкания должны производиться при нормально нагретом трансформаторе. Это требование можно еще более обосновать. Собственно говоря, при опыте короткого замыкания трансформатор никогда не бывает холодным. Чем больше трансформатор, тем скорее обмотка достигнет превышения температуры над масляной ванной. У мощных трансформаторов достаточно нескольких минут для того, чтобы обмотка достигла полного превышения температуры над маслом.

Конечно было бы несправедливо по отношению к конструктору, после опыта короткого замыкания с «холодным трансформатором», учитывать полностью все превышение температуры. Поэтому при гарантийных опытах последнее обстоятельство придется принять во внимание.

Однако конструктор будет извлекать полную готовность к тому, чтобы потери в меди измерять непосредственно после испытания на нагревание, при котором трансформатор имеет полную нормальную температуру. Эта готовность объясняется тем же, чем раньше объяснялись возражения конструктора против «холодного» опыта короткого замыкания.

Сняв полную нагрузку, после которой трансформатор достиг полной нормальной температуры, мы приступаем к опыту короткого замыкания. Если даже для этого все подготовлено, то все же понадобится

НТБ
ДНУЗТ

несколько минут, прежде чем трансформатор будет включен на короткое. Между тем температура меди понизилась, а при мощных трансформаторах всякое превышение температуры между медью и маслом вообще исчезнет. В результате этого потери в меди окажутся значительно более низкими, чем при действительной полной нагрузке во время длительной работы.

Измерения при опытах короткого замыкания как для холодного, так и для нагретого состояния могут заключать значительные ошибки до 10% вследствие необычайной изменчивости температурного напряжения между медью и маслом. Эти ошибки будут то в пользу, то во вред конструктору, так как упомянутое температурное напряжение может составлять 25°C .

Чем меньше трансформатор, тем слабее сказывается эта ошибка.

Выполнив оба опыта короткого замыкания, мы значительно ослабляем ошибку. Однако мешают добавочные потери от скинэффекта. Как уже упомянуто, при возрастающей температуре они уменьшаются обратно пропорционально чистым джоулевым потерям.

При таком положении вещей остается лишь остановиться на опыте короткого замыкания при фактической температуре трансформатора, прибавив в дальнейшем соответствующую температуру. Можно также и повторить измерение при нагретых сопротивлениях через очень короткое время непосредственно после выключения полной нагрузки.

Из уменьшения сопротивления в зависимости от времени можно будет определить и уменьшение температуры по истечении каждой минуты. Таким путем можно получить несколько точек экспоненциальной кривой, по которой уменьшается температурное напряжение между маслом и медью, а также подсчитать и первоначальное значение.

Таким образом мы видим, что опыт короткого замыкания труднее, чем он кажется в действительности. Его следует дополнять измерением сопротивлений. Такие измерения сопротивлений и без того необходимы при испытании на нагревание. Они должны следовать непосредственно за полной нагрузкой; лишь после этого производится опыт короткого замыкания.

Потери в железе труднее поддаются точному предварительному подсчету, чем потери в меди. Железные листы имеют значительно менее установленные особенности, чем медь обмотки. Кроме того следует учесть еще и добавочные потери, вызываемые обработкой железных листов.

Если для потерь в меди оказался достаточным допуск в 10%, то для потерь в железе и 15% еле хватит. Неожиданности, к сожалению, всегда возможны. Было бы нецелесообразно еще больше ограничивать конструктора. Он в таких случаях вынужден сам выработать для себя допуск, что всегда удорожает конструкцию.

И измерения потерь холостого хода не так просты, как кажутся. Собственно говоря, нет непосредственного ответа на вопрос о том, при каком напряжении должен производиться опыт. Конечно при полном рабочем напряжении. Однако, что представляет собою рабочее напряжение? То ли напряжение, которое мы измеряем у зажимов вторичной обмотки при холостом ходе, или же напряжение при полной нагрузке? Эти напряжения отличаются друг от друга на несколько процентов, а в потерях эта разница удваивается.

Конструктор исходит из полной нагрузки. Первичное падение напряжения уменьшает в этом случае индукцию, а тем самым и потери в железе. Конструктор будет стоять за то, чтобы при опыте холостого хода ко вторичной обмотке было приложено напряжение нагруженной вторичной сети.

НТБ
ДНУЗТ

Эксплуатационный инженер исходит из потерь действительной холостой работы трансформатора. Он не пожелает принять во внимание падение напряжения. На этой почве между ним и конструктором могут произойти недоразумения, которые можно избежать, договорившись уже при заказе трансформатора.

В нормах безопасности *VDE* указывается, что под потерями холостого хода следует понимать потери при номинальном напряжении, номинальной частоте и открытой вторичной обмотке. Этим самым вопрос решается к невыгоде конструктора, который все же может указать на то, что трансформатор под нагрузкой будет иметь меньшие потери в железе.

При гарантированном токе холостого хода следовало бы ожидать значительного допуска, так как чисто магнитные свойства железных листов особенно ненадежны. Возможны отклонения до 30%.

