

Проф. В. А. ШЕВАЛИН

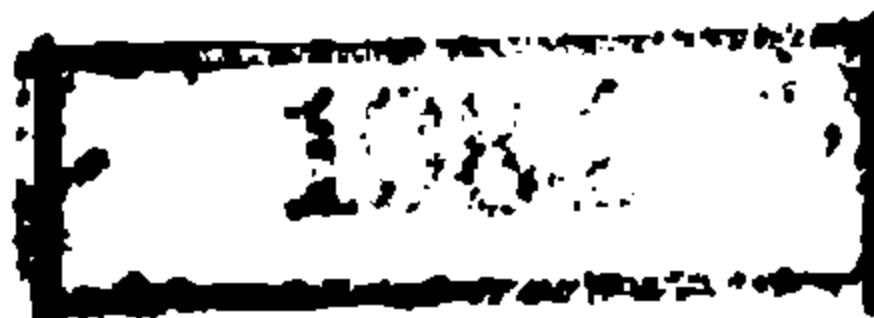
**ВЫБОР
ТЯГОВОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ
МОСКВА 1934
ИКС

НЕ
УДУН
(ДИТ)

проф. В. А. ШЕВАЛИН

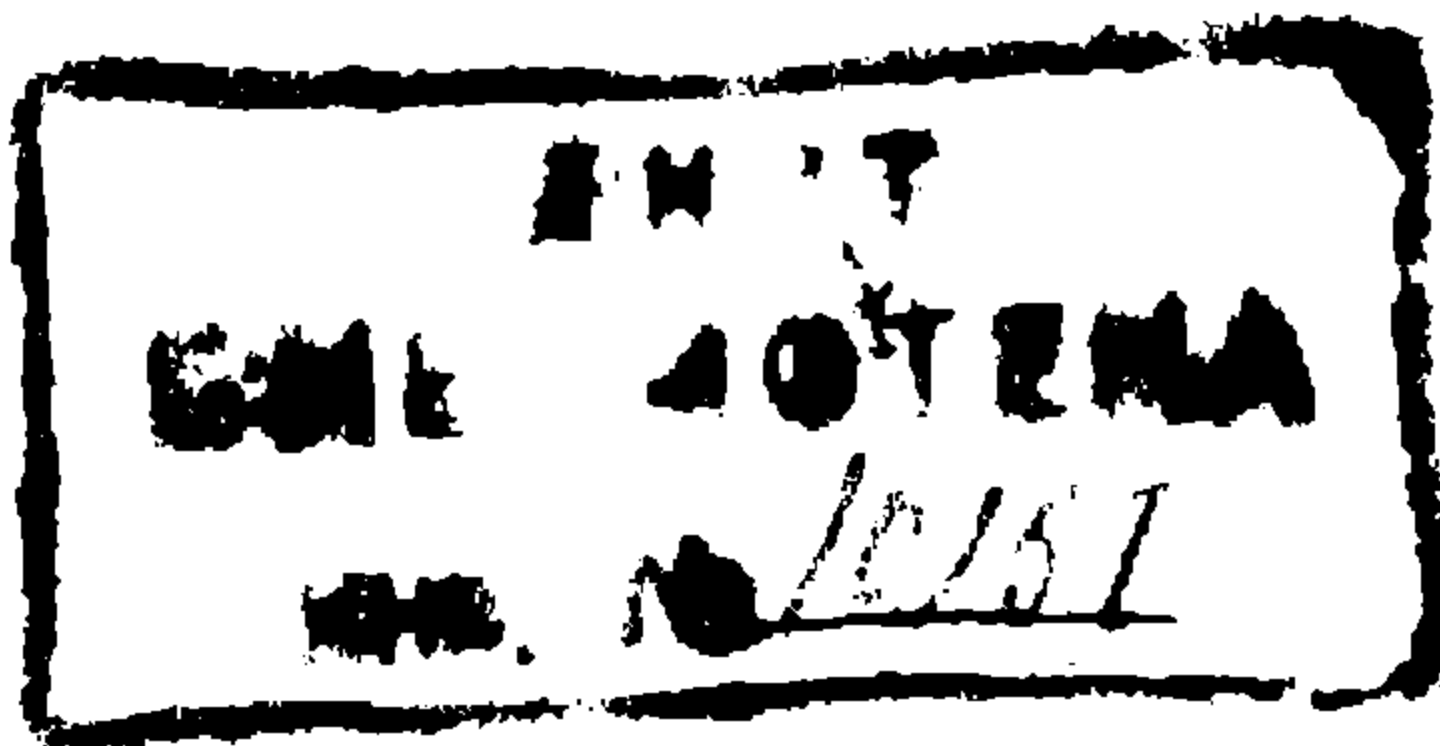
ВЫБОР



ТЯГОВОГО

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

ОДОВРЕНО К ИЗДАНИЮ КОМИТЕТОМ
ПО ВЫСШЕМУ ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБРАЗОВАНИЮ ПРИ ЦИК СССР
В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ
ДЛЯ ВТУЗОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА



1934

НКПС ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ МОСКВА

НЕ
УДУНТ
(ДИТ)

Книга подробно излагает один из самых важных вопросов тягового расчета, вопрос о выборе тягового электродвигателя. Она обосновывает методику выбора рационального режима движения поезда, выбор пускового тока и влияние на выбор двигателя различных скоростей движения.

Книга одобрена Комитетом по высшему техническому образованию при ЦИК СССР в качестве учебного пособия для вузов жел.-дор. транспорта; она служит также и пособием для лиц, занимающихся проектированием электрических жел. дорог.



**НБ
УДУНТ
(ДИПТ)**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из основных вопросов проектирования электрической жел. дороги является вопрос выбора тягового электродвигателя для электровозов и моторных вагонов. Как известно, характеристики двигателя в конечном счете отражаются почти на всем оборудовании электрической жел. дороги, на технической ее эксплуатации и на экономических ее результатах. Тяговые характеристики двигателя определяют режим движения поездов, расход электрической энергии, нагрузки контактной сети и тяговых подстанций. Несмотря на столь большую важность вопроса, в имеющихся у нас руководствах по проектированию дорог с электрической тягой и тяговым расчетам ему не уделяется надлежащего внимания. Предлагаемая книга имеет целью в некоторой мере восполнить этот пробел. При составлении ее автор предполагал знакомство читателя с тяговыми расчетами электрических жел. дорог.

Книга уделяет преимущественное внимание выбору двигателя для дорог с короткими перегонами (пригородных), так как эта задача представляет большие трудности, чем выбор двигателя для поездов, идущих по длинным перегонам. Многогранность вопроса не позволила изложить его с исчерпывающей полнотой, и автор коснулся только главнейших проблем, встречающихся на практике.

Имея в виду сделать книгу доступной для более широкого круга читателей, для проверки двигателя на нагревание применялись простейшие приближенные приемы. Рассмотрению были подвергнуты только двигатели постоянного тока.

Все чертежи для изготовления клише выполнены В. М. Лысенко. Автор приносит ему свою глубокую благодарность.

В. А. Шевалин

НБ
УДУНТ
(ДІІТ)

ГЛАВА I

Выбор рационального режима движения поезда при заданном электромеханическом его оборудовании

В дальнейшем будем понимать под перегонем участок пути между двумя смежными остановочными пунктами.

Будем называть время пробега перегона или участка дороги временем хода, обозначая его через t_x . Время хода плюс среднее время t_0 стоянки на промежуточных остановочных пунктах назовем временем поезда t_k по перегону. Таким образом $t_k = t_x + t_0$.

Средней ходовой скорости на перегоне дадим наименование технической скорости. Она будет равна

$$V_s = \frac{\int_0^{t_x} V dt}{t_x} = \frac{L}{t_x} \quad (1)$$

где L — длина участка или перегона.

Скорость, рассчитанная с учетом стоянки на промежуточных станциях, носит название коммерческой скорости или скорости сообщения. Обозначая ее через V_k , будем иметь

$$V_k = \frac{\int_0^{t_k} V dt}{t_k} = \frac{L}{t_k} \quad (2)$$

Под эксплуатационной скоростью мы понимаем среднюю скорость с учетом стоянки на конечных пунктах.

Режим движения электрического поезда по данному перегону определяется нижеследующими факторами:

а) ускорением при разгоне поезда или удельной пусковой силой тяги;

б) пусковой мощностью тяговых электродвигателей, т. е. той наибольшей мощностью, которую двигатели поезда развивают при разгоне;

в) способом пуска тяговых электродвигателей;

г) характеристиками тяговых электродвигателей;

д) мощностью тяговых электродвигателей;

е) наличием или отсутствием регулировки возбуждения (шунтировки) двигателей и коэффициентом шунтировки¹,

¹ См. В. А. Шевалин. Тяговые расчеты электрических железных дорог и трамваев, 1931, стр. 18.

ж) величиною (продолжительностью) выбоя при подходе к остановочному пункту;

з) скоростью поезда в момент начала торможения;

и) величиною замедления при торможении.

Перечисленные нами факторы влияют на коммерческую и эксплуатационную скорость движения поездов, на расход электрической энергии и на нагрев тяговых двигателей.

Коммерческая скорость определяет время поездки пассажира, т. е. является одним из главнейших факторов, в котором заинтересованы пассажиры. Эксплуатационная скорость диктует потребное для дороги или трамвая инвестируемое количество подвижного состава, размеры тяговых устройств, а также потребный эксплуатационный штат поездного персонала. Расход энергии на движение поездов сказывается на мощности устройств, питающих дорогу электрической энергией (контактной линией, подстанций, генераторной станции, линии передачи) и в сильнейшей мере влияет на эксплуатационные расходы.

Следует отметить, что перечисленные факторы имеют особенно большое влияние на эксплуатационные результаты в случае дорог с короткими перегонами. В виду этого в последующих выводах мы рассматриваем движение поездов трамвая, пригородных дорог и метрополитенов и лишь частично касаемся дорог с длинными перегонами.

Рассмотрим теперь соображения, на основе которых рациональный порядок движения поезда по перегону может быть выработан.

При разрешении этого вопроса мы можем встретиться с двумя случаями: 1) когда поезд имеет заданное электрическое тяговое оборудование и 2) когда электрическое тяговое оборудование может быть выбрано в связи с наиболее рациональным режимом движения поезда по данной дороге или трамваю.

В настоящей главе мы рассматриваем только первый случай.

Предположим, что мощность и характеристики тяговых двигателей поезда нам даны, кроме того заданы ступени пусковых реостатов и режим пуска двигателей. При этих условиях нормальный разгон поезда всегда будет происходить при определенном пусковом токе, т. е. при определенной пусковой мощности.

Мы предполагаем, что вагоновожатый или машинист всегда соблюдает определенный темп включения контроллера, а если в системах косвенного управления тяговыми двигателями имеется реле автоматического ускорения, то это реле имеет определенную неизменяемую установку. Тогда поезд будет иметь определенное ускорение при разгоне. При этих обстоятельствах мы можем получать различные режимы езды, если машинист будет выключать ток в различных точках пути (рис. 1). Движение поездов при этом будет происходить при различных средних ходовых скоростях. Кроме того при данной диаграмме разгона и движения под током мы можем иметь различную интенсивность торможения поезда (различную величину замедления) при подходе к остановочному пункту. Если тяговые двигатели имеют регулировку возбуждения (шунтировку), машинист может ею пользоваться, либо может оставлять ее, как резерв для нагона опозданий. Установим, — какой порядок езды будет рациональным.



1. Выбор скорости движения поездов при данном замедлении торможения

Для того, чтобы выявить сущность вопроса, рассмотрим движение поезда по короткому перегону с однородным профилем.

Если машинист строго соблюдает предписанный ему темп включения позиций контроллера или если мы имеем автоматическое ускорение, то разгон поезда на данном перегоне всегда будет происходить по кривой $V = \varphi(t)$ и $V = \psi(s)$, изображенным на рис. 1 в виде линий OG и OG_1 . Линии OG и OG_1 , очевидно, представляют собою

диаграмму движения поезда под током. Движение поезда по данному перегону может происходить при различных режимах. Так, например, машинист может выключить ток в точке A_1 , далее ехать вплоть до остановочного пункта по инерции (при выбеге) и остановиться без помощи тормозов. При этом мы получим наибольшее возможное время хода по данному перегону t_{max} и наибольшую возможную продолжительность выбега. Вместо этого машинист может выключить ток в точке B_1 и при подходе к остановке тормозить поезд со скорости V_1 , при этом мы будем иметь более короткий выбег и меньшее время хода t_1 . Далее пробег перегона возможен с выключением тока в точке C_1 при торможении поезда со скорости V_2 при времени хода t_2 . Точно таким же образом мы получим выключение тока в точках D_1 или E_1 с дальнейшим сокращением выбега и повышением средней скорости хода. Как крайний случай, мы можем иметь выключение тока в точке F_1 с торможением поезда с момента выключения тока. При этой последней картине движения выбег поезда совершенно отсутствует. Время хода по перегону получается минимальным возможным. Во всех случаях мы предполагаем, что торможение поезда происходит с постоянным замедлением. Величина замедления выбирается на основе соображений, о которых мы будем говорить в следующем параграфе.

Площадь кривой $V = \varphi(t)$ представляет собою в известном масштабе пройденный путь. Площадь диаграммы $V = \varphi(t)$ движения поезда от момента взятия с места до момента остановки, очевидно, представляет собою длину перегона.

Так как все диаграммы, построенные на рис. 1, относятся к одному и тому же перегону, то площади этих диаграмм должны быть равны. Таким образом площадь OEt_{max} равна площади OEV_1t_1 , равна площади ODV_2t_2 , и т. д.

Мы видим, что выключение тока в различных точках перегона приводит нас к различным средним скоростям движения поездов.

В четвертом координатном угле рис. 1 нами построена диаграмма силы тока, поглощаемого поездом, в функции времени. На кривой отмечены точки выключения тока при различных режимах движения поезда. При выключении тока в точке A_1 мы идем под током в течение времени t_2 , при выключении тока в точке B_1 время хода под током будет равно t_1 и т. д. Таким образом при изменении средней скорости движения поездов мы будем иметь изменение расхода энергии; точно так же при различных скоростях мы получим различный нагрев тяговых электродвигателей.

Влияние скорости движения на расход электрической энергии

Выясним прежде всего влияние скорости на расход электрической энергии.

Из диаграммы рис. 1 мы видим, что чем меньше время хода, тем большее время мы вынуждены идти под током. Следовательно, повышение скорости вызывает возрастание расхода энергии.

Воспользуемся диаграммой силы тока, поглощаемого поездом, построенной в четвертом координатном угле, и подсчитаем удельный

¹ Удельный расход энергии подсчитан методом, изложенным в книге автора „Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев“, 1931, гл. VII, стр. 273—276.

расход энергии α на движение поезда.¹ Для этой цели построим в четвертом координатном угле кривую зависимости полного расхода энергии A от времени хода под током. Изобразим на диаграмме рис. 2 удельный расход энергии в функции времени поездки по перегону. Под временем поездки (см. стр. 5) мы понимаем время хода плюс время стоянки на остановочном пункте, предполагая, что этот остановочный пункт является промежуточным, а не конечным для данного поезда. В рассматриваемом нами примере это время стоянки принято равным 8 сек.

Мы видим, что полученная нами кривая удельного расхода энергии может быть разделена на два участка — участок AB и участок BC . На участке BC сокращение времени поездки по перегону с 133 до 73 сек., т. е. на 60 сек., или на 40%, вызывает повышение удельного

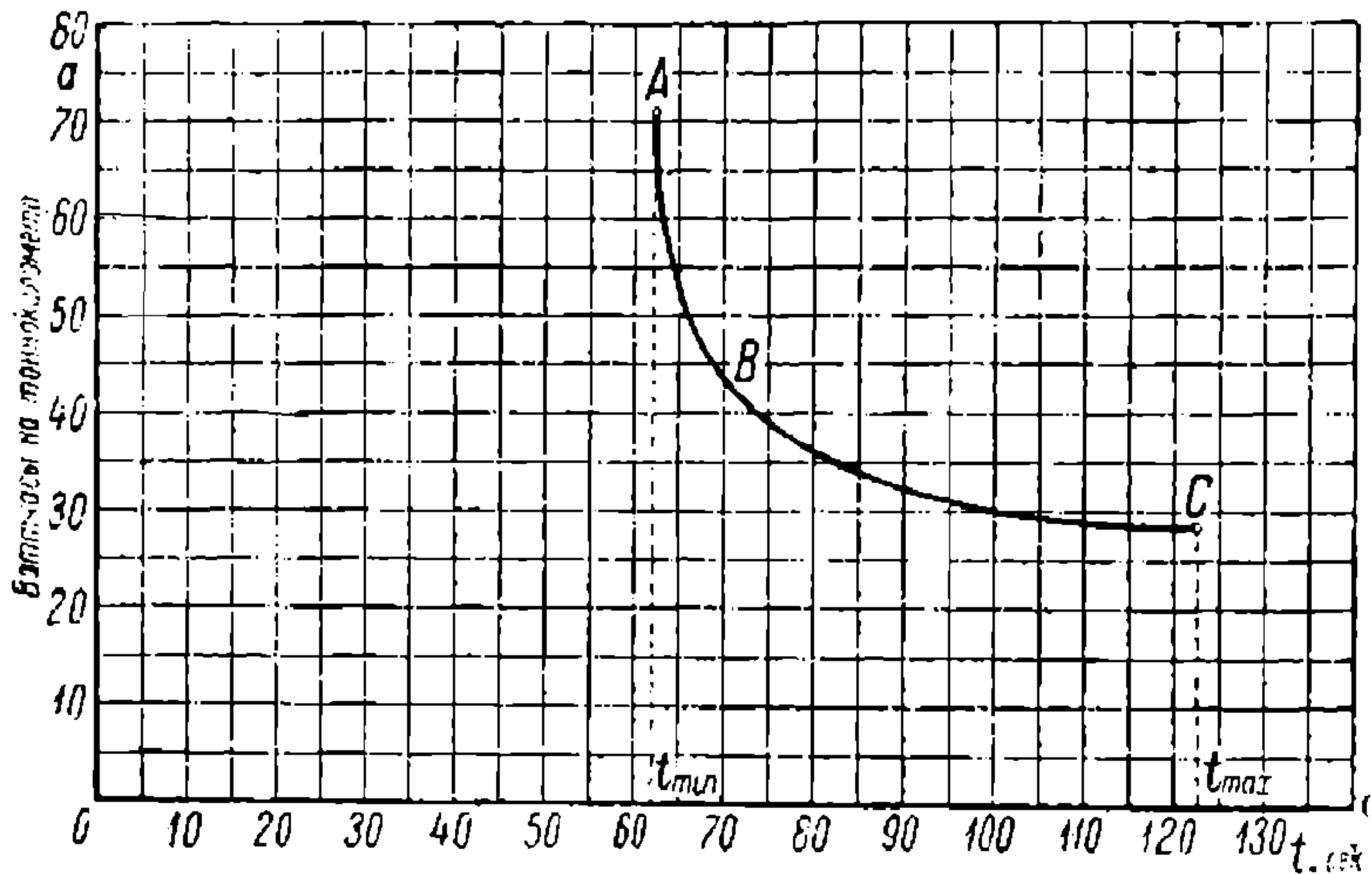


Рис.