До тех пор пока конструктор принимает кривую намагничивания постоянного тока, он этим самым молчаливо подтверждает большой допуск. Ему, собственно, большой допуск и не нужен. У намагничивающего тока имеются высшие гармонические составляющие, а потому эффективное значение меньше, чем можно было ожидать при максимальном значении намагничивающей кривой.

Именно опыт холостого хода оказался бы чрезвычайно затруднительным, тогда как в действительности мы видим, что он протекает совершенно удовлетворительно. Нельзя, следовательно, ограничиться поверхностными наблюдениями. Необходимо точнее рассмотреть вопрос. Это обязательно как для эксплуатационного инженера, так и для конструктора.

105. ДРУГИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОПЫТЫ.

Во время эксплуатации испытания на перенапряжения не нужны, так как об этом заботится сама эксплуатация. При приемке же такие испытания предписываются и проводятся в строгом соответствии с нормами безопасности *VDE*.

Последние нормы возникли под давлением эксплуатационного инженера, потерявшего всякую веру в возможность защиты от перенапряжения и возлагавшего, поэтому, большие надежды на конструктора. Эти нормы молчаливо утверждают, что применение защитной дроссельной катушки в крайнем случае желательно, но отнюдь не обязательно.

После мировой войны нормы стали значительно более жесткими. В годы войны выполнялись конструкции из суррогатных материалов. Такие конструкции очень скоро выбывали из строя. Возражения конструктора тонули в море жалоб.

В настоящее время мы строим дорогие трансформаторы, но не умеем обеспечить для них удовлетворительной защиты от перенапряжения. Чем меньше трансформатор, тем больше подвергается он опасности от перенапряжений. Употребление большого количества изоляционного материала в таких случаях мало помогает.

Конструктор должен открыто признать, что при малых, а также при средних мощностях он сам не в состоянии обеспечить трансформатор от перенапряжения. Испытания на волны с крутым фронтом он рассматривает как навязанную ему неприятную необходимость. Он знает, что при этом испытании явных повреждений не будет, но зато появятся незаметные уколы от витка к витку.

НТБ
ДНУЗТ

Катушки хорошо оплетены, а потому эксплуатационному инженеру не видны повреждения, вызванные испытанием на волну с крутым фронтом. Однако здесь должно сказать свое слово учение об эксплуатации. Оно должно указать этому испытанию его место.

Само собой разумеется, что у каждого трансформатора должна быть увеличена изоляция витков и слоев у входных катушек. Несомненно также и то, что эти входные витки и катушки не должны подвергаться непосредственному воздействию волн перенапряжения. Защита от перенапряжения является самостоятельной частью установки, также как и защита от чрезмерных токов. Защита от перенапряжения должна осуществляться перед трансформатором, а не в самом трансформаторе.

Таким образом, если требуется выполнить испытание на напряжение по существующим пока нормам, то достаточно сделать это лишь один раз при приемке. Эксплуатационные инженеры, знакомые с вопросом, от испытания на волну с крутым фронтом, пожалуй, откажутся.

Задача учения об эксплуатации — определить действительное место, занимаемое защитой от перенапряжения.

Испытание на нагревание, как указано в параграфе 90, следует повторить тотчас же после установки трансформатора в будке для того, чтобы проверить ее вентиляцию. Нигде так не удобно осуществить опыт нагревания, как в трансформаторной будке, под действительной нагрузкой.

Трудности опыта короткого замыкания всплывают полностью и при испытании на нагрев, которое должно установить температурное напряжение между маслом и медью. И в данном случае остается лишь один выход — произвести ряд быстро следующих друг за другом опытов с измерением сопротивления, что, конечно, труднее, чем это кажется.

Каждое испытание на нагревание можно выполнить значительно быстрее, если вызвать перегрузку холодного трансформатора. Его температура в этом случае будет быстро возрастать. Конечно следует следить за своевременным переходом к нормальной нагрузке, в противном случае могут возникнуть недопустимые перегревы. После этого необходимо вести некоторое время наблюдения за нормальной температурой. Лишь после установления окончательного превышения температуры испытание на нагревание можно считать законченным.

Чрезвычайно важным испытанием является испытание масла на пробивание. Его следует регулярно время от времени повторять, что даст возможность своевременно обратить внимание на нежелательные изменения в составе масла.

Масло требует ухода. Недопустимо в продолжение многих лет предоставить трансформатор самому себе. Наступает все же, наконец, момент, когда масло следует сменить. К сожалению, очень часто масло сменяется лишь после пробивания или замыкания витков, что, конечно, обходится дороже.

Мощные трансформаторы в особенности не должны подвергаться опасности быть поврежденными из-за порчи масла, так как такое повреждение обошлось бы слишком дорого. Поэтому мощные трансформаторы очень часто соединяются специальными трубами с центрофугой, очищающей масло и во время эксплуатации.

Известно, что всякая очистка масла представляет собой кропотливую работу; именно поэтому она выполняется лишь в экстренных

случаях. Гораздо лучше для больших установок организовывать специальное обслуживание масла, которое должно заключаться в выполнении всех необходимых для масла измерений, смены и очистки его.

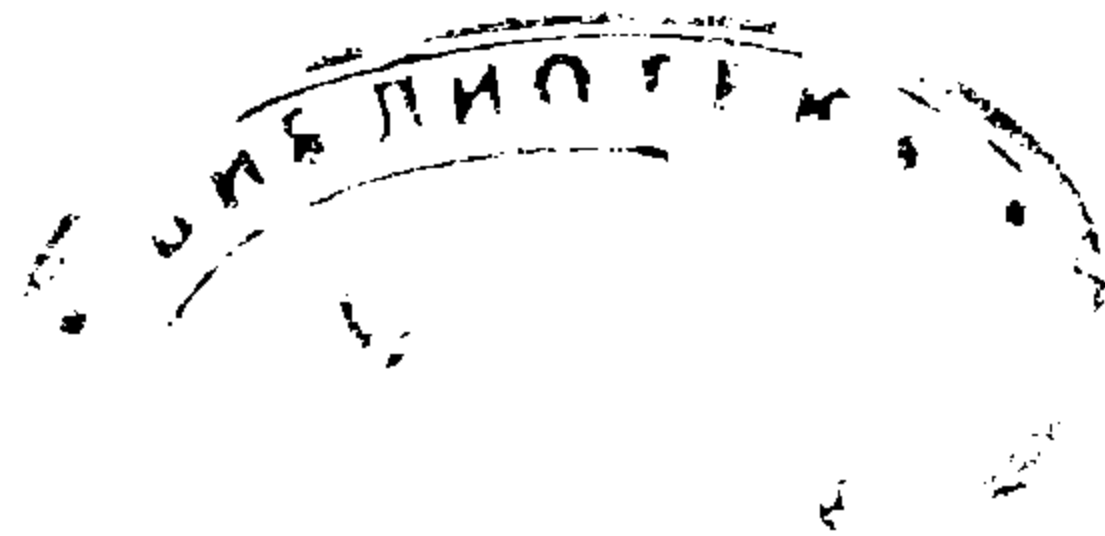
Очень многие пробивания приписываются вине конструктора или аппаратов защиты от перенапряжения, тогда как действительной причиной является негодность масла. Эксплуатационный инженер согласен с тем, что масло после повреждения оказывается негодным. Однако он склонен предполагать, что масло испортилось именно в результате повреждения.

К сожалению дело обстоит так, что именно в трансформаторостроении после аварии трудно бывает указать действительную ее причину. Слишком много опасностей угрожает трансформатору. Трудно поэтому ожидать каких либо быстрых улучшений. Каждый пытается сложить с себя ответственность.

Учение об эксплуатации может в значительной мере помочь. Оно разъясняет вопрос эксплуатационному инженеру. К счастью, каждое повреждение трансформатора вызывает расходы по ремонту. Именно эти расходы наводят эксплуатационного инженера на размышления и вынуждают его следовать советам теории.

Это—единственный путь к устранению несправедливости по отношению к конструктору. Даже самые жесткие нормы бесполезны. Каждый должен выполнять свой долг — как тот, кто строит трансформатор, так и тот, кто вводит его в эксплуатацию.

Споры между эксплуатационным инженером и конструктором бесполезны до тех пор, пока они не нашли общего языка. Правда, некоторое равновесие вносит посредствующая между ними торгующая организация. Однако решение спорного случая, выраженное в рублях и копейках, не является решением вопроса. Необходимо для каждого случая в отдельности каждый раз искать заново такое решение. Остается все же неприятное сознание технического несовершенства наших установок.



ОГЛАВЛЕНИЕ.