расхода энергии на 45%. На участке AB незначительное повышение скорости влечет за собой сильный рост затраты энергии. Если бы мы хотели сократить время поездки по перегону от 73 до 62,5 сек., т. е. всего лишь на 10,5 сек., или на 14%, нам пришлось бы встретиться с дальнейшим повышением расхода энергии на 75%.

Полученные нами выводы находят себе полное физическое объяснение.

Затраченная на движение поезда энергия, как известно, расходуется: а) на покрытие потерь в пусковых реостатах, б) на покрытие потерь в тяговых двигателях, в) на преодоление сопротивления движению и г) на покрытие потерь в тормозах.

Потери в пусковых реостатах при всех рассмотренных нами режимах движения поезда будут одни и те же, так как режим пуска под реостатами не меняется. Потери в тяговых электродвигателях при увеличении скорости возрастают, так как при этом период работы двигателя под током увеличивается. Работа сил сопротивления движению при увеличении скорости увеличивается, однако это увеличение в данном случае не так значительно. Что касается потерь в тор-

мозах, то таковые в нашем случае имеют доминирующее значение. При изменении времени хода они меняются в весьма широких пределах—от нуля при отсутствии торможения до максимума при отсутствии выбега. При максимальном времени поездки потери в тормозах отсутствуют, и удельный расход энергии определяется только суммой первых трех слагаемых (а, б и в). Зависимость скорости V_b в момент начала торможения от времени хода дана на рис. 1 пунктирной линией Ft_{max} . Мы видим, что с уменьшением времени хода скорость V_b возрастает сначала медленно, а затем значительно. Потери энергии в тормозах возрастают пропорционально квадрату скорости V_b . Так как изменение расхода энергии при рассмотренном нами изменении режима движения поезда определяется главным образом потерями в тормозах, форма кривой удельного расхода энергии, изображенной на рис. 2, находит себе физическое объяснение.

Сделанные нами выводы касательно изменения расхода энергии в связи с изменением времени поездки по перегону вполне согласуются также с формулами для определения удельного расхода энергии. Удельный расход энергии может быть подсчитан по формуле:¹

$$a = \left\{ \frac{2,725}{L} \left[w_{oc} (L - L_b) + H + H_o + \frac{K \Sigma \alpha}{1000} \right] + 0,0107 (1 + \gamma) \left[nV_b^2 + \frac{\Sigma (V_2^2 - V_1^2)}{L} \right] \right\} \frac{100}{\eta_c} + a_p, \quad (3)$$

где:

- L — длина участка, проходимого поездом;
- w_{oc} — среднее значение основного удельного сопротивления движению;
- L_b — суммарная длина пути, проходимого под тормозами;
- H — разность отметок конечной и начальной точки рассматриваемого участка;
- H_o — суммарная разность отметок вредных спусков;
- K — постоянный коэффициент в формуле сопротивления поезда в кривой;
- $\Sigma \alpha$ — сумма центральных углов всех кривых участка;
- γ — коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся частей поезда;
- n — число остановок;
- V_b — скорость поезда в момент начала торможения при подходе к остановке;
- V_1 и V_2 — скорость в начале и конце участков, где применяется торможение на перегоне;
- η_c — средняя отдача двигателей и движущего механизма;
- a_p — удельные потери энергии в пусковых реостатах.

Обратимся к формуле (3) и применим ее к случаю рассматриваемого нами перегона с однородным профилем. Так как мы имеем торможение только при подходе к остановочному пункту, то член $\frac{\Sigma (V_2^2 - V_1^2)}{L}$ в нашем случае будет равен нулю. В виду того, что на перегоне мы

¹ См. В. А. Шевалев. Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев, 1931, стр. 296, формула (434).

не имеем вредных спусков, H_c также равно нулю. Таким образом формула (3), примененная к нашему случаю, получит следующий вид:

$$a = \frac{100}{\eta_c} \left\{ \frac{2,725}{L} \left[w_{oc} (L - L_b) + H + \frac{K \Sigma a}{1000} \right] + 0,0107 (1 + \gamma) n V_b^2 \right\} + a_p. \quad (4)$$

Под величиною H в данной формуле надлежит понимать разность отметок пути в точке начала торможения и в начале перегона. Под L_b понимается длина тормозного пути.

Величина $\frac{H}{L - L_b}$, очевидно, есть средний подъем i_c' . Величина $\frac{K \Sigma a}{1000 (L - L_b)}$ есть среднее сопротивление w_r кривых. Средний подъем и среднее сопротивление кривых мы относим к участку длиной $L - L_b$, так как на протяжении тормозного пути L_b подъем и кривая проходят за счет живой силы поезда. Вводя значения i_c' и w_r в формулу (4), получим:

$$a = \frac{100}{\eta_c} \left\{ \frac{2,725}{L} (L - L_b) (w_{oc} + i_c' + w_r) + 0,0107 (1 + \gamma) n V_b^2 \right\} + a_p. \quad (5)$$

Величина $i_c' + w_r$, очевидно, представляет собою средний эквивалентный подъем i_c с учетом наличия кривых. Следовательно,

$$a = \frac{100}{\eta_c} \left\{ \frac{2,725}{L} (L - L_b) (w_{oc} + i_c) + 0,0107 (1 + \gamma) n V_b^2 \right\} + a_p. \quad (6)$$

Учитывая, что $n = \frac{1}{L}$, мы можем написать формулу (6) следующим образом:

$$a = \frac{100}{\eta_c} \left\{ 2,725 (w_{oc} + i_c) - 2,725 (w_{oc} + i_c) \frac{L_b}{L} + 0,0107 (1 + \gamma) \frac{V_b^2}{L} \right\} + a_p. \quad (7)$$

Обозначим через u_2 замедление при торможении поезда. Так как L выражено нами в километрах, то, выражая u_2 в км/час², мы можем написать, что $L_b = \frac{V_b^2}{2u_2}$. Тогда

$$a = \frac{100}{\eta_c} \left\{ 2,725 (w_{oc} + i_c) + \frac{V_b^2}{L} \left[0,0107 (1 + \gamma) - 1,362 \cdot \frac{w_{oc} + i_c}{u_2} \right] \right\} + a_p. \quad (8)$$

Удельные потери энергии в рессорках могут быть определены по формуле¹

$$a_p = 0,5 n \left[2,725 (w_{op} + i_p) \cdot \frac{V_a^2}{2u_1} + 0,0107 (1 + \gamma) V_a^2 \right], \quad (9)$$

¹ См. В. А. Шовалля. Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев. 1931, стр. 295, формула (432).

где:

V_a — скорость в момент выхода на автоматическую характеристику, u_1 — ускорение при разгоне, выраженное в км/час²; $w_{op} + i_p$ — среднее сопротивление движению на элементе пути, где имеет место разгон.

Так как $n = \frac{1}{L}$ то

$$a_p = \frac{1}{2} \left[1,362 \frac{w_{op} + i_p}{u_1} + 0,0107 (1 + \gamma) \right] \frac{V_a^2}{L} \quad (10)$$

Таким образом полный удельный расход энергии на пробег данного перегона будет

$$a = \frac{100}{\eta_c} \left\{ 2,725 (w_{oc} + i_c) + \frac{V_b^2}{L} \left[0,0107 (1 + \gamma) - 1,362 \frac{w_{oc} + i_c}{u_2} \right] \right\} + \frac{1}{2} \left[1,362 \frac{w_{op} + i_p}{u_1} + 0,0107 (1 + \gamma) \right] \frac{V_a^2}{L}. \quad (11)$$

В выведенной нами формуле мы выражали ускорение u_1 и замедление u_2 в км/час². Если выразить их в м/сек², то формула (11) напишется следующим образом:

$$a = \frac{100}{\eta_c} \left\{ 2,725 (w_{oc} + i_c) + \frac{V_b^2}{L} \left[0,0107 (1 + \gamma) - 0,000105 \frac{w_{oc} + i_c}{u_2} \right] \right\} + \frac{1}{2} \left[0,000105 \frac{w_{op} + i_p}{u_1} + 0,0107 (1 + \gamma) \right] \frac{V_a^2}{L} \quad (12)$$

Полученные нами формулы позволяют приблизительно определять тот удельный расход энергии, который мы будем иметь при пробеге нашего перегона. Если поезд движется по перегону согласно диаграммам рис. 1, то второй член в формуле (12) будет для всех режимов движения поезда одним и тем же. Слагаемое $2,725 (w_{oc} + i_c)$ в первом члене при изменении режима пробега перегона будет меняться мало, а потому изменение расхода энергии, как мы ранее и установили, будет определяться главным образом скоростью V_b в момент начала торможения.

Формулы (11) и (12) дают нам возможность определить минимальный расход энергии, который мы будем иметь при отсутствии торможения. Полагая $V_b = 0$ в формуле (12), будем иметь

$$a_{min} = 2,725 (w_{oc} + i_c) \frac{100}{\eta_c} + \frac{1}{2} \left[0,000105 \frac{w_{op} + i_p}{u_1} + 0,0107 (1 + \gamma) \right] \frac{V_a^2}{L}. \quad (13)$$

Минимальный расход энергии, возможный при движении поезда без торможения, может быть приблизительно определен без построения диаграмм движения. Входящая в формулу (13) величина V_a может быть взята из диаграммы остаточной (ускоряющей) силы тяги.

Из формул (11) и (12) мы видим, что выбор рационального порядка движения поезда в смысле установления целесообразной продолжительности выбега и момента начала торможения имеет практическое значение только при коротких перегонах. Для длинных перегонов величина $\frac{V_b^2}{L}$ получается малой, а потому действительность выбега

и потери энергии в тормозах имеют относительно малое значение. Этот вывод, конечно, понятен и без ссылки на формулы.

Для длинных перегонов, где поезд достигает установившейся скорости, без построения диаграмм движения можно определить не только минимум, но и максимум удельного расхода энергии на пробег перегона.

Выясним влияние режима движения поезда на нагрев тягового электродвигателя. При увеличении скорости увеличивается продолжительность работы двигателя под током, а потому потери в двигателе растут; продолжительность выбега и время пробега перегона уменьшаются. Таким образом при увеличении скорости мы имеем выделение в двигателе большего количества тепла в течение меньшего промежутка времени. Естественно поэтому, что при повышении скоростей мы имеем увеличение нагрева тяговых электродвигателей.

В табл. 1 нами произведен подсчет средней установившейся температуры нагрева тягового электродвигателя, работающего в случае, разобранным нами на рис. 1. Для подсчета применен метод средних потерь.¹ В столбце первом табл. 1 выписано время поездки по перегону t_0 при различных режимах движения поезда. В столбце втором помещено время хода под током для тех же режимов. В столбце третьем для них же выписана величина $\int W_a dt$, т. е. потери энергии в активных частях двигателя на данном перегоне. Для нахождения этой величины в четвертом координатном угле диаграмм рис. 1 построена зависимость потерь W_a от времени. Величина $\int W_a dt$, очевидно, выражается площадью этой кривой от начала движения по перегону до момента выключения тока. В столбце четвертом дано время t_1 пробега перегона плюс средняя длительность остановки, учитывая и простои на конечных станциях. В столбце пятом по этому времени найдена эксплуатационная скорость движения поезда $V_s = \frac{L}{t_1}$. В столбце шестом по этой скорости подсчитан коэффициент теплоотдачи двигателя A . В столбце седьмом по формуле

$$\tau = \frac{\int_{t_1}^{t_0} W_a dt}{At_1} \quad (14)$$

подсчитана средняя сверхтемпература, которую достигают обмотки двигателя при установившемся режиме. На диаграмме рис. 3 эта сверхтемпература представлена в функции времени t_0 поездки по перегону.²

Вместо примененного нами метода с несколько меньшей точностью нагрев двигателя можно было бы подсчитать по среднему квадратичному току.

¹ См. В. А. Ш е в а л я н а. Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев. стр. 311—314.

² При построении диаграмм рис. 1 мы предположили, что моторный вагон снабжен двигателями, тепловые параметры и потери W_a которых даны на рис. 38 книги автора „Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев“. Ввиду этого при подсчете табл. 1 величинами W_a и A были взяты из диаграммы рис. 38 той же книги.

Таблица 1

t_k сек	t_l сек	$\int W_a dt$ ватт-сек	l_0 сек	V_0 м/сек	A	$\tau = \frac{\int W_a dt}{A \cdot l_0}$
62	40,5	94 470	64	4,69	22,4	66
63	30,8	79 740	65	4,62	22,2	55
66	22,4	66 140	68	4,41	21,6	45
74	16,7	55 990	76	3,95	20,3	36
86	13,6	48 860	88	3,41	18,8	29,5
122	12	43 420	124	2,42	16	22

Из диаграммы рис. 3 мы видим, что движение поезда без выбега, а также очень малый выбег неблагоприятно отражаются на нагреве двигателя.

В нашем примере нагрев двигателя даже в самом неблагоприятном случае не превосходит допустимых пределов. Если бы эти пределы при

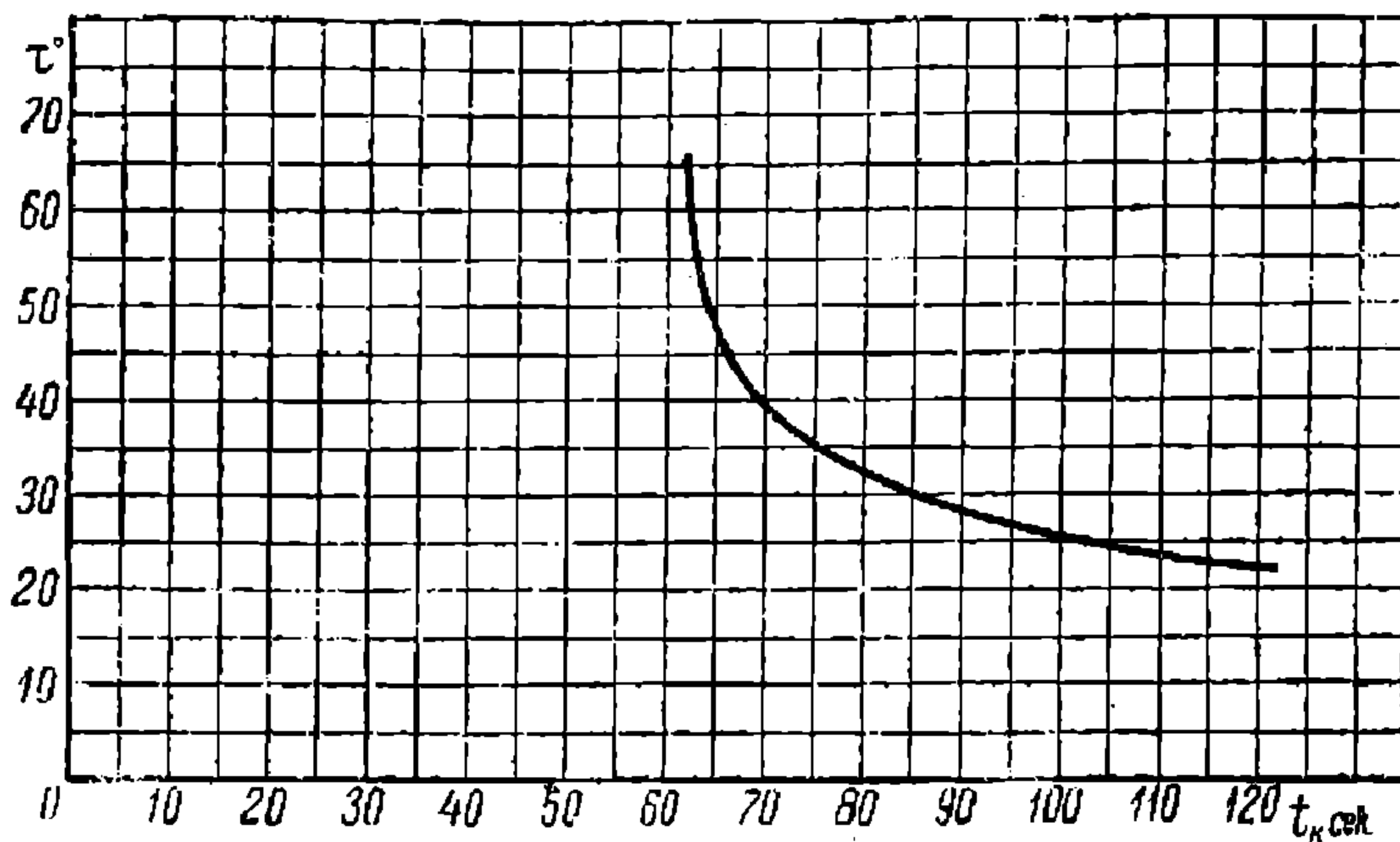


Рис. 3.

малых временах хода были превзойдены, следовало бы допустить только те скорости движения, которые не угрожают целостности изоляции двигателя.

Скорость движения поездов оказывает значительное влияние на капитальные вложения и эксплуатационные расходы электрической дороги или трамвая. Прежде всего скорость отражается на количестве потребного подвижного состава.

При повышении скоростей потребный инвентарный вагонный парк уменьшается, в связи с чем сокращаются размеры необходимых для дороги или трамвая тяговых устройств. С другой стороны повышение скоростей удорожает сеть и подстанции. В эксплуатационных расходах при повышении скоростей мы имеем снижение затрат на содержание поездного персонала, так как при этом имеет место уменьшение штата машинистов (вожатых) и кондукторских бригад. Общие

затраты на ремонт и осмотру подвижного состава при повышении скоростей обычно снижаются. В противоположность этому увеличение скоростей повышает расходы по оплате электрической энергии и ежегодные отчисления на стоимость контактной сети и подстанций. Таким образом при некоторой скорости мы можем иметь минимум капитальных вложений и некоторая скорость дает минимум эксплуатационных расходов. В каждом частном случае эти скорости могут быть найдены.