	Стр.
Введение.	
1. Эксплуатационная проблема. Обзор главной проблемы учения об эксплуатации	4
I. Цена и коэффициент полезного действия трансформатора.	
2. Цена трансформатора	7
3. Зависимость цены от мощности. Законы роста	9
4. Числовые примеры	11
5. Зависимость цены от потерь энергии в железе и меди	12
6. Неестественный коэффициент полезного действия	14
7. Цены трансформации. Суждение о предложениях трансформаторов	16
8. Прогресс в трансформаторостроении. Прямая усовершенствования	19
9. Трудности усовершенствования	22
10. Чрезмерное использование строительного материала	24
11. Типы	26
12. Проблема цены и коэффициента полезного действия силового трансформатора	28
II. Экономичность осветительного трансформатора.	
13. Эксплуатационная проблема осветительного трансформатора	31
14. Проблема цены и коэффициента полезного действия осветительного трансформатора	33
15. Способность осветительного трансформатора к перегрузке. Сухой трансформатор	35
16. Способность трансформатора с масляным охлаждением к перегрузке	38
17. Распределение потерь	41
18. Экономичность осветительного трансформатора	45
III. Ток холостого хода.	
19. Значение тока холостого хода	49
20. Ток холостого хода и рабочее напряжение	50
21. Зависимость тока холостого хода от потерь в железе	52
22. Ток холостого хода и мощность	54
23. Воздушный зазор между ярмом и керном. Нормированные токи холостого хода	56
24. Маломощные трансформаторы. Ярмо с увеличенным сечением	58
IV. Соединения.	
25. Соединения у трехфазных трансформаторов	61
26. Электрическое и магнитное равновесие	62
27. Соединение „звезда-звезда“ в осветительном деле	64
28. Соединение „треугольник-звезда“	71
29. Соединение в „зигзаг“	74
30. Соединение в звезду с нулевым проводом	86
31. V-образное соединение	88
32. Сравнение осветительных соединений	95
33. Американские соединения	96
V. Чрезмерные токи.	
34. Защита от чрезмерных токов и ее проблема	98
35. Выдержка времени автомата	100
36. Выдержка времени и ток короткого замыкания	102
37. Выдержка времени и напряжение короткого замыкания	103
38. Зависимое время выключения. Замыкание витков	105
39. Длительное и внезапное короткое замыкание	107
40. Внезапное короткое замыкание и время выключения	109
41. Механические усилия от тока короткого замыкания	112
42. Ограничение механических усилий от токов короткого замыкания	115
43. Механическое усилие при внезапном коротком замыкании	117
44. Механическое усилие от тока и деформация обмотки	119
45. Деформация обмотки и безопасность короткого замыкания	123
46. Действительная опасность от механического усилия	126
47. Однофазное короткое замыкание	128
48. Двухфазное короткое замыкание	130
49. Сила тока при включении	132
50. Расчет тока включения	135
51. Ограничение тока включения	142

НТБ
ДНУЗТ

	Стр.
52. Ток выключения автоматического выключателя .	143
53. Потребность в измерителях тока на трансформаторных станциях	144
54. Плавкие предохранители	146

VI. Перенапряжения.

55. Проблема перенапряжений	148
56. Блуждающие волны и их возникновение	149
57. Нарушения поля земли. Заземлители	151
58. Искровой разрядник	152
59. Дуга искрового разрядника	157
60. Выключения тока	160
61. Ограничение перенапряжений при выключениях тока короткого замыкания	162
62. Перенапряжение при выключении. Волна при включении	164
63. Сглаживание фронта входящей волны. Защитная дроссельная катушка	167
64. Выбор защитной дроссельной катушки	169
65. Индуктивность дроссельной катушки в зависимости от мощности и от напряжения	174
66. Проверка определения необходимой защитной индуктивности	177
67. Защитная дроссельная катушка и защитный конденсатор	181
68. Сглаживание конца блуждающей волны посредством защитной дроссельной катушки	184
69. Размеры дроссельной катушки с точки зрения ее емкости	185
70. Недостатки защитной дроссельной катушки. Входной колебательный контур трансформатора. Затухание входного колебательного контура	192
71. Дроссельная катушка с шунтирующими сопротивлениями и без них	197
72. Последовательное включение шунтированной и нешунтированной дроссельных катушек с магнитной связью	202
73. Практическая применимость последовательного соединения двух сопряженных дроссельных катушек	205
74. Последовательное включение двух дросселей, независимых друг от друга в магнитном отношении	206
75. Двойная дроссельная катушка с железным сердечником	208
76. Обзор проблемы перенапряжения. Заземление нулевой точки	211
77. Заземляющая дроссельная катушка	213
78. Действие заземляющей катушки	216

VII. Охлаждение.

79. Проблема охлаждения	219
80. Отведение тепла и явления, связанные с ним	220
81. Внутренний тепловой поток	222
82. Излучение тепла	224
83. Отведение тепла движущимися охлаждающими жидкостями	225
84. Значение хорошего вентилирования трансформаторной камеры .	227
85. Вентилирующий воздушный поток в трансформаторной камере	228
86. Расчет трансформаторной камеры	230
87. Мощные трансформаторы с естественным масляным охлаждением	232
88. Мощные трансформаторы с водяным охлаждением	234
89. Внутреннее и наружное водяное охлаждение	235
90. Наблюдение за охлаждением	237
91. Прерывистая работа трансформаторов	239

VIII. Разные эксплуатационные проблемы.

92. Проблема параллельного включения трансформаторов	242
93. Допустимая и излишняя параллельная работа	244
94. Вблизи расположенные, параллельно работающие трансформаторы	245
95. Первый предельный случай для параллельной работы рядом расположенных трансформаторов	247
96. Второй предельный случай рядом расположенных трансформаторов	250
97. Улучшение параллельной работы дроссельными катушками	252
98. Включение на параллельную работу	254
99. Проблема ответвления	255
100. Конструктивное оформление ответвлений	258
101. Консерватор для масла	259
102. Размеры консерватора для масла	261
103. Надзор при эксплуатации и измерения	263
104. Точность измерения при опытах холостого хода и короткого замыкания	265
105. Другие эксплуатационные опыты	268

НТБ
ДНУЗТ

Государственное Техническое Издательство.

Москва, Центр, Ильинка, Юшков пер., д. 4. Тел. 4-32-90.

ПРОДАЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ КНИГИ:

Металлическая промышленность.

Гемпе Э., инж. Конструирование приспособлений и их деталей. Пер. с нем. под ред. и в обработке инж.-мех. С. М. Данцигер. М. 1929 г. 108 стр. 727 рис. Ц. 1 р. 50 к.

Гессе Г. Ю., инж. Технология металлов. Чугун, железо, сталь и их свойства. Обработка изделий инструментами. Кузнечное дело. Чугуно-литейное дело. Перераб. изд. под ред. с исправл. и дополн. проф. А. В. Панкина и инж. А. Ф. Журавского. М. 1927 г. 240 стр. и отдельн. атлас на 71 стр. 638 рис. Ц. 3 р. 30 к., в двух папках 3 р. 95 к.

Гиплер В., инж. Токарное дело и его инструменты в современном производстве. Б. 1922 г. 379 стр. 319 рис. Ц. 4 р. 75 к.

Граменц К., инж. Пригонки, посадки и их допуски. Перевод с немецкого, под ред. и вступительн. статьей проф. А. В. Панкина. М. 1927 г. 168 стр. 118 рис. и 32 табл. Ц. 2 р. 50 к.

Грейнер В., инж. Трансмиссии. Конструкция, расчет, установка и содержание их. Пер. с нем. В. М. Абрамова. М. 1928 г. 148 стр. 209 рис. и 5 черт. Ц. 2 р. 25 к.

Гюлле Фр. В., проф. Станки. Т. I. Устройство станков для обработки металлов. Пер. с нем. инж. Л. А. Боровича. М. 1929 г. Изд. 2-е. 136 стр. 360 рис. Ц. 2 р. 50 к.

Гюлле Фр. В., проф. Станки. Т. II. Экономическое использование станков и инструментов для обработки металлов. Пер. с нем. инж.-техн. Л. А. Боровича. М. 1928 г. Изд. 2-е. 128 стр. 395 рис. Ц. 2 р.

Гюльднер Г. Справочник механика. Для монтеров, техников, студентов и инженеров. Перев. под редакц. и в обработке проф. А. И. Сидорова. М. 1926 г. 748 стр. 434 рис. Ц. 6 р. 50 к. в перепл.

Кроненберг М., инж. Основы теории резания. Введение в теорию обработки металлов резанием и применение ее на практике. Пер. с нем. под ред. инж. Г. Ф. Орендлихера. М. 1929 г. 184 стр. 171 рис. Ц. 2 р. 90 к.

Кузьмин К. И., инж. Детали машин, их расчет и конструирование. Руководство и справочная книга для заводских практиков и учащихся в техническ. учебн. заведениях. М. 1928 г. 160 стр. 328 рис. Ц. 2 р. 65 к. Научно-Методолог. Комитет Наркомпроса УССР допущено в качестве пособия для профтехнич. школ и школ ФЗУ.

Кюн В. О предельных допусках в машиностроении. Перев. проф. А. Д. Гатцука. Б. 1923 г. 246 стр. 47 рис. Ц. 3 р. 50 к.

Леман А. А., инж. Металловедение для производственника. М. 1929 г. 132 стр. 102 рис. Ц. 1 р. 60 к.

Прегер Э., инж. Обработка металлов. Ч. I. Металлы и сплавы. Литейное дело. Пособие для техников, мастеров и техн. учебн. завед. Пер. с нем. инж. Г. А. Ландсберг. М. 1927 г. 148 рис. Ц. 1 р. 10 к.

Прегер Э., инж. Обработка металлов. Ч. II. Ковка и сварка. Термическая обработка. Пер. с нем. В. М. Абрамова. М. 1928 г. 168 стр. 275 рис. Ц. 2 р. 15 к.

Прегер Э., инж. Обработка металлов. Ч. III. Инструменты и станки. Пер. с нем. под ред. и в обработке инж. С. М. Данцигера. М. 1929 г. 298 стр. 677 рис. Ц. 3 р. 60 к., в папке 4 р. 05 к.

Ридлер А., проф. Лабораторное испытание автомобиля. Под ред. проф. Н. Р. Бриллинга. М. 1924 г. 48 стр. 44 рис. Ц. 70 к.

Сидоров А. И., проф. Описательный курс машин. (Элементы машиноведения). М. 1925 г. Изд. 5-е. 158 стр. 123 рис. Ц. 1 р. 75 к.

Сидоров А. И., проф. Задачи по деталям машин (со включением задач на перевод формул в другие меры). М. 1928 г. Изд. 2-е, значит. дополн. 128 стр. 396 рис. Ц. 2 р. 25 к.

Шимпке П., инж. и **Горн Г.**, инж. Автогенная сварка и резка. Практическое руководство для инженеров, техников и мастеров. Пер. с нем. инж. Т. Л. Гинзбурга. М. 1927 г. 120 стр. 111 рис. Ц. 1 р. 75 к.