Вообще говоря, экономика требует применения довольно высоких скоростей движения поездов. При этом нужно все же отметить, что если экономические соображения диктуют применение скоростей, связанных с работой на ветви *AB* кривой рис. 2, то это будет свидетельствовать, что построенная нами диаграмма движения мало пригодна для наших условий движения и полученное нами решение вопроса нельзя считать удовлетворительным. Работа на ветви *AB* не может быть признана нормальной ввиду того, что при этом трудно соблюдать норму заданного расхода энергии, ибо незначительное отклонение от предписанного времени хода сильно повышает этот расход. Кроме этого при работе на ветви *AB* мы имеем чрезвычайно малый запас на нагон опозданий, и всякий нагон опозданий будет связан с чрезмерной тратой электрической энергии. Если экономические соображения потребуют езды при скоростях, соответствующих ветви *AB* кривой рис. 2, то нужно сделать попытку получить желательные скорости менее дорогой ценой, т. е. при меньшем расходе энергии. Как мы увидим в последующих главах, это может быть достигнуто целым рядом средств—повышением ускорения при разгоне, увеличением пускового тока (то и другое при заданном двигателе) или, наконец, повышением мощности тягового электродвигателя.

Значение скорости движения для пассажиров Для рассматриваемого нами примера на рис. 1 мы определили те времена поездки по перегону, которые мы можем иметь при данном оборудовании. Перейдем теперь к оценке этих времен поездки, а следовательно, и скоростей движения с точки зрения требований пассажиров. Вполне очевидно, что пассажир заинтересован в скорейшем проезде своего пути, т. е. в наименьшей затрате времени на свою поездку.

Для примера, разобранный нами выше, из диаграммы рис. 1 мы видим, что при времени стоянки в 8 секунд минимальное время поездки по перегону, возможное при данном оборудовании, равно $t_{kmin} = 62,5$ сек. С другой стороны, диаграмма рис. 2 нам указывает, что при этом времени поездки мы имеем чрезмерно большой расход энергии, выражающийся 71 ваттчасом на тоннокилометр. Удлинение времени поездки по перегону до $t_{k1} = 72$ сек., т. е. на 9,5 сек. вызывает снижение расхода энергии до 41,5 ваттчаса на тоннокилометр, т. е. на 43%.

Предположим, что средняя дальность поездки пассажира на данном трамвае равна 2,4 км. Это соответствует условиям наших провинциальных городов. Так как средняя длина перегона в нашем примере принята равной 300 м, то длина поездки пассажира равна 8 перегонам. При этих условиях минимальная продолжительность поездки пасса-

жиров, возможная при заданном оборудовании, будет $8 \times 62,5 = 500 \text{ сек.} = 8,3 \text{ мин.}$ Удлинение времени поездки по перегону от $t_{\text{мин}} = 62,5 \text{ сек.}$ до $t_{k1} = 72 \text{ сек.}$ увеличивает общую затрату времени среднего пассажира на всю поездку на $9,5 \times 8 = 76 \text{ сек.} = 1,3 \text{ мин.}$ Вполне очевидно, что такая экономия во времени поездки пассажирами особенно цениться не будет. Трамвайное движение, особенно в наших условиях, не имеет строгой регулярности следования вагона за вагоном. Благодаря этому

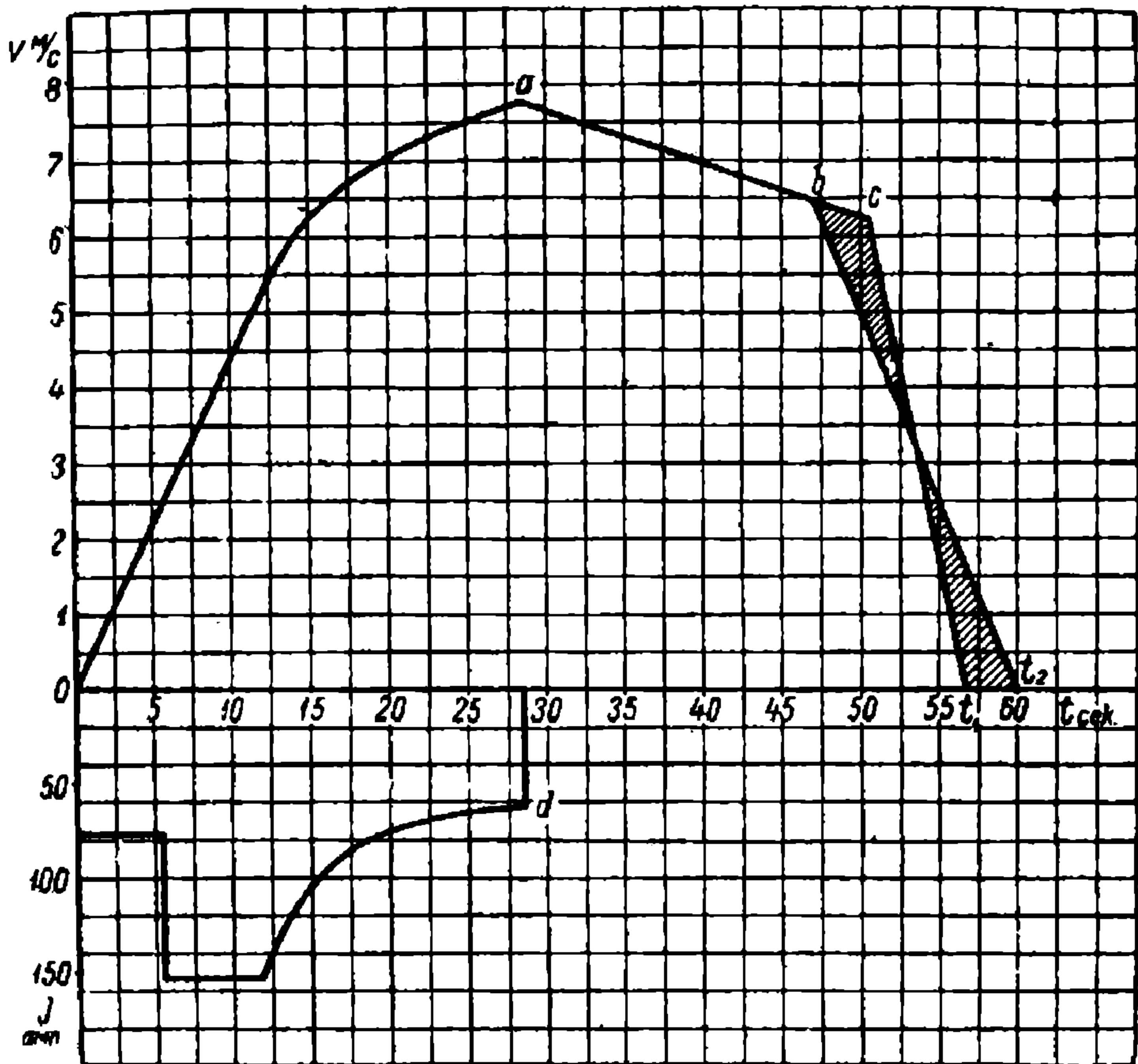


Рис. 4.

пассажир, едущий к сроку, всегда должен выехать с небольшим запасом времени. Поэтому поездки длительностью в 8,3 и 9,6 мин. для пассажира практически будут эквивалентны. С другой стороны удлинение времени поездки на $\frac{72 - 62,5}{62,5} \cdot 100 = 15\%$ против минимального

возможного времени дает снижение расхода энергии на 45% . Отсюда следует, что работу поезда на участке АВ кривой рис. 2 следует избегать, так как при этом, не давая заметных преимуществ для пассажиров, мы повышаем расход энергии. Если по каким-либо соображ-

ниям время поездки по перегону должно быть близким или равным t_{min} .
надлежит либо увеличить пусковую мощность тяговых двигателей,
либо изменить передаточное число, либо перейти на двигатели большей
мощности. Об этих мероприятиях мы говорим в следующих главах.

2. Выбор замедления при торможении поезда у остановочного пункта

Для остановки поезда в конце перегона мы можем применять
различную интенсивность торможения, т. е. различную величину тор-
мозной силы, в связи с чем величина замедления $u_2 = \frac{dV}{dt}$ может ме-
няться в весьма широких пределах. Выясним теперь, какой величиной
замедления следует пользоваться как наиболее целесообразной.

Величина замедления u_2 может отразиться на скорости движения
поездов и на расходе электрической энергии.

Легко видеть, что повышая величину замедления, мы можем по-
высить скорость движения поездов, не изменяя расхода энергии. На
диаграмме рис. 4 представлена кривая $V = \varphi(t)$ движения трамвайного
поезда. Если применять замедление $0,5 \text{ м/сек}^2$, мы будем иметь диа-
грамму $Oabt_2$, причем время хода по перегону будет равно $Ot_2 = 60 \text{ сек.}$
При замедлении $1,0 \text{ м/сек}^2$ мы получим диаграмму $Oact_1$ при времени
хода $Ot_1 = 57 \text{ сек.}$ Площади кривых $Oabt_2$ и $Oact_1$ будут, очевидно,
одинаковы. Мы видим, что повышение замедления дало нам увели-
чение скорости движения поезда. Что касается расхода электрической
энергии, то таковой в обоих случаях будет одним и тем же. В том и
другом варианте пробега перегона мы будем иметь одну и ту же ди-
аграмму силы тока, изображенную на рис. 4, и выключение тока в
обоих случаях будет происходить в точке d . Таким образом площадь
диаграммы силы тока, расход тока и расход энергии при том и другом
замедлении будут одни и те же.

Полученные нами выводы вполне согласуются с теми формулами
для расхода энергии, которые мы вывели выше. Потеря энергии в
пусковых реостатах, а также в двигателях и движущих механизмах
в обоих случаях пробега перегона будет одной и той же. Равным
образом при том и другом варианте движения расход энергии на
преодоление сопротивления движению при пробеге поезда под током
будет одним и тем же. Кинетическая энергия поезда в момент выклю-
чения тока будет в обоих случаях одинакова. Эта кинетическая энергия
в дальнейшем тратится на преодоление сопротивления движению при
движении без тока и на потери в тормозах. Так как потери на сопро-
тивление движению без тока в том и другом случае мало отличаются,
потери в тормозах будут приблизительно равны. Различие будет за-
ключаться только в том, что при малом замедлении, т. е. при малой
тормозной силе, та же работа тормозов будет произведена в течение
большого промежутка времени и на большем тормозном пути. При
большом замедлении будет наблюдаться обратное явление.

Таким образом мы видим, что интенсивное торможение является
благоприятным, так как без дополнительного расхода энергии оно позво-
ляет нам повысить скорости движения поездов.

При заданной скорости движения величина u_2 замедления при торможении влияет на расход энергии. На рис. 5 представлена диаграмма $V = \varphi(t)$ движения пригородного электрического поезда при различных замедлениях торможения при подходе к остановочному пункту. Так как площади диаграмм $V = \varphi(t)$ для данного перегона при всех замедлениях должны быть одинаковы, то очевидно, что при наибольшем замедлении мы будем иметь наименьшее время хода под током, т. е. будем

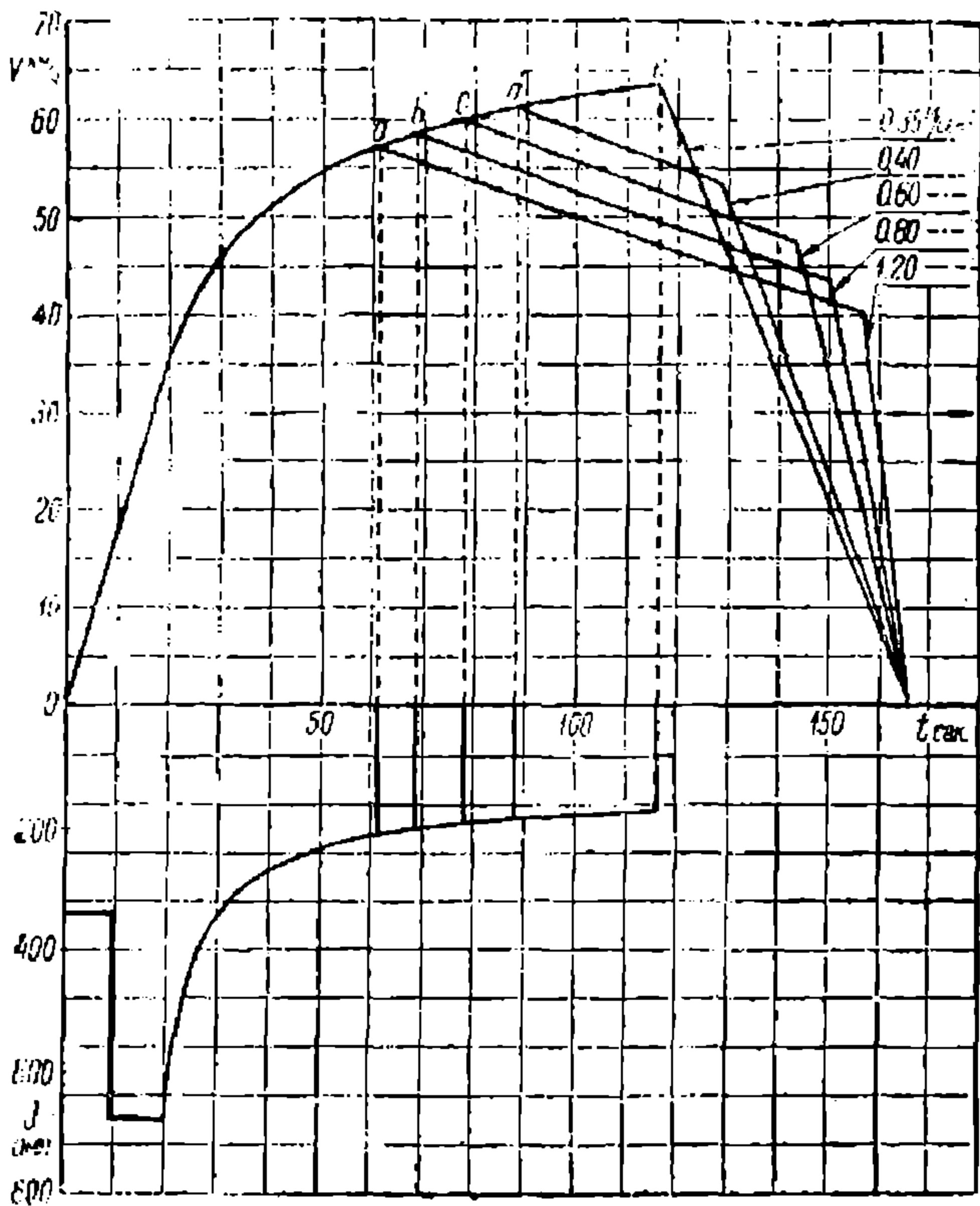


Рис. 5.

мы будем выключать ток в точке a . По мере уменьшения замедления u_2 выключение тока будет происходить в точках b, c и т. д. При наименьшем из рассмотренных нами замедлений мы вынуждены выключать ток в точке e и ехать без выбега. Таким образом уменьшение тормозной силы удлиняет время хода под током и повышает расход электрической энергии. Чтобы осветить влияние интенсивности торможения на удельный расход энергии, для того же примера на диаграмме рис. 6 изображена зависимость удельного расхода энергии a от величины замедления u . Мы видим, что при повышении u до $0,7-0,8 м/сек^2$ расход энергии сильно падает. В дальнейшем снижении расхода энергии делается меньше, а при больших замедлениях экономия в расходе энергии растет незначительно. Принимая во внимание, что большие замедления неудобны для пассажиров, в рассматриваемом нами примере было бы целесообразно остановиться на замедлении порядка $0,7 м/сек^2$.

Нагрев двигателя при повышении u_2 уменьшается.

Вполне очевидно, что изложенные выше выводы относятся только к коротким перегонам. На магистральных линиях с перегонами большой длины вопросу о выборе замедления u_2 не стоит уделять внимания, так как влияние этого замедления на расход энергии и время хода мало заметно.

На городских трамваях, метрополитенах и пригородных железных

дорогах величина замедления при торможении обычно лежит в пределах от 0,6 до 0,8 м/сек². При больших скоростях на коротких перегонах ее иногда повышают до 0,9—1,0 м/сек².

3. Влияние шунтировки обмотки возбуждения

Предположим, что тяговые электродвигатели нашего поезда снабжены шунтировкой обмотки возбуждения. Выясним, какое влияние может иметь шунтировка на диаграммы движения поезда и на расход электрической энергии.

Шунтировка обмотки возбуждения дает нам возможность получить одну или две дополнительные автоматические тяговые характеристики

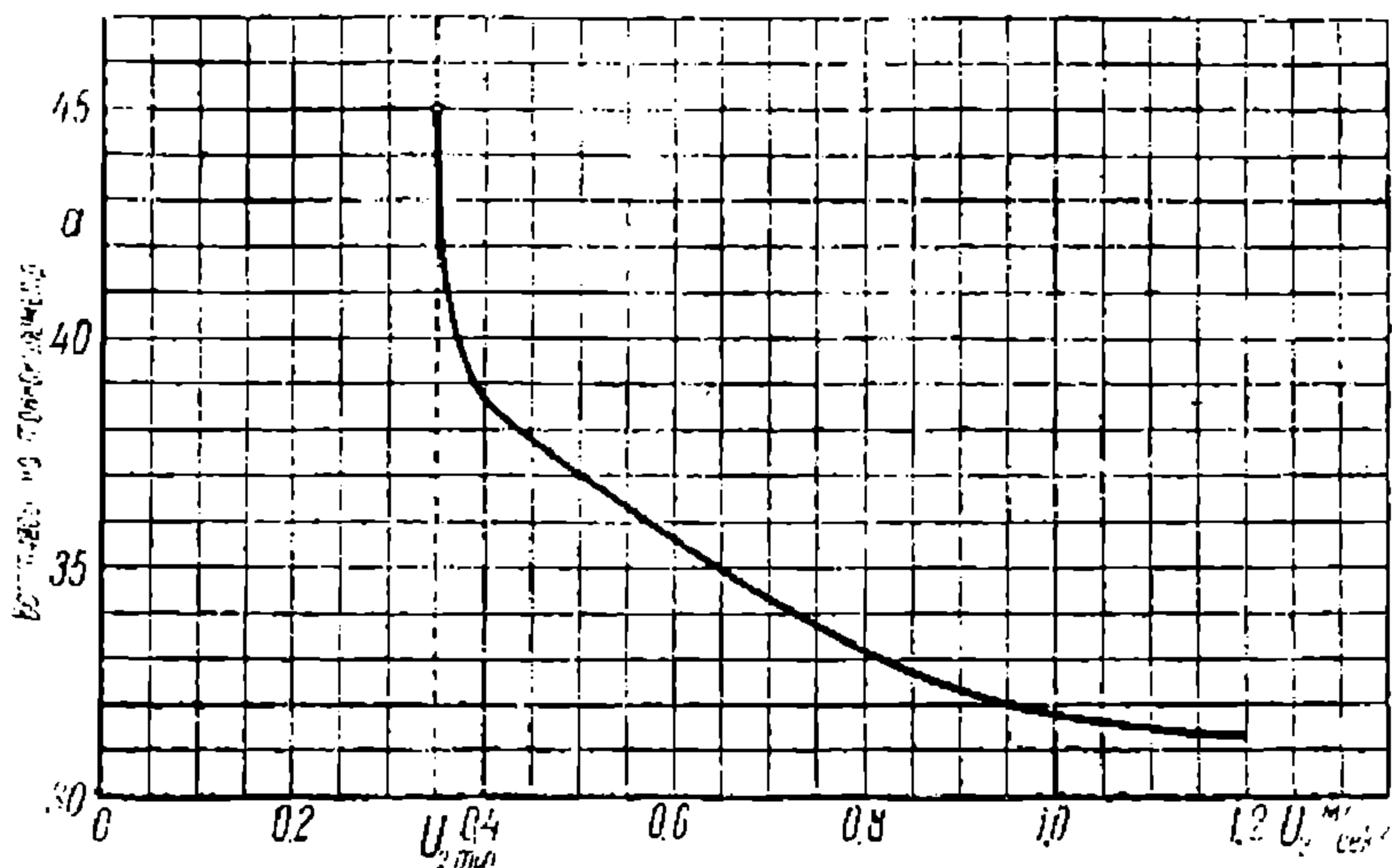


Рис. 6.

поезда на параллельном соединении двигателей.¹ На рис. 7 мы изобразили кривые остаточной (ускоряющей) силы тяги трамвайного поезда при двух ступенях шунтировки обмотки возбуждения. Шунтировка обмотки возбуждения может иметь целью либо ослабление поля, либо усиление магнитного потока при пуске против нормальной его величины (перевозбужденный двигатель). Рассмотрим оба случая.

Шунтировка для ослабления магнитного потока

Пусть на рис. 5 в виде диаграммы $Oabt$ представлена кривая $V = \varphi(t)$ для движения поезда по короткому перегону при полном поле двигателей. Если мы будем иметь ослабление потока, мы получим для того же времени хода диаграмму $Ocdt$. Так как обе диаграммы относятся к одному и тому же перегону, то площади их должны быть равны, а следовательно, заштрихованные на чертеже площадки должны быть равновелики. При разгоне под реостатами обе диаграммы совпадают, при дальнейшем же движении под током диаграмма при шунтировке будет лежать выше. Скорость V_0 в момент начала торможения при шунтировке, очевидно, будет ниже.

¹ Мы имеем в виду моторвагонную тягу. В электровозах число ступеней шунтирования может быть больше.

В четвертом координатном угле изображены диаграммы силы тока, поглощаемого поездом в том и другом случае. Подсчет расхода энергии показывает, что при пробеге перегона с полным полем удельный расход энергии будет равен $a = 28,9$, а при шунтировке $a = 27,6$ ваттчасов на тоннокилометр. Таким образом в нашем случае шунтировка при том же времени хода дает нам экономию в расходе энергии в размере около 5%.

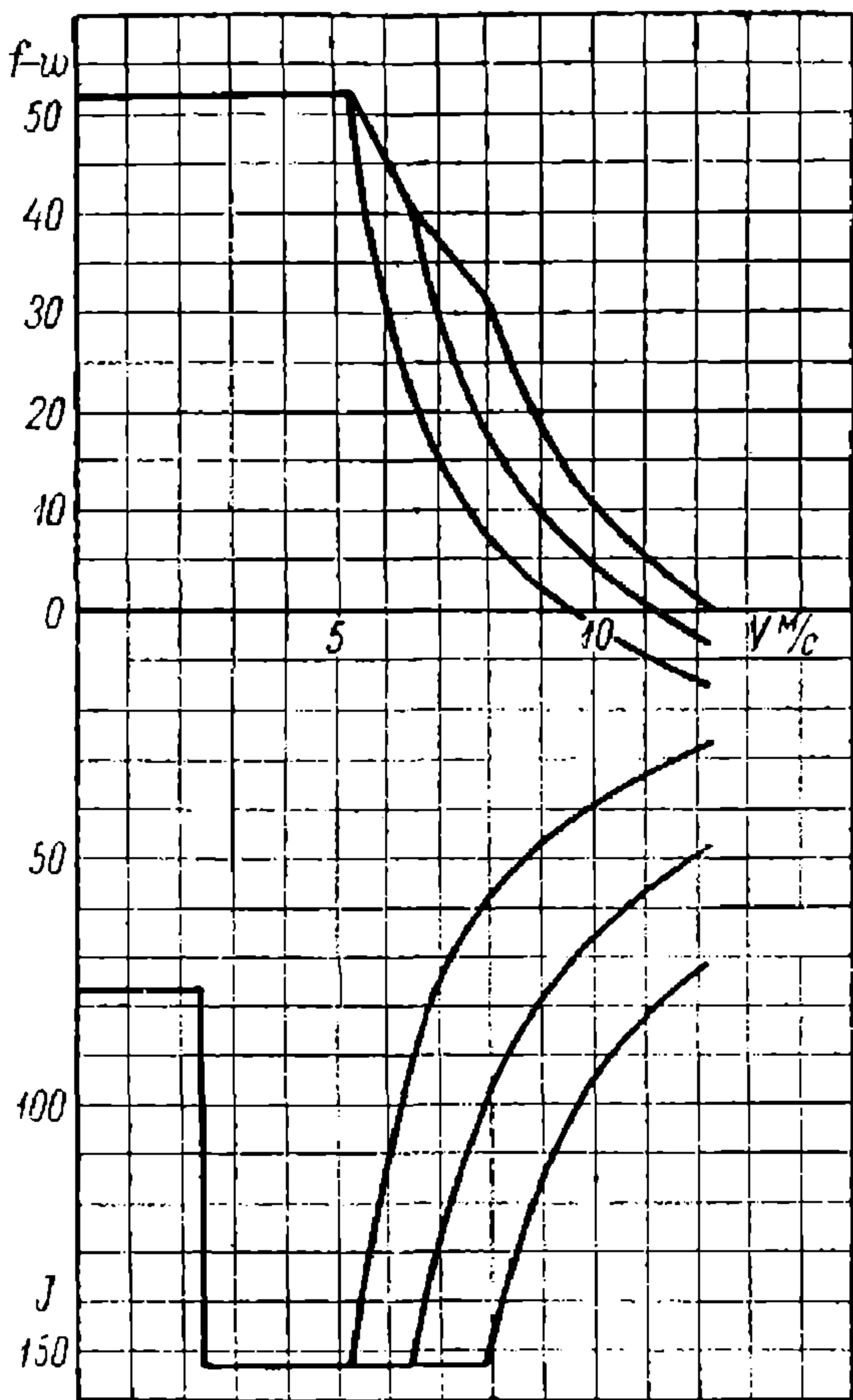


Рис. 7.

тот же расход при разных режимах движения поезда и различных временах пробега перегона.

На рис. 9 построены диаграммы движения поезда при различных скоростях пробега перегона с применением шунтировки. Диаграммы относятся к тому же перегону длиной в 300 м при среднем подъеме в 2‰ для которого выше была построена диаграмма рис. 1. Для сопоставления на диаграмме рис. 9 нанесены кривые движения поезда без шунтировки при тех же временах хода. На рис. 10 в виде кривой ab нанесен удельный расход энергии в функции времени поездки при

Данный вывод совершенно попятен. Энергия, поглощаемая поездом, тратится на потери в пусковых реостатах, в двигателе и движущем механизме, на сопротивление движению и на потери в тормозах. Потери в пусковых реостатах в обоих рассматриваемых нами случаях одинаковы. Благодаря равенству средних ходовых скоростей расход энергии на преодоление сопротивления движения в том и другом случае будет практически одинаков. Потери в двигателях будут отличаться, но в большинстве случаев крупной разницы в этих потерях не наблюдается. Потери в тормозах будут, очевидно, ниже при ослабленном поле. Эти потери обычно являются главным фактором, снижающим расход энергии при шунтировке. Таким образом мы можем сделать заключение, что ослабление потока снижает потери энергии в тормозах.

Мы рассмотрели влияние шунтировки на расход энергии при заданном времени хода. Выясним теперь, как влияет шунтировка на

применении шунтировки. На той же диаграмме в виде кривой *cb* нанесен удельный расход энергии при пробеге того же перегона с полным возбуждением. Кривая *cb* представляет собою ту же кривую, которую мы выше вычертили на рис. 2.

Сопоставляя кривые *ab* и *cb*, мы видим, что шунтировка дает нам возможность несколько повысить скорости движения. Действительно, при полном возбуждении мы можем иметь наименьшее время поездки около 62 сек., тогда как при шунтировке оно будет равно 60 сек.

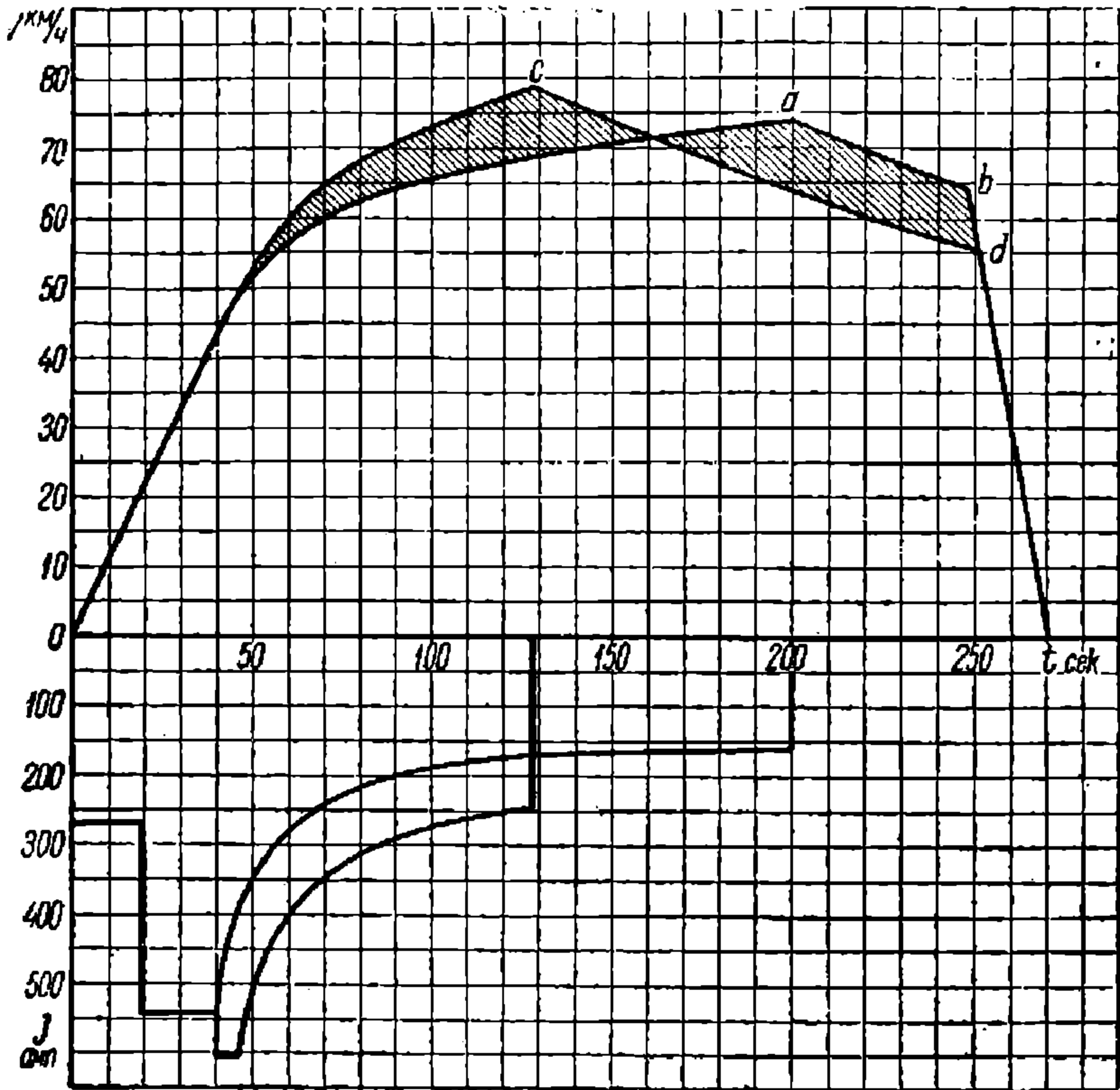


Рис. 8.

При малой длительности выбега при данном времени хода шунтировка снижает расход энергии. Снижение будет тем более, чем выше скорости движения на данном перегоне.

В нашем примере, как явствует из рис. 10, шунтировка оказывает благоприятное влияние на расход энергии только при нагоне опоздания. Если мы будем проезжать перегон с наибольшей скоростью, возможной без применения шунтировки, т. е. будем иметь время поездки около 62 сек., то шунтировка дает нам экономию энергии в размере

$$\frac{71 - 59,3}{71} \cdot 100 = 16,5\%$$

В нашем примере мы применили шунтировку до 67% поля. При повышении коэффициента шунтировки до 50% снижение расхода энергии и увеличение скоростей будут несколько выше.

Очевидно, что при одном и том же расходе энергии шунтировка дает нам возможность несколько понизить время хода, т. е. увеличить скорость движения поезда. Повышение скорости будет тем выше, чем длиннее перегон.

Во всех наших рассуждениях касательно шунтировки мы до сего времени предполагали, что переход с полного возбуждения на рабочую ступень шунтировки происходит без включения пусковых

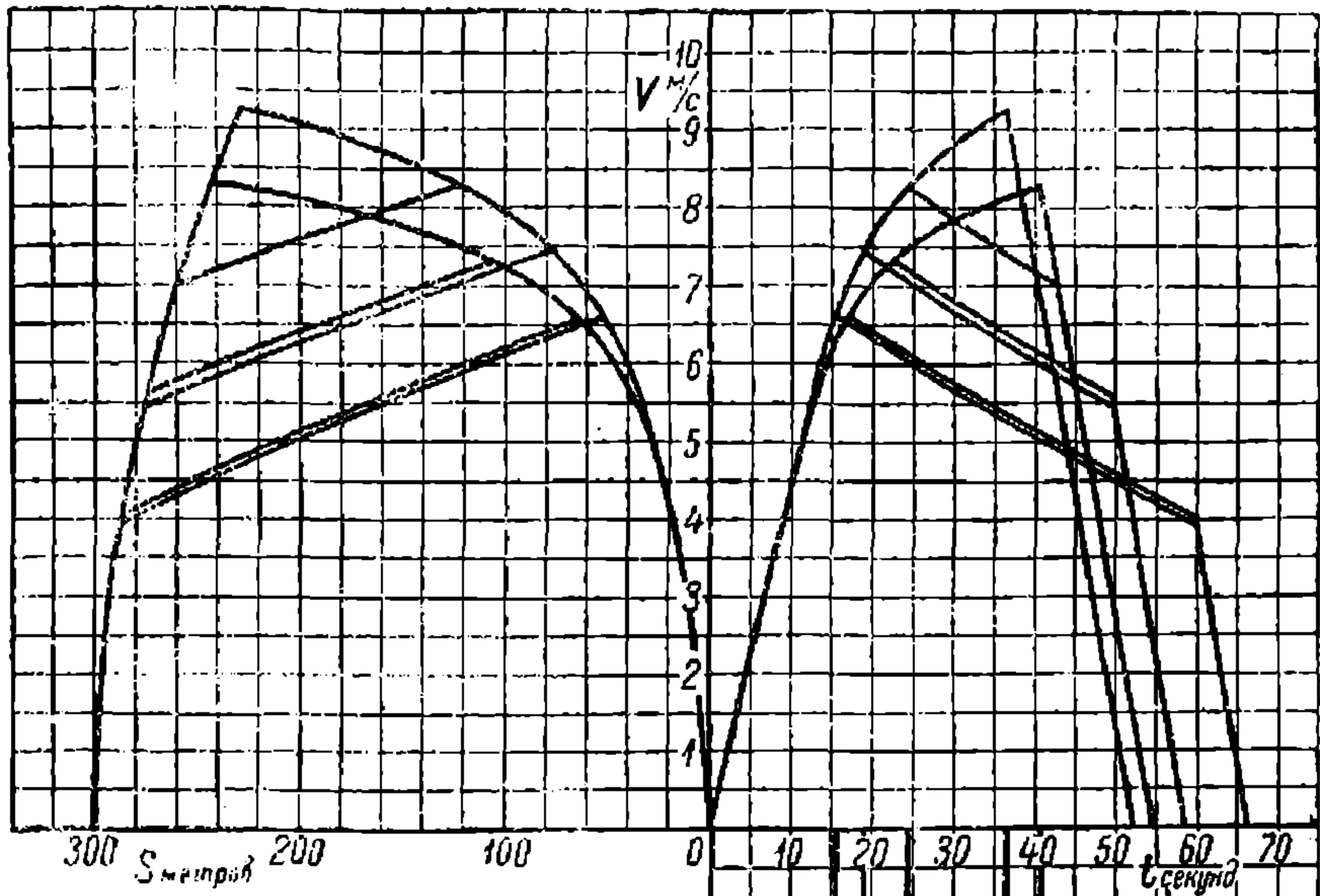


Рис. 9.

реостатов. Такой порядок перехода возможен, если процент ослабления поля не велик или если до рабочей ступени шунтировки мы имеем несколько переходных ступеней ослабления поля. Если процент ослабления потока большой, но ступень шунтировки одна, то для устранения большого толчка тока приходится при переходе

от полного поля к шунтировке включать пусковой реостат. Это влечет за собою появление потерь в реостате и выгоды шунтировки в отношении экономии энергии несколько снижаются.

Усиление потока двигателя, как известно, понижает скорость движения и увеличивает силу тяги. В связи с этим усиление потока целесообразно применять при разгоне поезда. Покажем это.

Пусть диаграмма остаточной силы тяги $f - w_0 = \varphi(V)$ и диаграмма поглощаемого при ней тока, изображенные на рис. 11 сплошными

линиями, относятся к работе двигателя при нормальном возбуждении. Диаграмма разгона поезда $V = \varphi(t)$, соответствующая названной кривой ($f - w_0$), дана на рис. 12 также в виде сплошной линии.

Дадим двигателю усиленное возбуждение. Строим характеристику двигателя при повышенном возбуждении¹ и находим для разных скоростей остаточную силу тяги, изобразим ее и соответствующий ей ток на диаграмме рис. 11 простым пунктиром. Как видим из диаграммы, та же пусковая сила тяги, которая была нами принята для разгона поезда при нормальном возбуждении двигателей, при усилении потока может быть реализована при меньшей силе тока. Обстоятельство это физически является совершенно понятным, так как момент вращения, а следовательно, и сила тяги, развиваемые двигателем, пропорциональны величине силы тока и потока. Повышая поток при том же моменте, мы должны понизить силу тока.