Шлезингер Г., инж. Руководство для испытания станков по металлу. Пер. с нем. инж. М. Векслера. М. 1929 г. 48 стр. 32 рис. Ц. 1 р. 20 к.

Общие и общенаучные издания.

Абрамов Н. М., проф. Технические вычисления. Главнейшие методы и приемы технических вычислений и элементарные основы их теории. Руководство для студентов, техников и инженеров. М. 1928 г. 228 стр. 158 рис. Ц. 3 р. 90 к.

Авиация и воздухоплавание. Аэростаты, дирижабли, эропланы. Пер. с франц. инж. Т. Л. Гинзбурга под ред. и дополн. Н. Г. Стабровского. М. 1929 г. 92 стр. 165 рис. Ц. 1 р. 25 к.

Витошинский Ч., инж. Водяные двигатели и насосы. Теория, конструкция, расчет. Пер. под ред. проф. В. Э. Классен. М. 1928 г. 146 стр. 185 рис. Ц. 2 р.

Данже Р., инж. Съёмка городов и поселков. Пособие для межевых инженер., землемер., техников, учебн. завед. и коммунальн. хозяйств. Пер. с франц. под ред. П. М. Орлова. С приложен. инструкц., законополож. и расценок по городским и поселковым съёмкам в СССР. М. 1928 г. 224 стр. 73 рис. Ц. 3 р. 50 к.

НТБ
ДНУЗТ

Дроздов Ф. В., инж. Счетные машины и производство вычислений механическим путем. М. 1926 г. 72 стр. 64 рис. Ц. 1 р. 40 к.

Дуббель Г., проф. Справочник по математике для инженеров, техников, студентов и преподавателей математики. Пер. Н. П. Тарасова под ред. и в перераб. проф. Н. Н. Лузина. М. 1927 г. 280 стр. 213 рис. Ц. 2 р. 85 к., в папке 3 р. 20 к.

Дуббель Г., проф. Справочная книга по машиностроению. Пер. с 3-го и 4-го нем. изд. под общей ред. Моск. Механич. Института им. М. В. Ломоносова. Т. I. М. 1929 г. 1032 стр. 1206 рис. Ц. в папке 10 р. 50 к., в коленк. перепл. 10 р. 70 к.

Жуковский Н. Е., проф. Теоретическая механика. Ч. I (статика и графостатика). М. 1929 г. Изд. 10-е. 160 стр. 193 рис. Ц. 1 р. 80 к.

Жуковский Н. Е., проф. Теоретическая механика. Ч. II (кинематика и динамика). М. 1927 г. Изд. 8-е. 176 стр. 159 рис. Ц. 2 р. 45 к.

Жуковский Н. Е., проф. Теоретическая механика. Ч. III (дополнительные статьи). М. 1925 г. 44 стр. 49 рис. Ц. 60 к.

Жуковский Н. Е., проф. Теоретические основы воздухоплавания. Под ред. инж.-мех. В. П. Ветчинкина и Н. Г. Ченцова. М. 1925 г. Изд. 2-е. 306 стр. 354 рис. Ц. 4 р. 65 к.

Зернов В. Д., проф. Конспект лекций по физике. Ч. I. Механический отдел физики. Молекулярная физика. Тепловые явления. М. 1926 г. 104 стр. 133 рис. Госуд. Учен. допущено в качестве руководства для ВТУЗ'ов. Ц. 1 р. 75 к.

Зернов В. Д., проф. Конспект лекций по физике. Ч. II. Электричество. Магнетизм. Радиоактивность. М. 1927 г. 108 стр. 173 рис. Госуд. Учен. Сов. допущено в качестве пособия для ВТУЗ'ов. Ц. 1 р. 75 к.

Зернов В. Д., проф. Конспект лекций по физике. Ч. III. Звук и свет. М. 1928 г. 68 стр. 114 рис. Госуд. Учен. Сов. допущено в качестве пособия для ВТУЗ'ов. Ц. 1 р. 10 к.

Кванц Л., инж. Современные центробежные насосы. Конструкция. Расчет. Уход. Руководство для конструкторов и студентов. Перев. с немецк. с дополн. инж.-мех. С. Д. Данцигер. М. 1928 г. 80 стр. 114 рис. Ц. 1 р. 25 к.

Киршке А., инж. Начертательная геометрия в приложении к машиностроению. Руководство для преподават. в технич. училищ., для самообучения и для пользования на практике. Пер. с нем. инж. А. Ф. Момма. М. 1925 г. 168 стр. 385 рис. Ц. 2 р. 50 к.

Левенсон Л. Б., проф. Общая теория машин. Статика и динамика машин. М. 1923 г. 192 стр. 140 рис. Ц. 2 р.

Лобач-Жученко Б. М., проф. Краткий описательный курс двигателей внутреннего сгорания. Для ТУЗ'ов, техникумов, профтехнических курсов и для самообразования. М. 1927 г. Изд. 2-е. 64 стр. 115 рис. Ц. 90 к.