Если диаграмму $V = \varphi(t)$ разгона поезда при усилении возбуждения мы хотим оставить без изменения, то кривая силы тока в функции времени при разгоне под реостатами до скорости V_a должна изобразиться пунктирной линией $ABCD$ (рис. 12). Начиная от скорости V_a рядом ступеней шунти-

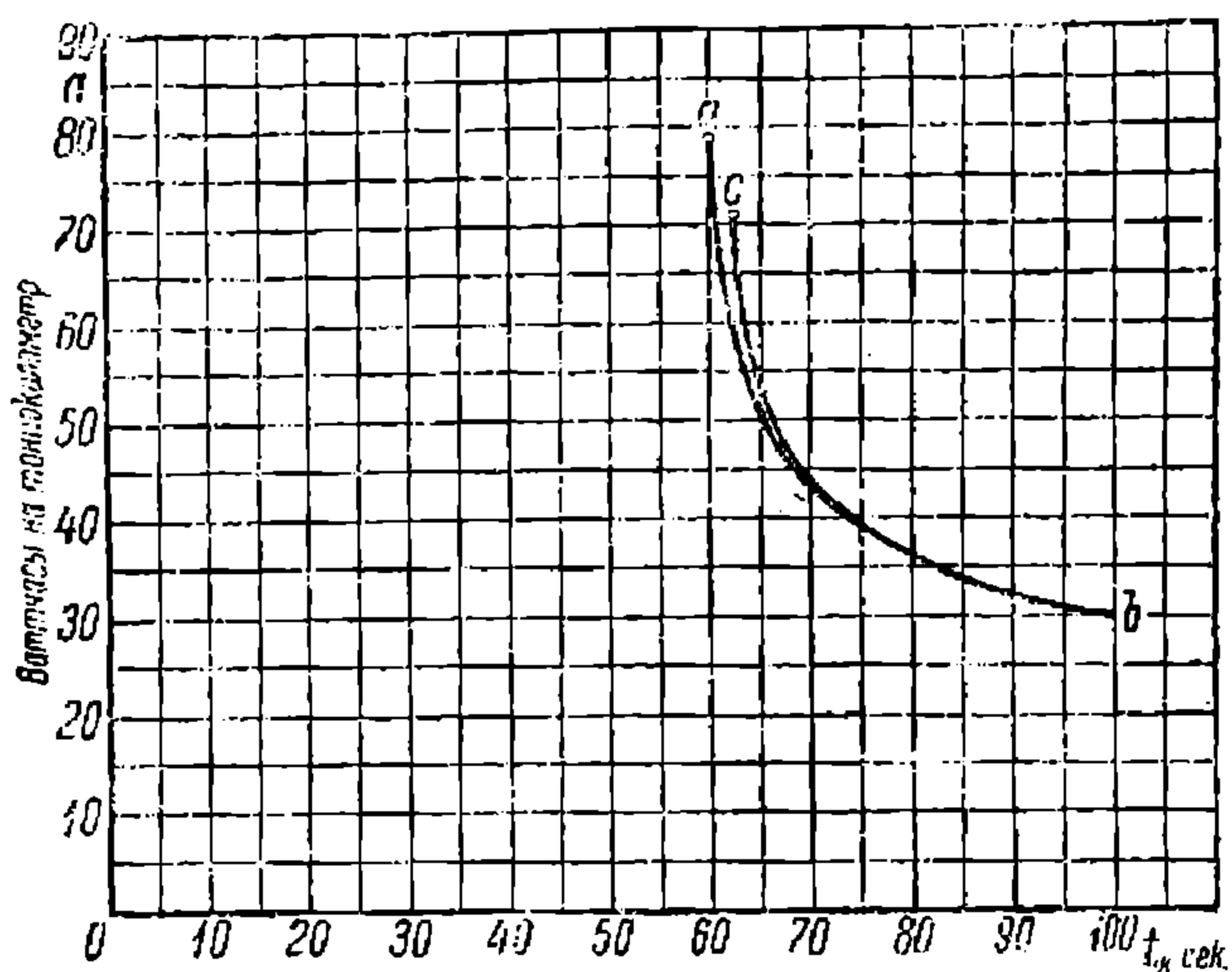


Рис. 10.

ровки при постоянной силе тяги, скорость поезда должна быть повышена до величины V_a' . Средняя сила тока при этом возрастет от величины J_a до величины J_a' . Кривая силы тока в функции времени в интервале скоростей от V_a до V_a' изобразится на рис. 12 линией DEF .²

Из сопоставления кривых силы тока в обоих рассматриваемых нами случаях мы видим, что разгон при усилении возбуждения дает экономию в расходе энергии: при одной и той же диаграмме движения площадь кривой силы тока в перевозбужденном двигателе будет меньше. Эта экономия получается за счет сокращения потерь в пусковых реостатах. Что касается потерь в двигателе, то при усилении возбуждения они могут понизиться или возрасти. Механические потери двигателя, очевидно, остаются без изменений. Магнитные потери при усилении возбуждения, конечно, возрастают (благодаря увеличению потока при тех же скоростях). Джоулевы потери мощности при

¹ Метод построения этой характеристики см. В. А. Шевалин. Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев, 1931, стр. 17—23.

² Фактически ток будет возрастать ступенями.

нормальном возбуждении за время работы под реостатами равны $\frac{mJ_a^2 r_1}{4}$, при усилении же возбуждения они составляют $\frac{mJ_a'^2 r_2}{4}$, где m —

число двигателей, а r_1 и r_2 — сопротивление обмоток двигателя в первом и втором случае. Так как $r_2 > r_1$, а $J_a' > J_a$, то избыток потерь в меди будет определяться соотношением указанных сопротивлений и токов двигателя. Расход энергии на преодоление сопротивления поезда

и потери в тормозах, очевидно, при одной и той же диаграмме движения будет один и тот же.

Рассмотренный метод пуска имеет тот недостаток, что кривая силы тока, поглощаемого двигателем между скоростями V_a и V_a' , имеет резкий скачок DEF , вызванный желанием сохранить при ослаблении поля неизменной начальную пусковую силу тяги. Сохранение силы тяги на указанной высоте часто не

дает особо больших преимуществ, так как интервал скоростей от V_a до V_a' велик. С другой стороны, скачок тока повышает толчковую нагрузку подстанций и может вызвать повышение их мощности, а также увеличение падения напряжения в

контактной линии. Ввиду этого зачастую может оказаться выгодным понизить силу тяги в интервале скоростей от V_a до V_a' с таким расчетом, чтобы пусковая сила тока при этом сохранила ту величину J_a , которую она имеет при работе с усиленным возбуждением (см. пункт с точ-

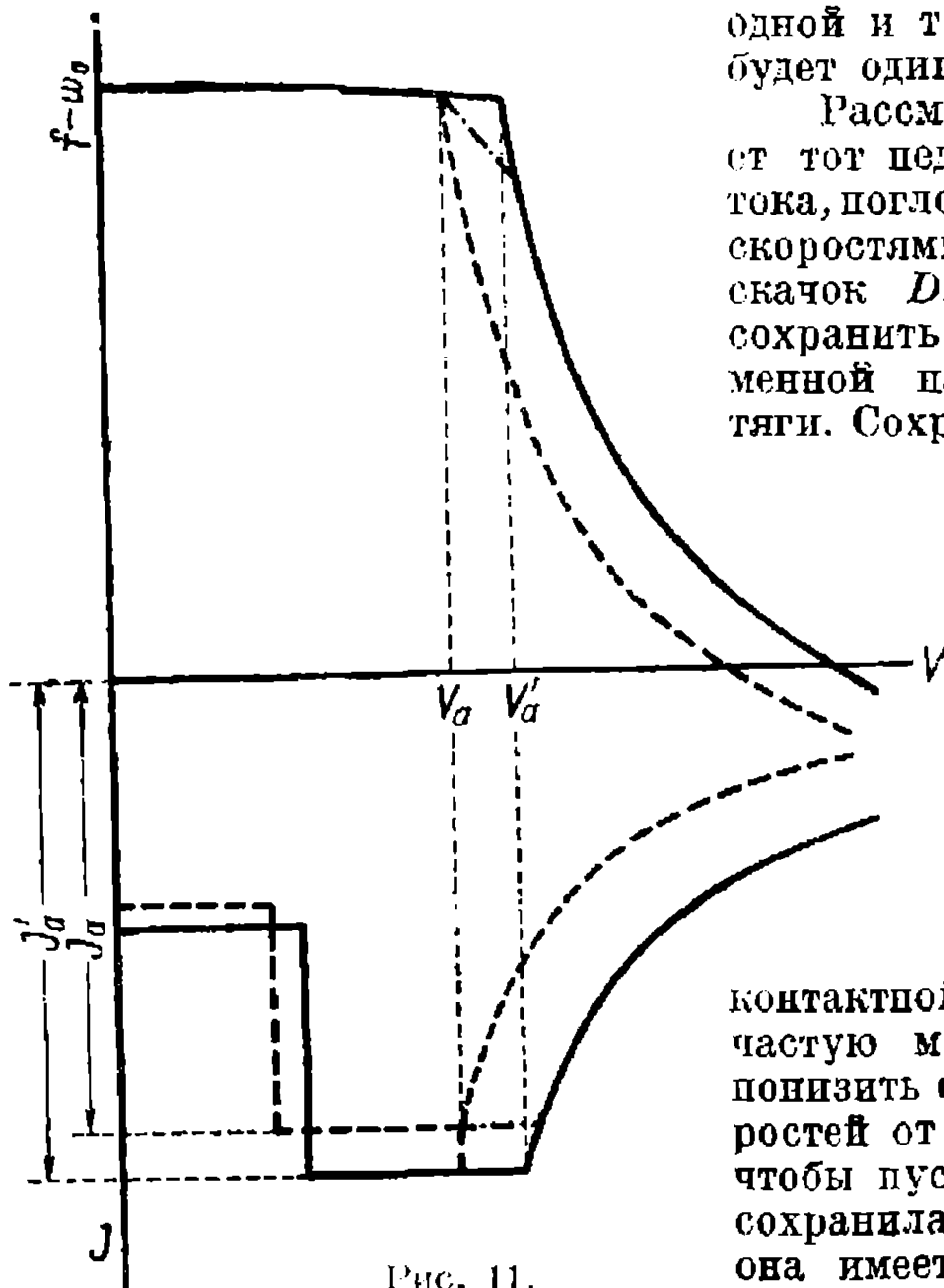


Рис. 11.

ками на рис. 12). Если переход от скорости V_a до скорости V_a' происходит путем ряда ступеней шунтирования, то средняя кривая остаточной силы тяги изменяется по кривой, указанной пунктиром с точкой на рис. 11. Кривая силы тока в функции времени от момента взятия с места до выхода на автоматическую характеристику изобразится на диаграмме рис. 12 линией $ABCG$. Диаграмма движения поезда под током, начиная от скорости V_a , пойдет ниже диаграммы, относящейся к разгону в первом рассмотренном нами случае, а диаграмма силы тока расположится несколько выше (см. пункт с точкой). В связи с этим при данном времени хода потери в тормозах возрастут и время хода под током несколько увеличится. Экономия в расходе энергии по сравнению с первым методом разгона несколько уменьшится.

Два варианта перехода на рабочую автоматическую характеристику при постоянной пусковой силе тока или постоянной пусковой силе тяги, очевидно, возможны и в том случае, когда шунтировка имеет целью ослабить поток двигателя на рабочей характеристике (см. стр. 19).

Двигатель с усилением возбуждения при разгоне может быть использован еще несколько иным путем. Для того, чтобы при усилении поля при разгоне сохранить пусковую силу тяги нешунтированного двигателя, в рассмотренном выше случае необходимо было понизить силу пускового тока по сравнению с пусковым током при отсутствии шунтировки. Разгон шунтированного двигателя таким образом производился при пониженной мощности. Ту же заданную пусковую силу тяги мы, очевидно, могли бы получить при шунтировке, сохранив пусковой ток нешунтированного мотора, но понизив передаточное число зубчатой передачи. Пуск двигателя при этом был бы произведен без понижения пусковой мощности. Кривая остаточной силы тяги, которую мы при этом получим, даст нам большие ходовые скорости. Таким образом рассматриваемый случай в отношении скоростей и расходов энергии должен дать нам результаты, близкие к результатам более мощного двигателя с усилением его возбуждения при разгоне, но при понижении пускового тока.

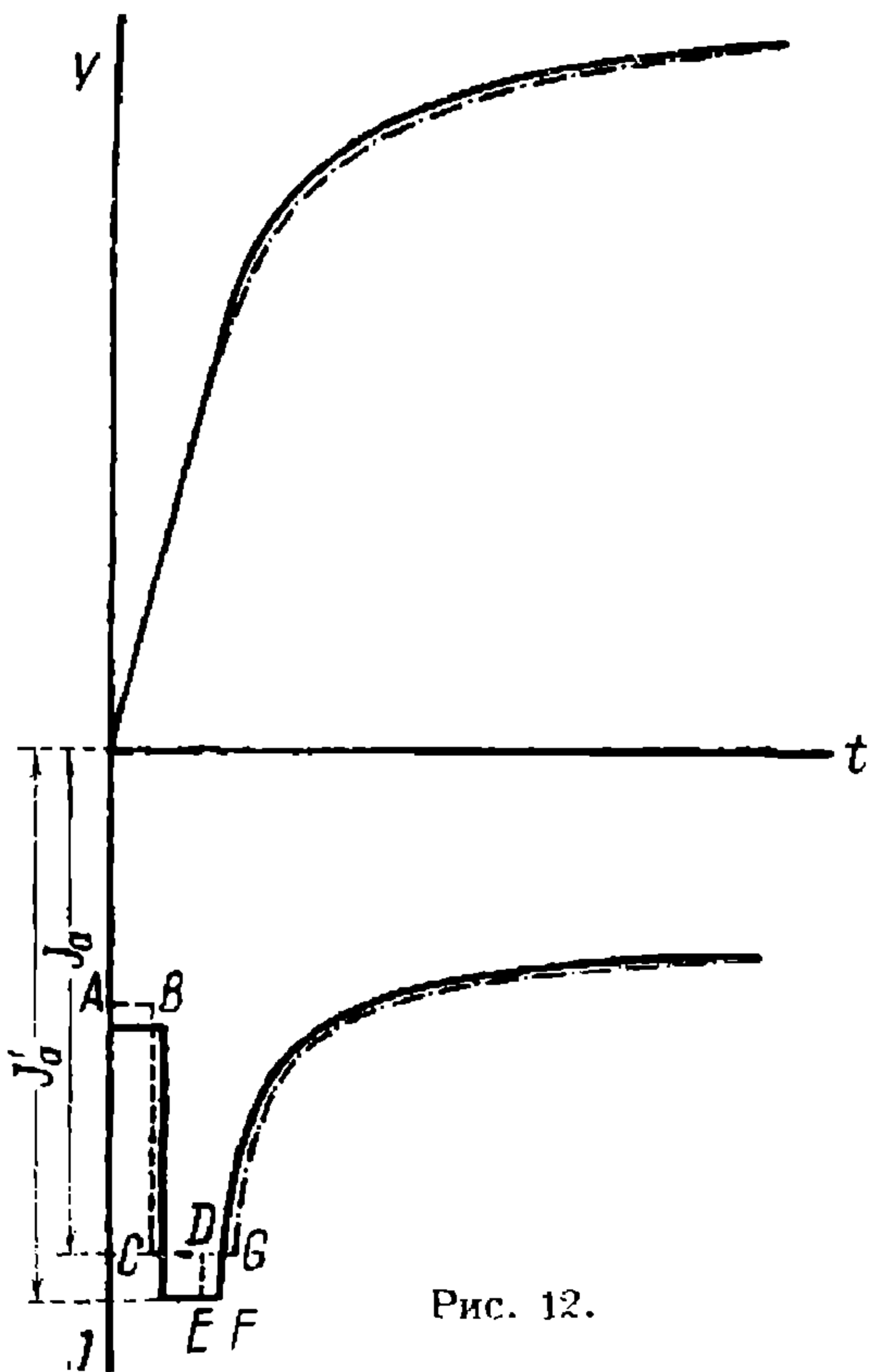


Рис. 12.

Влияние ослабления поля на нагрев тягового электродвигателя

Определение нагревания тягового электродвигателя, работающего частично при полном поле, частично при шунтировке, представляет еще большие трудности, чем определение нагрева двигателя, имеющего всегда полное возбуждение. Легко видеть, что метод среднего квадратичного тока не может дать в этом случае верного представления о действительном нагреве, получаемом двигателем при работе. В самом деле, если мы подсчитаем среднее квадратичное значение тока, поглощаемого двигателем, мы фактически найдем средний квадратичный ток, проходящий через якорь и добавочные полюса, и не учтем понижения потерь в главных полюсах при шунтировке. Если ослабление поля производится путем включения шунта параллельно всей обмотке возбуждения, то, находя среднеквадратичный ток главных полюсов, мы

недооценим повышение температуры двигателя благодаря нагреву якоря при полном токе и при наличии значительного влияния железных потерь. В том случае, когда ослабление потока достигается выключением части обмотки возбуждения, через часть обмотки возбуждения проходит полный ток, тогда как в другой ее части совершенно отсутствуют потери. Некоторую трудность представляет также установление продолжительного тока при смешанной работе с шунтировкой и без нее, так как этот ток, вообще говоря, будет отличаться от продолжительного тока как при полном, так и при ослабленном поле. Расчет по потерям во всех активных частях машины (по нагревающим потерям) должен дать лучшие результаты, однако и он заключает в

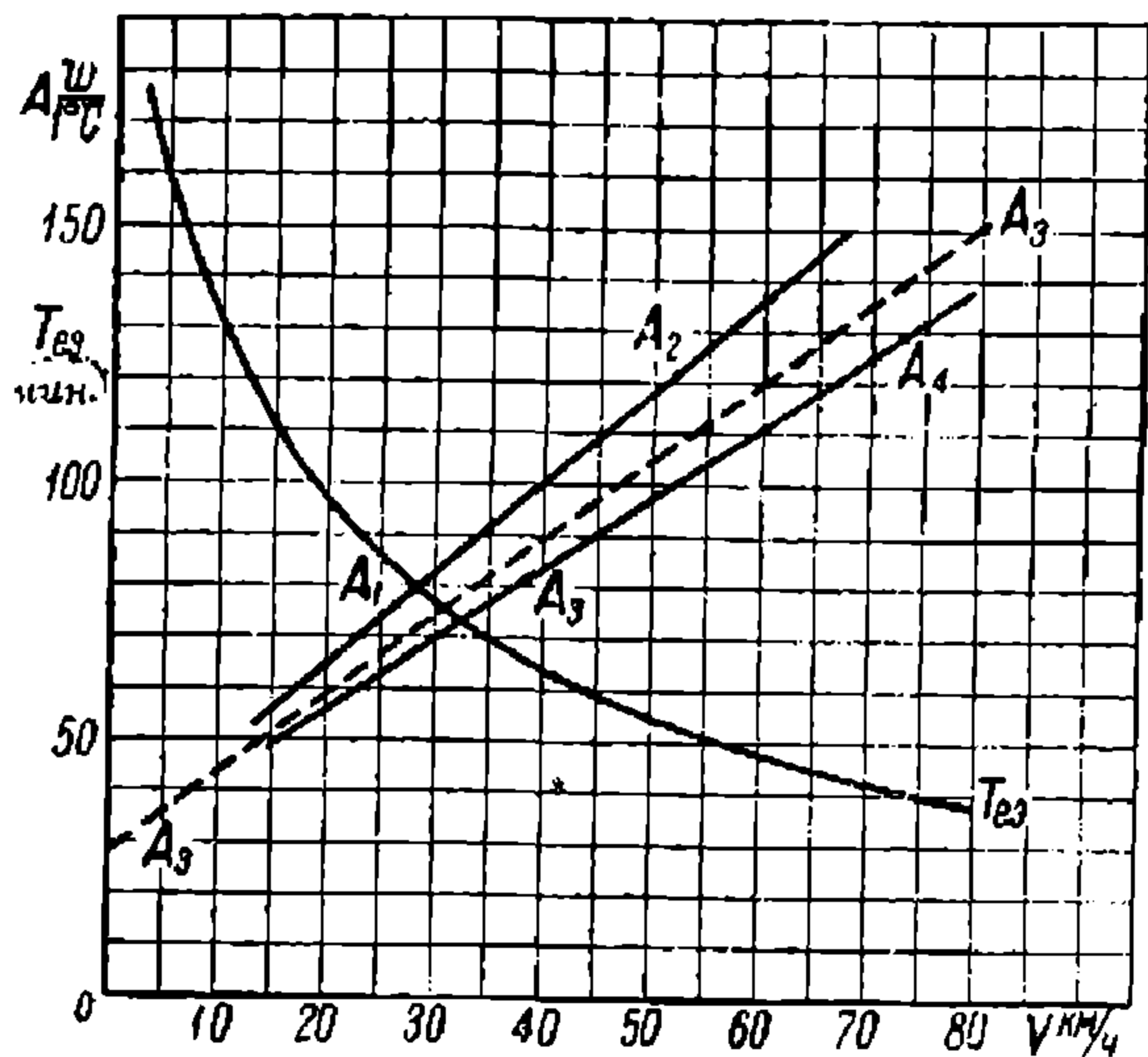


Рис. 13.

себе существенные неточности благодаря трудности определить истинную теплоотдачу при сильно изменяющемся соотношении нагревов главных полюсов и якоря при работе на линии с полным полем и с шунтировкой.

Как мы знаем, проверка двигателя на нагревание может быть произведена либо путем подсчета тех колебаний температуры, которые двигатель испытывает при работе в поезде, либо путем определения средней его температуры или эквивалентного тока, соответствующих режиму нагрузки двигателя.

В очень большом числе случаев практики может ока-

заться достаточным определение средних температур, получаемых двигателем. При этом можно воспользоваться изложенным ниже методом определения нагрева.

Как мы знаем, тяговые двигатели, продолжительно работающие на линии, через некоторое время после начала своей работы подходят к установившемуся тепловому режиму. При этом режиме, очевидно, имеет место наибольший нагрев. Поставим себе задачей проверить двигатель на нагревание в том случае, когда колебания его температуры при установившемся тепловом режиме будут незначительны. Этот случай мы встречаем на пригородных жел. дорогах, метрополитенах и трамваях при движении поезда по однородным перегонам или на магистральных линиях с однородным профилем.

Обычно для двигателя с регулировкой поля даются четыре продолжительные мощности. Две относятся к полному, две — к половинному напряжению. При каждом из этих напряжений одна из мощностей определяется для полного возбуждения, другая для шунтировки. Устанавливаем для каждой из этих мощностей полные потери W_{∞} , нагревающие активные части двигателя. Эти потери приближенно можно

принять равными полным потерям двигателя за вычетом механических потерь в передаче, подшипниках и вентиляторе.

Имея потери для каждой из продолжительных мощностей, находим теплоотдачу A . Она равна

$$A = \frac{W_{\infty}}{\vartheta_{\infty}}, \quad (15)$$

где ϑ_{∞} — допустимое по нормам превышение температуры поверхности обмоток двигателя при продолжительной мощности, зависящее от сорта

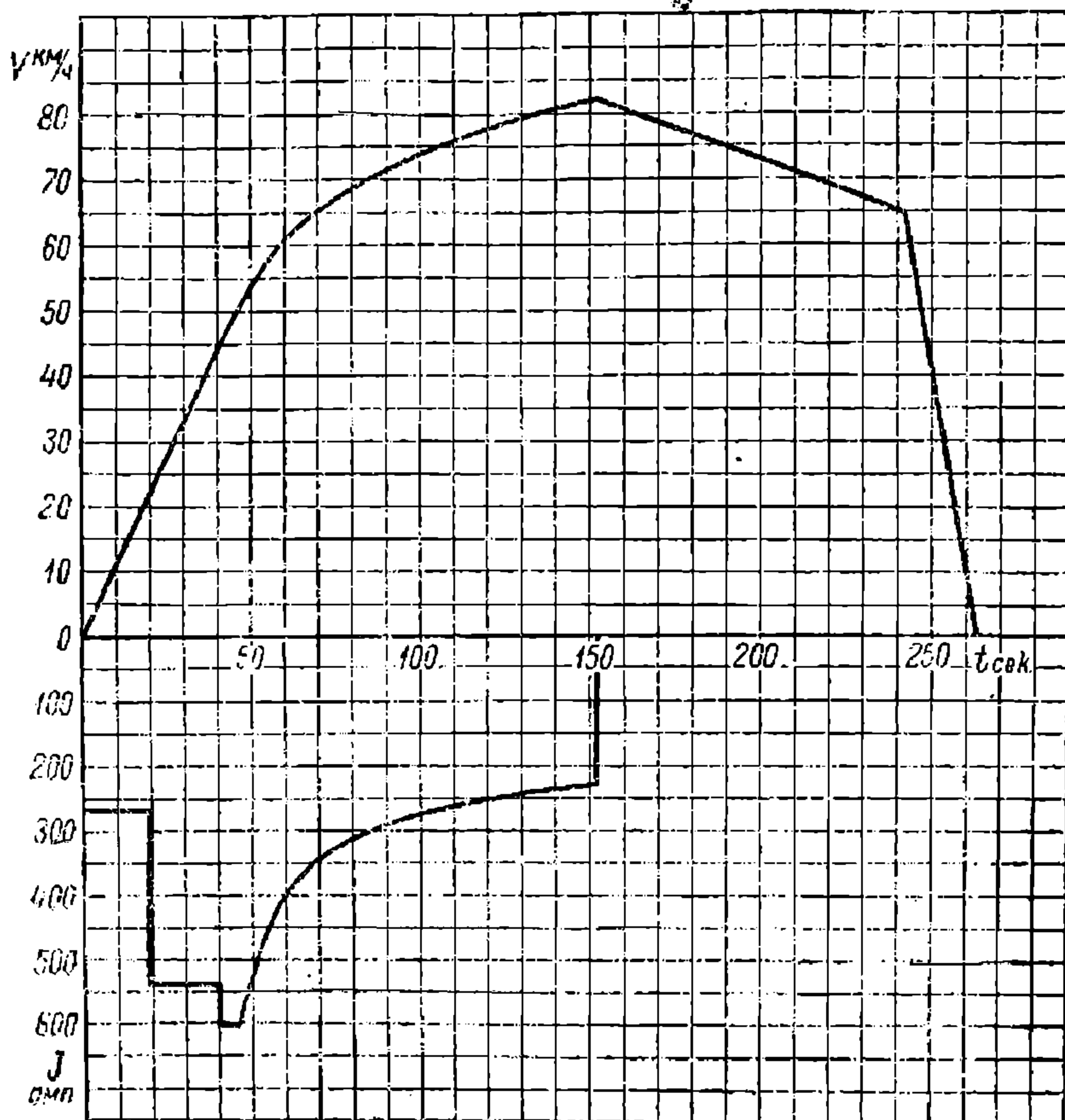


Рис. 14.

изоляции. Определяем предварительно теплоотдачу двигателя для работы с полным возбуждением. Для этого находим теплоотдачи A_1 и A_2 для двух мощностей при указанном возбуждении и, полагая, что величина A изменяется в прямолинейной зависимости от скорости поезда, строим диаграмму теплоотдачи на рис. 13 в виде линии A_1A_2 . Аналогичным образом находим теплоотдачи A_3 и A_4 для двух продолжительных мощностей при шунтировке. На этой же диаграмме рис. 13

в виде линии A_3A_4 , строим зависимость A от скорости поезда при ослабленном поле.

Мы видим, что теплоотдача двигателя при полном возбуждении отличается от теплоотдачи при ослабленном поле. Обычно при полном возбуждении теплоотдача выше. Это объясняется тем, что при полном возбуждении все части двигателя имеют более равномерный нагрев и охлаждающий воздух хорошо используется. При шунтировке чаще всего главные полюса дают некоторый перегрев, и использование охлаждающего воздуха снижается.

Предположим, что на рис. 14 дана диаграмма движения поезда по типовому перегону дороги с применением шунтировки.

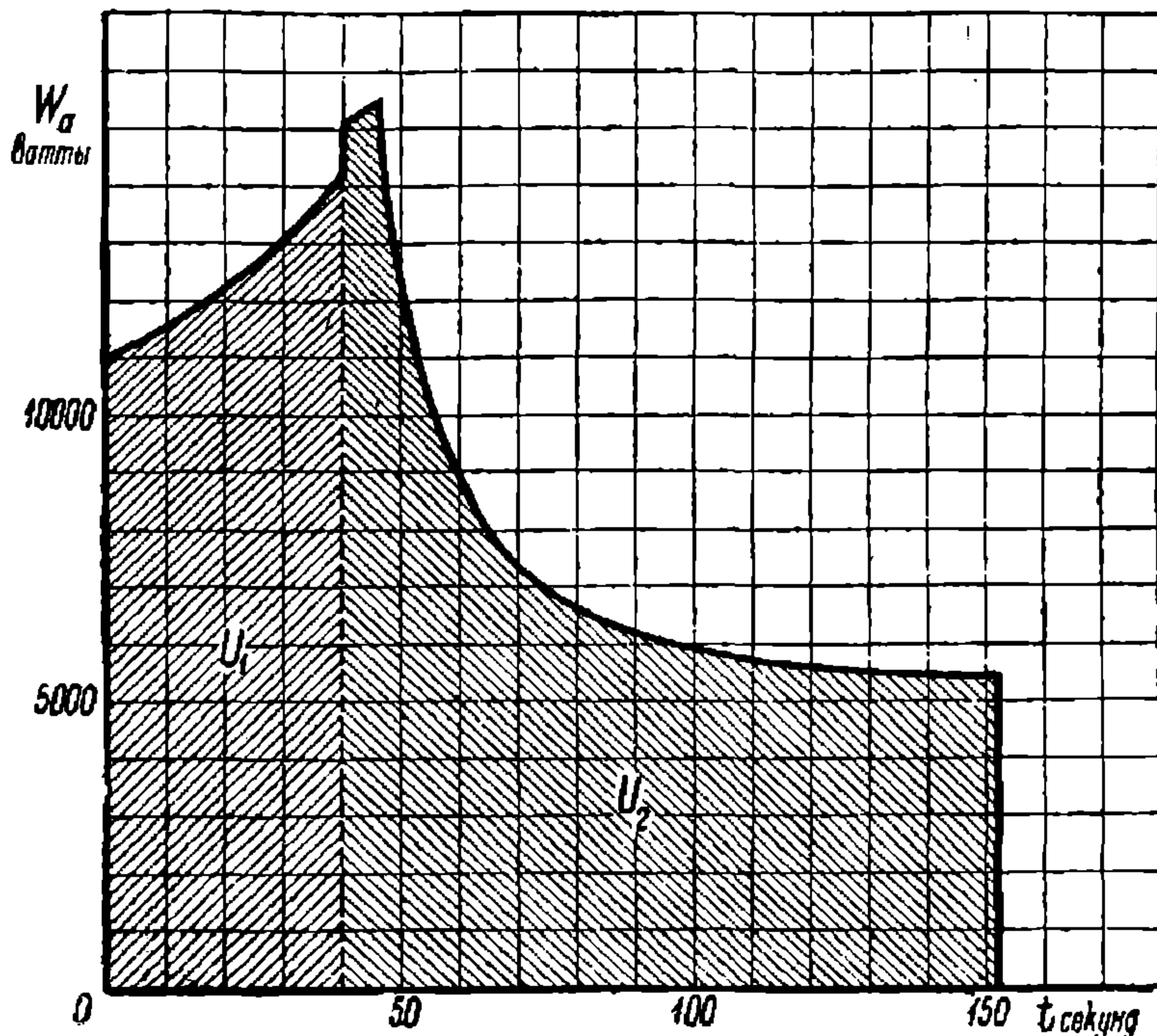


Рис. 15.

Основываясь на этой диаграмме движения и на данных о потерях мощностей в двигателе, строим в функции времени потери W_a в ваттах, отражающиеся на нагреве обмоток. Построение выполнено на рис. 15.

Расчленим диаграмму рис. 15 на две части: часть, относящуюся к работе с полным полем, и часть, относящуюся к шунтировке. Площадь первой части диаграммы дает нам потерю энергии U_1 ваттсекунд, площадь второй— U_2 ваттсекунд. Если продолжительность цикла работы двигателя (в нашем случае продолжительность пробега перегона, включая длительность остановки) равна t , то средние потери в двигателе будут равны

$$W_0 = \frac{U_1 + U_2}{t}. \quad (16)$$

Мы найдем среднее установившееся превышение температуры, если определим эквивалентную теплоотдачу двигателя при смешанной работе с полным полем и шунтировкой.

Эквивалентная теплоотдача будет определяться распределением потерь в машине. Если бы двигатель работал все время при полном возбуждении, то распределение потерь соответствовало бы этому режиму и теплоотдача была бы, очевидно, равна теплоотдаче при полном поле. Если бы двигатель частично работал при полном, частично при ослабленном поле, то он имел бы некоторую среднюю эквивалентную теплоотдачу. Если при данном режиме работы доминировали бы потери при полном поле, то нагревы отдельных частей машины были бы близки к нагревам при полном возбуждении и значение эквивалентной теплоотдачи лежало бы ближе к этому возбуждению. Обратное, если бы мы имели перевес потерь при ослаблении потока, теплоотдача была бы ближе к теплоотдаче при шунтировке. В соответствии с этим эквивалентная теплоотдача может быть принята равной

$$A_e = \frac{A_n U_1 + A_m U_2}{U_1 + U_2}, \quad (17)$$

где A_n и A_m — теплоотдачи при полном поле и шунтировке при средней скорости поезда, подсчитанной с учетом остановок на станциях.

Так как установившаяся средняя температура поверхности обмоток двигателя равна

$$\tau = \frac{W_c}{A_e},$$

то на основании формул (16) и (17) мы можем написать, что

$$\tau = \frac{(U_1 + U_2)^2}{t(A_n U_1 + A_m U_2)}. \quad (18)$$

Если перегоны дороги неоднородны как по профилю, так и по протяжению, то проверка двигателя на нагревание может быть произведена путем построения кривой изменения температуры двигателя при работе его в поезде. Приблизительно эту кривую можно построить по точкам изложенным ниже методом.

Строим диаграмму движения поезда и на основе ее производим построение диаграммы нагревающих потерь W_a в двигателе в функции времени. Эта диаграмма аналогична диаграмме рис. 15. Расчленим построенную диаграмму на площади, соответствующие работе при полном и при ослабленном поле. Находим по площадям потери энергии U_1 при полном поле и потери энергии U_2 при ослабленном поле.

Обращаемся к диаграмме теплоотдачи двигателя (рис. 13). Учитывая, что периоды работы двигателя с полным полем чередуются с работой двигателя при ослабленном поле, находим эквивалентную теплоотдачу двигателя в этих условиях. Для данной скорости движения эта эквивалентная передача может быть найдена по формуле (17).

Имея диаграммы теплоотдачи, изображенные на рис. 13 в виде линии $A_1 A_2$ для полного и в виде линии $A_3 A_4$ для ослабленного поля, находим эквивалентную теплоотдачу для двух любых скоростей и по двум точкам строим диаграмму $A_e A_e$ эквивалентной теплоотдачи в функции скорости.

Далее находим постоянную времени двигателя T_e . Для этого определяем величину T_e для часовой мощности. Как известно,¹ она может быть найдена по формуле

$$T_e = \frac{-60 \lg c}{\lg \left[1 - \frac{A_v \tau_v}{W_v} \right]} = \frac{-26,04}{\lg \left[1 - \frac{A_v \tau_v}{W_v} \right]}, \quad (19)$$

где
 A_v — теплоотдача двигателя при часовой мощности. Она может быть определена по диаграмме теплоотдачи на рис. 13 по часовой скорости;
 τ_v — допустимая по нормам сверхтемпература при часовой мощности;
 W_v — нагревающие потери при часовой мощности.

Таким образом мы находим величину T_e для часовой мощности при полном и часовой мощности при ослабленном поле. Имея теплоотдачу двигателя для тех же режимов, находим теплоемкость двигателя для тех же случаев возбуждения. Как известно,²

$$C = \Delta T_e. \quad (20)$$

Таким образом мы получаем теплоемкость C^1 для полного возбуждения и теплоемкость C'' для ослабленного поля. При том режиме работы, которую будет иметь наш двигатель на линии, эквивалентная теплоемкость, аналогично эквивалентной теплоотдаче, может быть определена по формуле

$$C_s = \frac{C^1 U_1 + C'' U_2}{U_1 + U_2}. \quad (21)$$

Считая, что эта теплоемкость остается постоянной при всех режимах работы, строим кривую изменения величины эквивалентного T_e в функции скорости. Очевидно, что

$$T_{e_s} = \frac{C_s}{A_s}. \quad (22)$$

Кривая T_{e_s} строится по точкам, причем берутся для каждого значения скорости значения A_s из диаграммы эквивалентной теплоотдачи (рис. 13). Для нашего примера кривая T_{e_s} построена на рис. 13.