Ляудиен К., проф. Руководство по механике для техников, конструкторов и студентов. Пер. инж. Г. А. Ландсберга, под ред. проф. А. И. Яшнова. М. 1926 г. 136 стр. 229 рис. Ц. 2 р. 40 к.

Мизес Р., д-р, проф. Основы авиации. Теория и расчет аэропланов в общедоступном изложении. Пер. с нем. под ред. проф. П. П. Соколова. М. 1926 г. 136 стр. 113 рис. Ц. 1 р.

Мюнцингер Ф., проф. Современные крупные паровые котлы. Обзор новейших достижений. Сост. по Мюнцингеру инж.-техн. Л. А. Борович. М. 1927 г. 160 стр. 219 рис. Ц. 2 р. 40 к.

Павлов Б. П., инж. Основы строительной механики плоских систем. Статически определимые системы. Госуд. Учен. Сов. допущено в качестве пособия для ВТУЗ'ов. М. 1928 г. 96 стр. 70 рис. Ц. 1 р. 50 к.

Павлов Б. П., инж. Основы строительной механики плоских систем. Статически неопределимые системы. Гос. Учен. Сов. допущено в качестве пособия для ВТУЗ'ов. М. 1929 г. 144 стр. 96 рис. Ц. 1 р. 75 к.

Павлов Н. Н., инж. Производство технических вычислений. Практические способы, средства и приборы. Пособие для инженеров, техников, архитекторов, землемеров, строителей и студентов. М. 1927 г. Изд. 2-е, дополнен. 132 стр. 68 рис. Ц. 1 р. 70 к.

Пёшль Т., проф. Курс гидравлики. Для инженерных и высш. технич. учебн. зав. Пер. с немецк. под ред. проф. В. Э. Классен. М. 1927 г. 132 стр. 148 рис. Ц. 1 р. 65 к.

Подольский И. С., проф. Строительная механика. Ч. I. Сопротивление материалов. М. 1924 г. 1035 стр. 672 рис. Ц. 9 р.

Польгаузен А., инж. Поршневые паровые машины. Учебник и справочная книга для учащихся, техников и инженеров. Пер. с нем. инж.-техн. Л. А. Боровича. М. 1927 г. Изд. 3-е, испр. и дополн. 436 стр. 440 рис. и атлас на 23 табл. Ц. с атласом 7 р. 50 к.

Ридль К., инж. Новейшие быстроходные автомобильные моторы. Конструкция, расчет и материалы. Перев. с нем. и обработка А. и Я. Э. Малоховских, под редакц. и с предисл. проф. Н. Р. Бриллинга. М. 1927 г. 72 стр. 50 рис. Ц. 1 р. 25 к.

Соколов П. П., проф. Номография. Теория и практика построения график для быстрых технических расчетов. Пособие для инженеров, техников и студентов. М. 1925 г. 88 стр. 115 черт. и атлас. Ц. 1 р. 70 к.

Сушков В. В., проф. Техническая термодинамика. Теория тепловых двигателей. Руководство для высш. технич. учебн. завед. М. 1926 г. 210 стр. 169 рис. Ц. 3 р. 10 к.

Флоров С. Ф., инж. Тепловые расчеты топок и печей. Сборник упражнений (с подроб. решениями). Пособие для учащихся в высших и средних технических школах. С предисл. проф. А. И. Сидорова. М. 1928 г. Изд. 2-е. 96 стр. 13 рис. Ц. 1 р. 20 к.

Фэппль О., проф., **Штромбек Г.**, инж. и **Эберман Л.**, проф. Быстроходные двигатели Дизеля. Описание, испытания, расчет, конструкция и работа. Пер. с нем. инж.-техн. Л. А. Боровича. М. 1927 г. 164 стр. 148 рис. 8 табл. Ц. 2 р.

НТБ
ДНУЗТ

Худяков П. К., засл. проф. Как рассчитывают на крепость части машин и сооружений. Курс сопротивления материалов без высшей математики, с решенными задачами из области машиностроения, инженерного дела и жилищно-строительной практики. Часть I и II. М. 1927 г. Изд. 2-е. 408 стр. 256 рис. Ц. 5 р. 60 к.

Худяков П. К., засл. проф. Сопротивление материалов. Курс, читан. в высш. Моск. Технич. Училище. Курс в двух частях и задачник. М. 1928 г. Изд. 5-е с дополн. 430 стр. 325 рис. Ц. 5 р. 90 к., в папке 6 р. 35 к., в кол. перепл. 6 р. 65 к.

Худяков П. К., засл. проф. Задачник по сопротивлению материалов. (Из практики русского строительства). М. 1925 г. 212 стр. 145 рис. Ц. 3 р.

Хютте—производственный. Справочник по технике производства, организации производственных предприятий и вопросам труда для инженеров и техников-производственников и красных директоров. Перераб. перевод с немецк. под общей редакц. Моск. Механ. Инстит. им. М. В. Ломоносова. М. 1927 г. 1360 стр. 1132 рис. Ц. в пер. 12 р.