Таким образом мы получаем кривую изменения теплоотдачи A и постоянной времени T_e в функции скорости. Имея эти кривые, можно обычным способом определить колебания температуры двигателя при любом режиме работы. Расчет нагревов основывается на общеизвестной формуле:

$$r = \frac{W_a}{A} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_e}} \right] + \tau_0 e^{-\frac{t}{T_e}} \quad (23)$$

где
 W_a — нагревающие потери в двигателе при данном режиме работы.

¹ См. В. А. Шевалин. Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев, 1931, стр. 93.

² Ibid, стр. 67.

Величины A и T_0 в нашем случае представляют собою эквивалентные теплоотдачу и постоянную времени. Для двигателей с независимой (принудительной) вентиляцией величины A и T_0 можно приближенно считать постоянными.

Так как методы расчета нагревания двигателя по формуле (23) неоднократно излагались в литературе,¹ мы не будем на них здесь останавливаться.

Мы изложили приближенный подсчет нагрева двигателя, основанный на определении теплоотдачи A и постоянной времени T_0 машины по данным о часовой и продолжительной ее мощности. Значительно точнее задача может быть разрешена, если мы будем основывать наши расчеты на кривых зависимости величин T_0 и ϑ от нагрузки, полученных для ряда режимов работы двигателя при полном напряжении. Порядок получения таких кривых из опыта изложен в книге автора „Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев“, Ленинград, 1931, стр. 85 и 86, а расчету нагрева на основе этих данных посвящены страницы 299—314 гл. VIII той же книги.²

В двигателях с шунтировкой величины T_0 и ϑ надлежит определять для разных нагрузок как при полном, так и при ослабленном возбуждении. К сожалению, заводы, строящие тяговые двигатели, редко производят полное тепловое их испытание, а потому данные для точного расчета нагрева в настоящее время получить затруднительно.

¹ См. напр. В. А. Шевалая. Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев, 1931, глава VIII.

² См. также общие выводы, изложенные на стр. 100 „Тяговых расчетов электрических жел. дорог и трамваев“.

Г Л А В А II

Выбор пускового тока и передаточного числа зубчатого механизма для данного двигателя

I. Выбор пускового тока при заданной зубчатой передаче

Предположим, что самый двигатель и передаточное число зубчатого механизма двигателя нам заданы. Выясним, какое влияние на условия движения поезда и на расход электрической энергии может оказать изменение пускового тока (пусковой мощности) двигателя.

Если передаточное число зубчатой передачи нам дано, мы имеем вполне определенные автоматические характеристики двигателя, отнесенные к ободу сцепных колес. Для вполне определенных автоматических характеристик мы получаем вполне определенную диаграмму остаточной силы тяги в той части этой диаграммы, которая относится к работе двигателей без пусковых реостатов. Иными словами, для данного двигателя при данной передаче мы получаем вполне определенную ветвь AB кривой остаточной силы тяги (рис. 16). Влияние пускового тока будет сказываться в том, что при различных пусковых токах мы будем иметь различные пусковые силы тяги. Таким образом для работы двигателей под реостатом при разных пусковых токах мы будем иметь разные значения остаточной силы тяги. Отсюда следует, что при различных пусковых токах при данной передаче мы будем иметь различные ускорения при разгоне поезда. Обозначим эти ускорения соответственно через u_1 , u_1' , и u_1'' . Чем больше пусковой ток, тем большее ускорение мы получим. На диаграмме рис. 16 в четвертом координатном угле даны кривые изменения тока, соответствующие различным пусковым режимам.

Диаграммы движения поезда под током при различных ускорениях будут различаться начальной своей частью (рис. 17), скорость же установившегося движения при всех пусковых мощностях будет одной и той же. Построение кривых разгона, изображенных на рис. 17, очень просто. Для построения прежде всего необходимо найти кривую разгона для наибольшего ускорения u_1 (см. кривую OA на рис. 18). Совершенно очевидно, что часть кривой разгона, лежащая выше скорости V_a'' , для всех вариантов пусковых токов и для всех начальных ускорений будет одной и той же. Поэтому для построения начальной части кривой разгона для пускового тока J_u'' достаточно найти на кривой OA скорость V_a'' и провести в точку V_a'' прямую O_2V_a'' с наклоном, соответствующим

ускорению u_1'' . Разгон поезда при этом ускорении изобразится кривой O_2A . Аналогичным образом из точки O_1 проведена прямая O_1V_a' , соответствующая пусковому току J_a' и начальному ускорению u_1' . Кривая O_1A представляет собою разгон поезда при ускорении u_1' . Таким образом, для построения всех трех кривых разгона из одной точки O , нужно подвинуть кривую O_1A вправо на отрезок t_1 , а кривую O_2A в ту же сторону на отрезок t_2 . Таким порядком мы получим ряд кривых разгона, изображенных на рис. 17.

Кривые $V = \psi (s)$ строятся аналогичным образом (рис. 19)¹, с той лишь разницей, что для работы под реостатом мы имеем приблизительно параболическую кривую, построение которой для соответственного ускорения производится по уравнению $s = \frac{V_a^2}{2u_1}$.

Диаграммы $V = \psi (s)$, построенные от одной и той же точки, даны на рис. 20.

На рис. 21 изображены полные диаграммы $V = \phi (t)$ движения поезда на коротком перегоне для различных пусковых токов, но для одного и того же времени пробега перегона. Диаграммы соответствуют кривым остаточной силы тяги, изображенным на рис. 16, и кривым разгона, данным на рис. 17 и 20. Диаграмма рис. 21 показывает, что наименьшее из рассмотренных нами ускорений является вообще минимальным ускорением, при котором мы можем пройти наш перегон при заданном времени хода. Если бы мы еще снизили ускорение, то время пробега перегона увеличилось бы. Ток J_a'' , очевидно, для данного перегона при заданном времени хода является минимальным пусковым током.

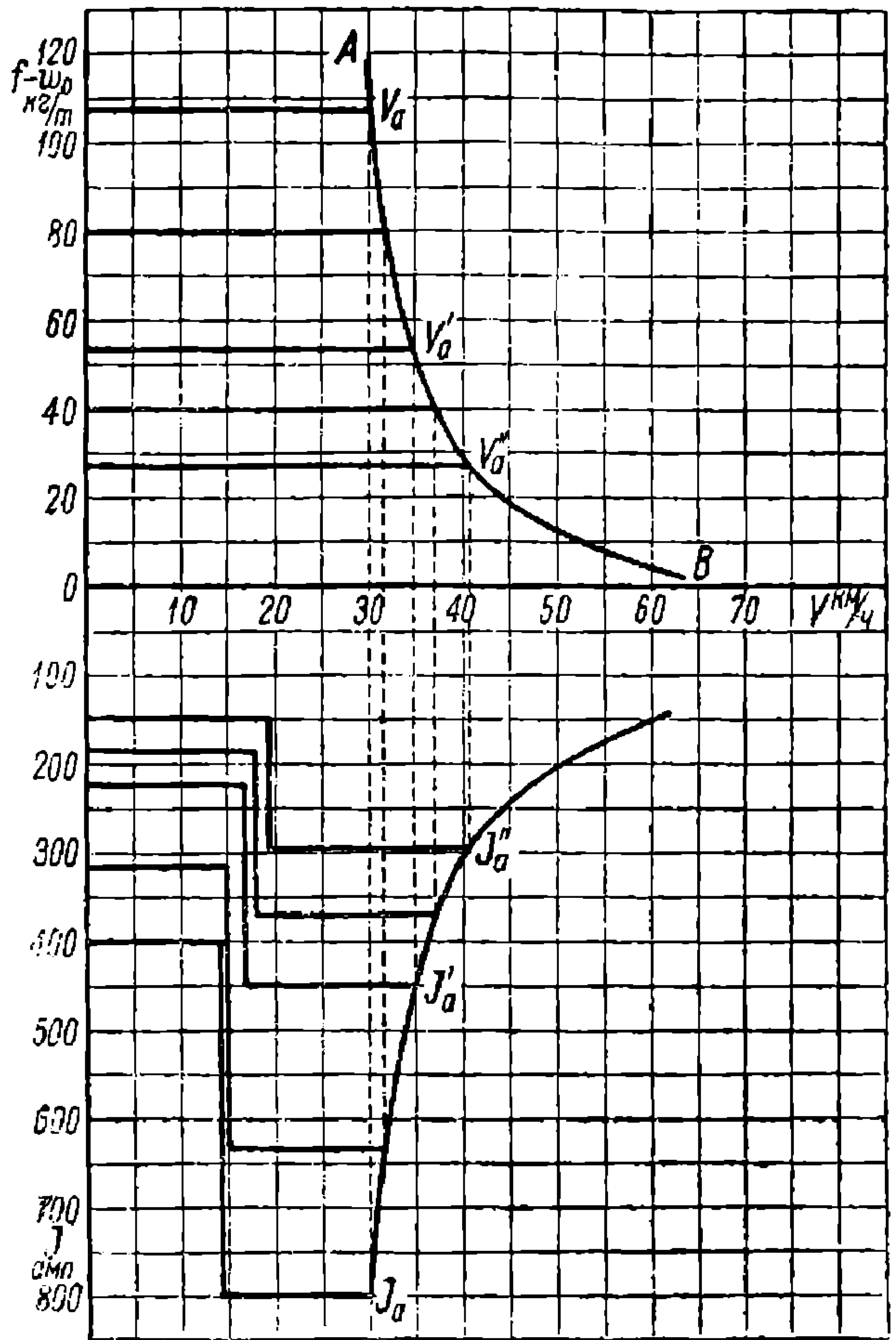


Рис. 16.

¹ На диаграмме рис. 19 для примера показано построение кривой $V = \psi (s)$ для разгона при пусковом токе J_a'' .

Легко видеть, что повышение пусковой силы тока благоприятно отражается на расходе энергии. На диаграмме рис. 22 изображена кривая удельного расхода энергии в функции величины пускового тока. Эта кривая могла бы быть также изображена в функции ускорения $w_1 = \frac{dV_a}{dt}$ при разгоне. Мы видим, что повышение пускового

тока снижает удельный расход энергии. Этот вывод совершенно понятен с физической точки зрения. При повышении пусковой мощности мы всегда имеем снижение скорости в момент начала торможения, следовательно, потери в тормозах при увеличении пускового тока уменьшаются. Что касается потерь в пусковых реостатах, то согласно фор-

муле (9) эти потери при увеличении пускового тока также снижаются. Это происходит благодаря тому, что ускорение w_1 в формуле (9) возрастает, а скорость V_a в момент выхода на автоматическую характеристику при повышении пускового тока падает. Так, например, при токе $J'_a = 450 \text{ А}$ в нашем примере она равна $V'_a = 35 \text{ км/час}$, а при токе $J_a = 800 \text{ А}$ скорость в момент выхода на автоматическую характеристику снижается до $V_a = 30 \text{ км/час}$. Те же

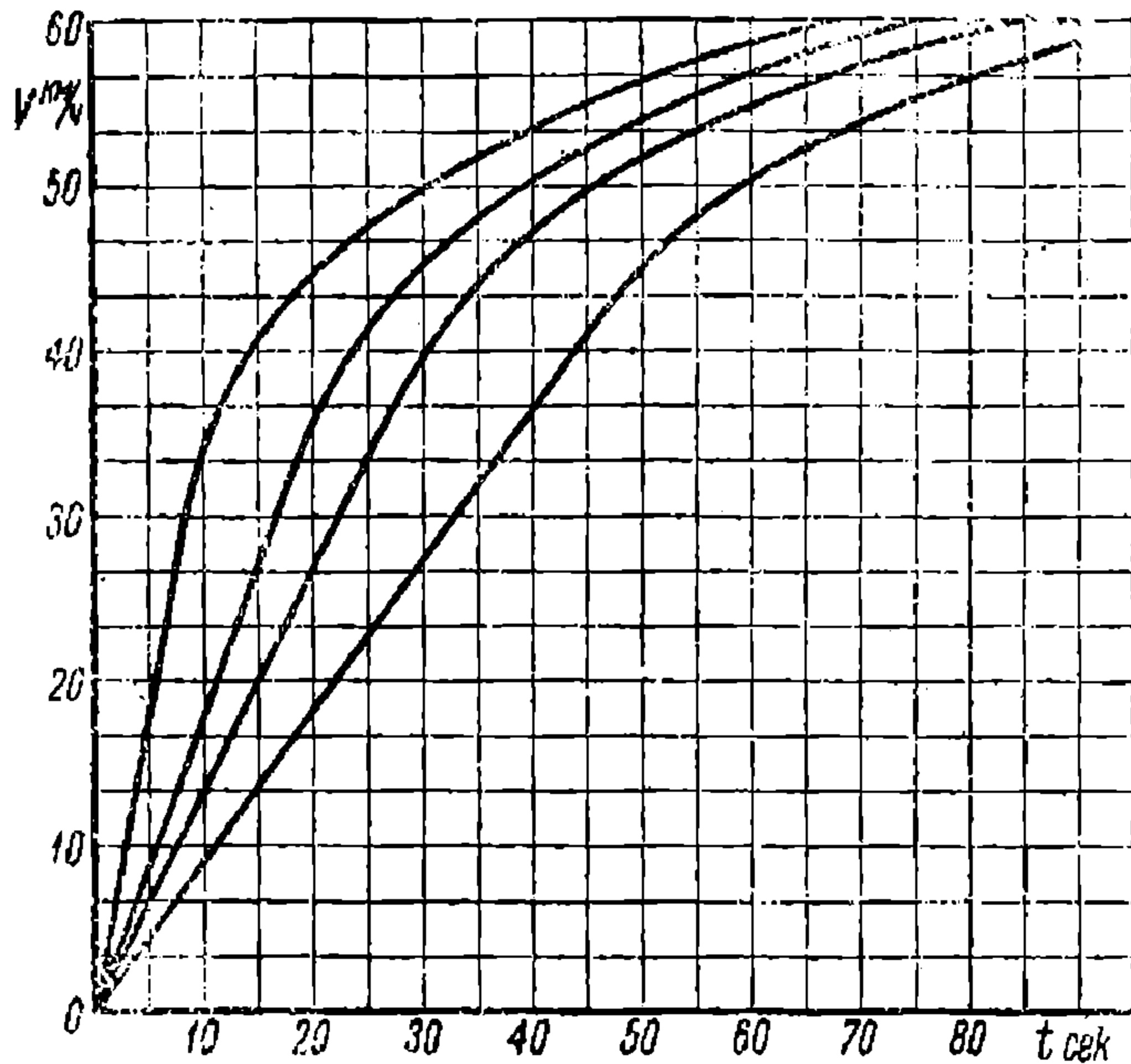


Рис. 17.

нению удельного расхода энергии мы можем сделать и по формулам (11) и (12).

Относительная выгода, которую может дать повышение пускового тока, уменьшается по мере удлинения перегона. На длинных перегонах потери в реостатах и тормозах составляют малый процент от общего расхода энергии, а потому экономия на этих потерях не так заметно снижает общий расход энергии на движение поездов.

Из изложенного мы можем сделать вывод, что при данном передаточном числе наибольший пусковой ток и наибольшее возможное ускорение с точки зрения расхода энергии являются наивыгоднейшими.

Этот вывод справедлив в том случае, если при повышении пускового тока не происходит заметного снижения коэффициента полезного действия двигателя. Если этот коэффициент сильно снижается, то при больших выбегах экономия на потерях энергии в тормозах и пусковых реостатах может поглотиться увеличением потерь в тяговых электро-

двигателях. Это подтверждается и формулами (11) и (12), если учесть, что η_c есть величина зависящая от пускового тока.

Очевидно, что в повышении пускового тока можно идти до тех пор, пока пусковая сила тяги не достигнет предела, допустимого по сцеплению между колесами и рельсом. Иногда на коротких перегонах диаграмма удельного расхода энергии (рис. 22) указывает, что повышение пусковой мощности за пределы, допустимые по сцеплению, может дать существенную экономию в расходе энергии. В этом случае может оказаться целесообразным увеличить сцепной вес поезда. Если мы вели расчет на применение поездной единицы из одного моторного и двух прицепных вагонов, может быть выгодным переход на поездную единицу

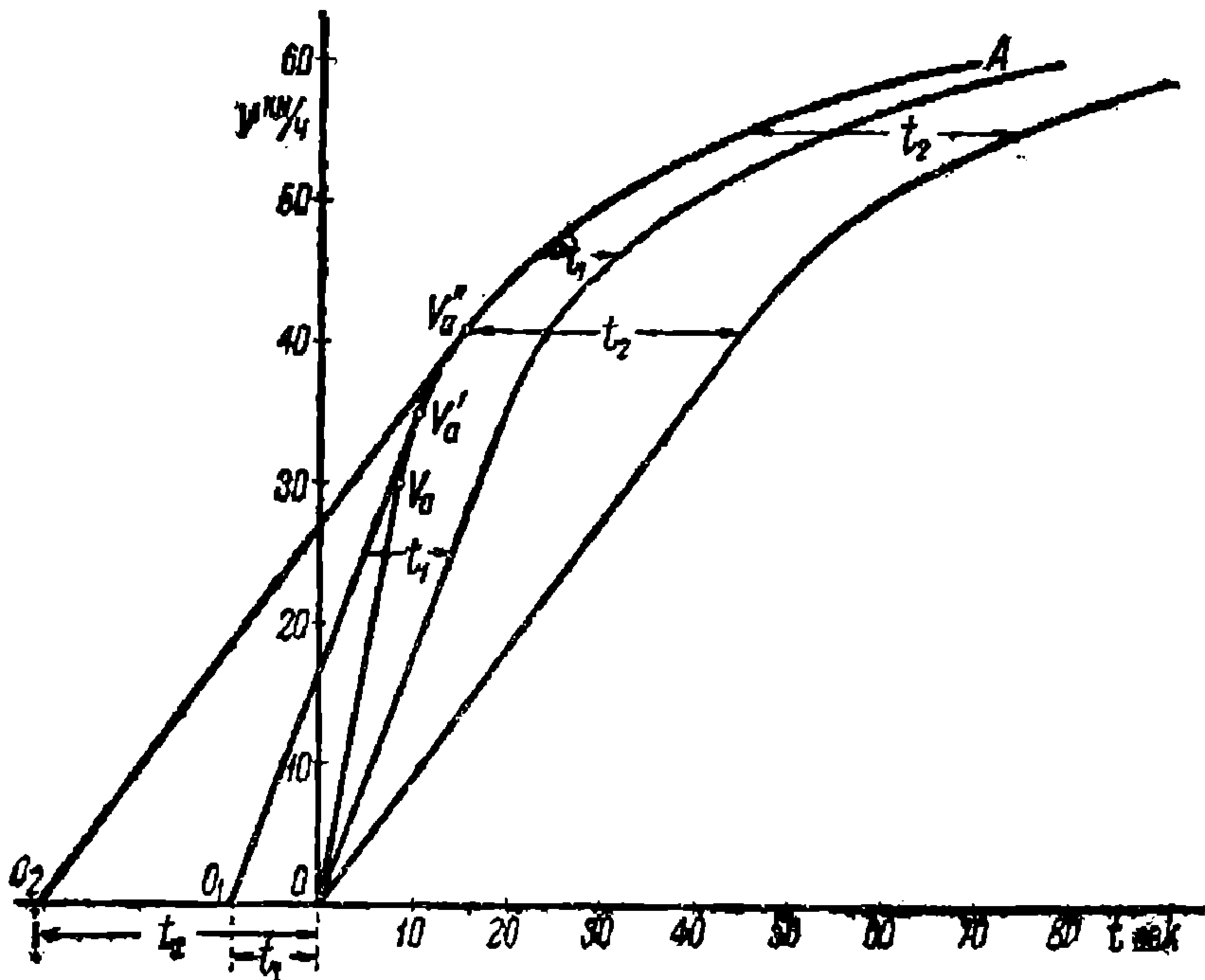


Рис. 18.