Хютте. Справочная книга для инженеров, архитектор., механиков и студентов. Т. I. Изд. 12-е. Пер. с 25 нем. изд. под общей ред. Моск. Механич. Института им. М. В. Ломоносова. М. 1929 г. XII+1194 стр. 772 рис. Ц. в кол. перепл. 13 р. 35 к.

Хютте. Справочная книга для инженеров, архитекторов, механиков и студентов. Том II. М. 1929 г. 1460 стр. 1874 рис. Ц. в кол. перепл. 13 р. 35 к.

Хютте. Справочная книга для инженеров, архитекторов, механиков и студентов. Томы III и IV. (Печатаются и в ближайшее время поступят в продажу).

Цекометр. Урочное положение для строительных работ в метрич. и русских мерах (офиц. изд.) в переплете. М. 1929 г. Изд. 2-е, исправл. XXIV+336 стр. Ц. 4 р. 50 к.

М. М. К. Таблицы для перевода русских мер в метрические и обратно. М. 1929 г. Изд. 10-е. 64 стр. Ц. 30 к.

Точные таблицы для перевода метрических и русских мер. М. 1929 г. XVI+104 стр. Изд. официальное. Ц. в папке 2 р. 70 к.

О'Рурк, инж. Таблицы умножения (карманный справочник). Незаменимое пособие в отношении быстроты вычислений при технич., коммерческих и валютных расчетах. М. 1929 г. Изд. 11-е. 514 стр. Ц. в папке 2 р. 50 к., в кол. пер. 3 р.

Рошефор Н. И. Иллюстрированное урочное положение на общестроительные работы. Пособие при составлении и проверке смет, проектиров. и исполн. работ. Перечислено на метрич. меры инж. В. В. Рабчинским. С исправл., дополнен., в обработке и под общей ред. проф. С. М. Герольского. Ч. I. М. 1929 г. Изд. 12-е. XXII+320 стр. 534 рис. Ц. в папке 5 р. 50 к., в кол. перепл. 5 р. 75 к.

Его же. Иллюстрированное урочное положение на общестроительные работы. Пособие при составлении и проверке смет, проектировании и исправлении работ. Перечислено на метрич. меры. С исправл., дополн., в обработке и под общ. ред. проф. С. М. Герольского. Часть II. М. 1929 г. 356 стр. 371 рис. Ц. 6 р. в папке.

То же. Часть III—дополнительная к Иллюстрированному урочному положению Рошефора Н. И. Специальные работы: отопление, вентиляция, водопровод, канализация и электромонтаж. Пособие при составлении и проверке смет, проектировании и исполнении работ. Изд. перечислено на метрич. меры. С дополн. и под общей редакц. проф. С. М. Герольского. М. 1929 г. 368 стр. 349 рис. Ц. 6 р. 50 к. в папке.

ТЕХНИЧЕСКАЯ КНИГА

(свыше 15.000 названий)

доставляется **КНИЖПОЧТОЙ** при книжном магазине **ГОСТЕХИЗДАТА** № 2 быстро и аккуратно.

При заказе свыше 5 руб. пересылка за счет Издательства.

Обращаться по адресу: Москва, Петровка, 15, тел. 5-96-72.

Каталог высылается по требованию.

„ГОСТЕХИЗДАТ“

ПРАВЛЕНИЕ: Москва, Центр, Ильинка, Юшков пер., 4. Тел. 4-32-90.

Редакцион. отд.: „ „ „ „ „ „ 5-02-92.

Техническ. „ „ „ „ „ „ 2-56-34.

Торговый „ „ „ „ „ „ 5-72-12.

Бухгалтерия: „ „ „ „ „ „ 3-13-81.

Склад: „ „ „ „ „ „ 4-91-28.

КНИЖНЫЕ МАГАЗИНЫ:

МОСКВА.

Тверская, 25, тел. 5-58-47.

Петровка, 15, тел. 1-67-05.

Разгуляй, 38/2, тел. 1-95-51.

Мясницкая, 1-б, тел. 4-39-09.

Арбат, 6, тел. 5-44-69.

Волхонка, 6, тел. 2-70-69.

ЛЕНИНГРАД.

25, пр. Володарского, 53-а, тел. 161-75.

25, пр. Володарского, 59 (уг. пр. 25 Октября), тел. 498-83.

Центр, пр. 25 Октября, 24, тел. 169-37.

ХАРЬКОВ.

Улица 1-го Мая, 8, тел. 1-01.

КИЕВ.

Ул. Воровского, 35, тел. 37-08.

Н.-НОВГОРОД.

Ул. Свердлова, 19, тел. 22-14

СВЕРДЛОВСК.

Улица Ив. Малышева, 58-а, тел. 14-38.

Ул. Вайнера, 14.

ТИФЛИС.

Просп. Руставелли, 23.

НТБ
ДНУСТ

Сканировала Петренко Е.А.

НТБ
ДНУЗТ