из одного моторного и одного прицепного вагона. Если были применены тележки максимальной тяги, может представиться экономичным применение двухмоторных тележек и т. д.

Повышение пускового тока ограничивается допустимой регулярной и частой перегрузкой двигателей. В современных двигателях не рекомендуется принимать частую перегрузку выше 75% от часового тока.

Недостатком увеличения пускового тока является то, что при этом увеличении мы повышаем толчковые нагрузки подстанций и увеличиваем максимальное падение напряжения в контактной линии. В связи с этим в некоторых случаях (особенно при редком графике движения поездов) может оказаться необходимым повысить сечение проводов контактной сети и увеличить мощность тяговых подстанций. Поэтому в каждом частном случае целесообразность повышения пускового тока может быть оценена с экономической точки зрения. Вообще же говоря,

нужно руководствоваться видом кривой удельного расхода энергии, изображенной на рис. 22. Кривая эта распадается на два участка: участок AB и BC . Мы видим по этой кривой, что повышение пускового тока от величины J_0'' до J_0 даст крупную экономию в расходе энергии. При дальнейшем повышении J_0 эта экономия мало заметна, а поэтому, чтобы не повышать толчковых нагрузок, это повышение не следует считать целесообразным.

Что касается минимального пускового тока J_0'' , то помимо расхода энергии таковой нельзя считать приемлемым потому, что при нем для заданного времени хода мы не имеем выбег, вследствие чего поезд не будет иметь возможности нагнать опоздавший.

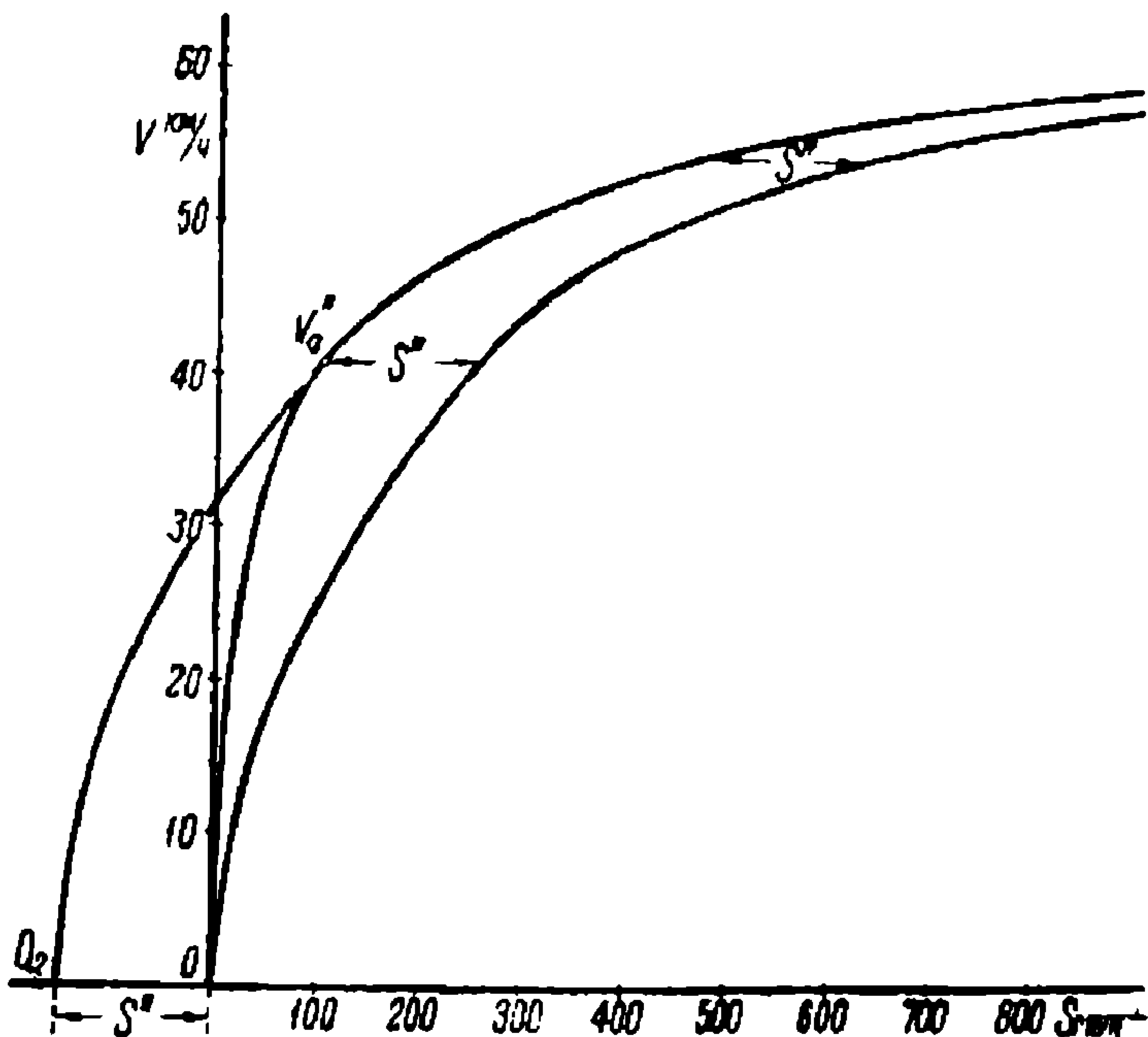


Рис. 19.

Мы рассмотрели влияние пусковой мощности на расход энергии при данном времени пробега перегона. Если это время не задано, то при данном расходе энергии при увеличении пускового тока мы получим повышение средней скорости движения поезда.

Рассмотрим влияние пускового тока на нагрев тягового электродвигателя.

Произведем проверку двигателя на нагревание приближенно методом среднего квадратичного тока. На диаграмме рис. 23 в виде линии ab построена зависимость среднего квадратичного (эквивалентного) тока I , в функции пускового тока поезда J_0 .

Очевидно, что выбирая пусковой ток и руководствуясь расходом энергии, мы можем выбрать только такой пусковой ток, при котором I не превзойдет продолжительного тока двигателя. При этом следует иметь в виду, что эквивалентные токи, даваемые диаграммой ab , будут в действительности иметь место только тогда, когда машинист будет

соблюдать в точности расчетное время хода. При всяком сокращении времени хода, в частности при нагоне опозданий, эквивалентные токи возрастают.

На диаграмме рис. 24 определены минимальные времена хода по данному перегону, которые мы можем иметь при четырех рассматриваемых пусковых токах. При этих временах хода мы получим максимальные эквивалентные токи. Построим эти токи в функции пускового тока на рис. 23 в виде линии *ac*. Для минимального пускового тока эквивалентный ток на диаграммах *ab* и *ac* совпадет в виду того, что

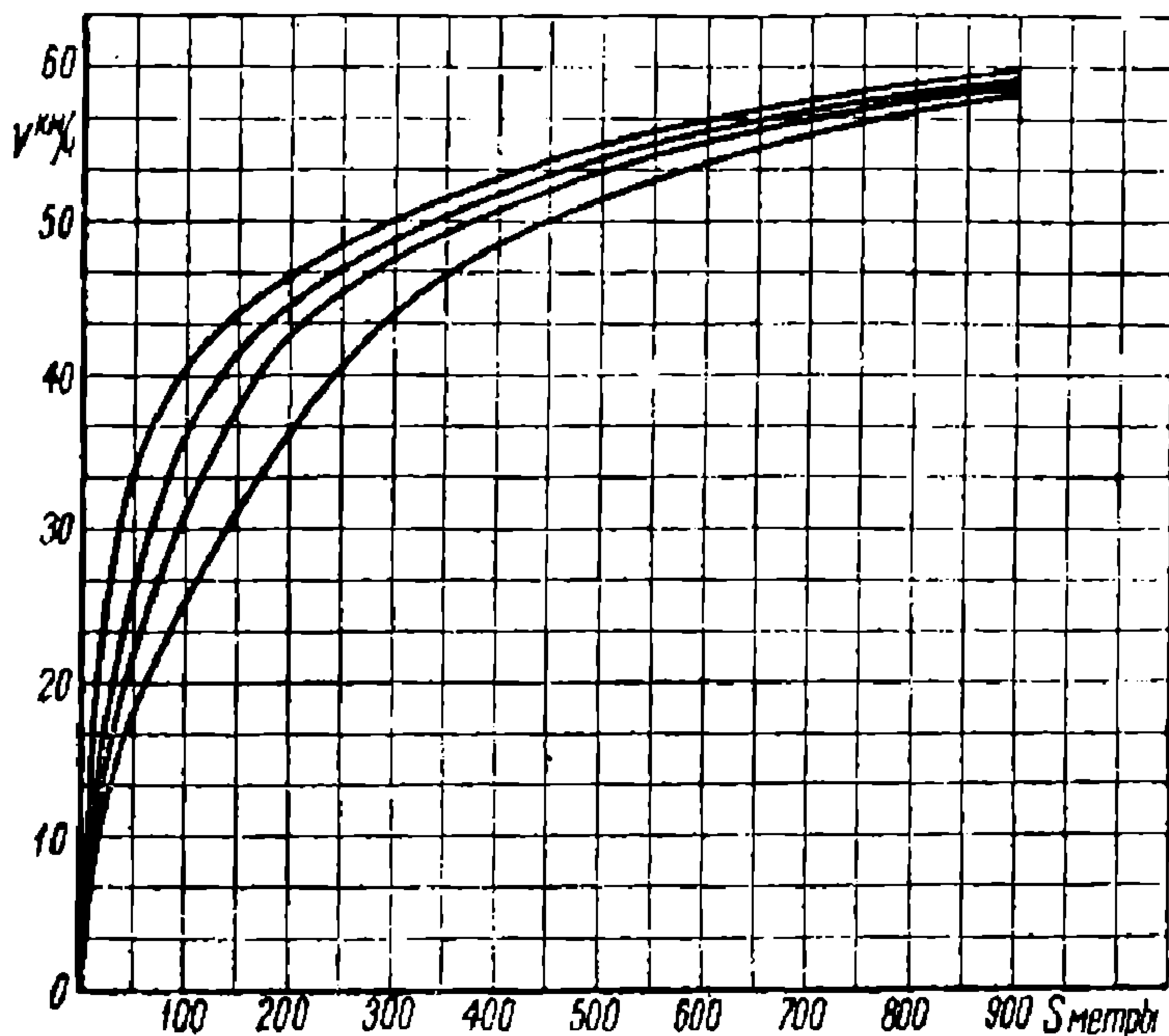


Рис. 20.

при этом пусковом токе вагон опозданий невозможен. Таким образом линия *ac* дает нам предельные значения эквивалентных токов, которые мы можем получить при нагоне опозданий на данном перегоне. При окончательном выборе целесообразного пускового тока, при суждении о допустимости этого тока для данного двигателя с диаграммой *ac* надлежит считаться.

2. Выбор передаточного числа зубчатого механизма при данной пусковой мощности двигателя

Предположим, что мы имеем некоторый тяговой двигатель, причем пусковая мощность этого двигателя нам задана. Выясним, каким образом влияет на режим движения поезда, на расход энергии и на нагрев двигателя изменение передаточного числа зубчатого механизма.

При изменении передаточного числа μ зубчатого механизма мы, очевидно, будем иметь изменение электромеханических характеристик

двигателя. Уменьшая передаточное число, мы получим для данной силы тока большую скорость и меньшую силу тяги. Для некоторого конкретного двигателя изменение электромеханических характеристик для разных передач μ дано на рис. 25, причем $\mu_1 > \mu_2 > \mu_3 > \mu_4 > \mu_5$.

По электромеханическим характеристикам и по кривой сопротивле-

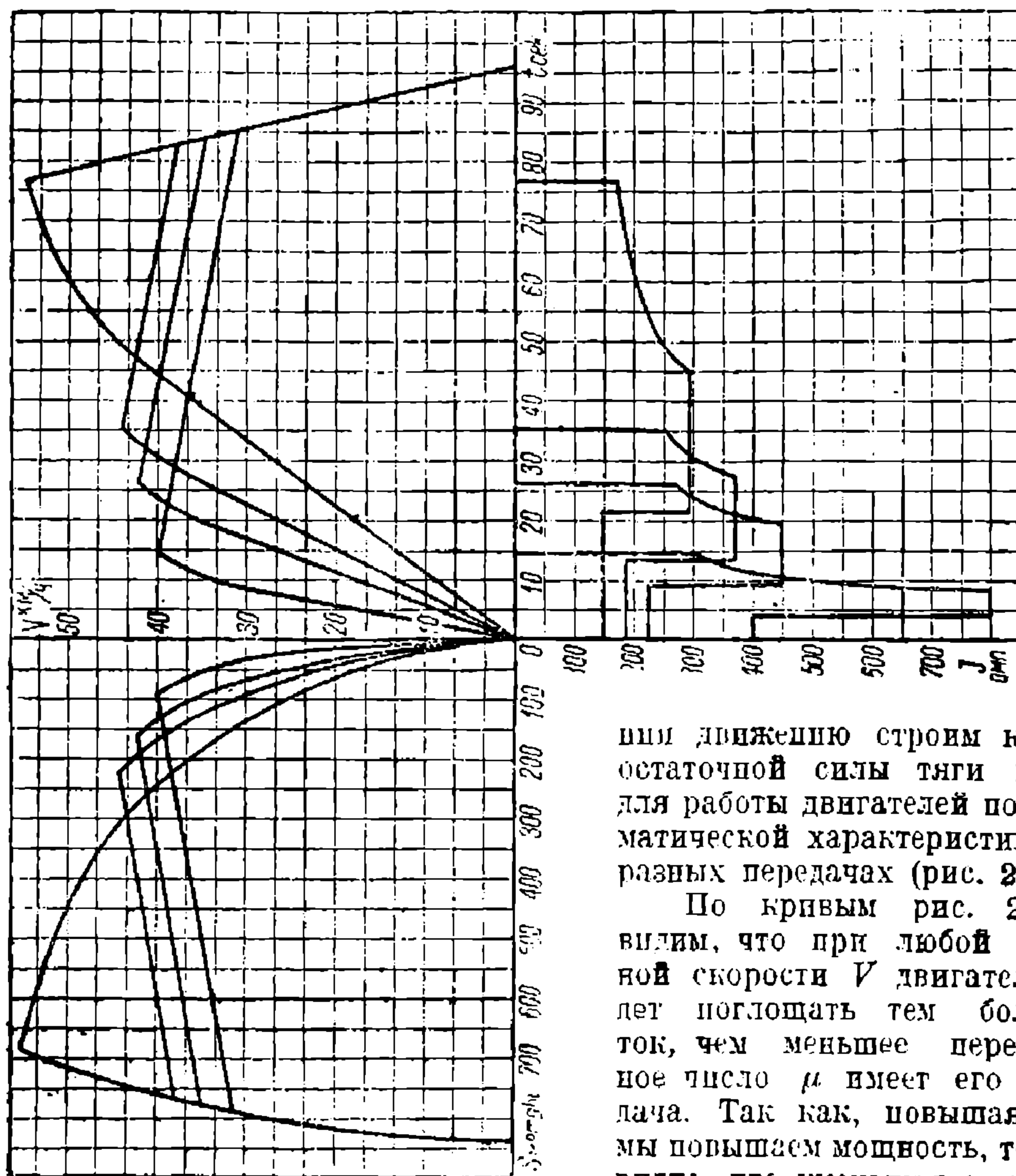


Рис. 21.

нии движению строим кривые остаточной силы тяги поезда для работы двигателей по автоматической характеристике при разных передачах (рис. 26).

По кривым рис. 25 мы видим, что при любой заданной скорости V двигатель будет поглощать тем больший ток, чем меньшее передаточное число μ имеет его передача. Так как, повышая ток, мы повышаем мощность, то, очевидно, что уменьшая μ , мы за-

ставляем двигатель развивать при данной скорости большую мощность.

Мощность пропорциональна произведению силы тяги F и скорости V . Поэтому очевидно, что кривая остаточной силы тяги при меньших передаточных числах μ расположится выше той же кривой при больших μ . В четвертом координатном угле рис. 26 для каждой передачи дана диаграмма силы тока в функции скорости.

Дополним теперь диаграмму той ее частью, которая относится к работе двигателей под реостатами при пуске.

Если пусковая мощность двигателя нам задана, то мы получаем определенные ступени пусковых реостатов и вполне определенный пусковой ток, один и тот же для всех передаточных чисел. При одном и том же пусковом токе, но большем передаточном числе, мы, очевидно, получим большую остаточную силу тяги $f - w_0$, как это и указано на рис. 26. Таким образом по диаграмме рис. 26 мы видим, что увеличение передаточного числа повышает ускорение при разгоне, но снижает скорость установившегося движения поезда. При меньшем передаточном числе работа двигателей под реостатом при пуске будет происходить в течение большего промежутка времени, а выход на автоматическую характеристику произойдет при большей скорости.

Пользуясь найденной нами кривой остаточной силы тяги, на рис. 27 построим диаграмму $V = \varphi(t)$ разгона поезда для двух различных ускорений.

Так как $\int_0^t V dt$, т. е. площадь, очерченная кривою $V = \varphi(t)$, представляет собою пройденный путь, очевидно, что в начале разгона при большем ускорении для одного и того же пройденного пути мы будем иметь меньшее время пробега, т. е. большие скорости. По мере приближения к скорости установившегося движения выгоды большего ускорения в отношении скоростей падают и в конце концов движение при меньшем ускорении с точки зрения величины скорости получает преимущество.

Расход энергии на движение поездов при данном времени хода зависит от тех пределов, до которых мы пользуемся кривою разгона под током.

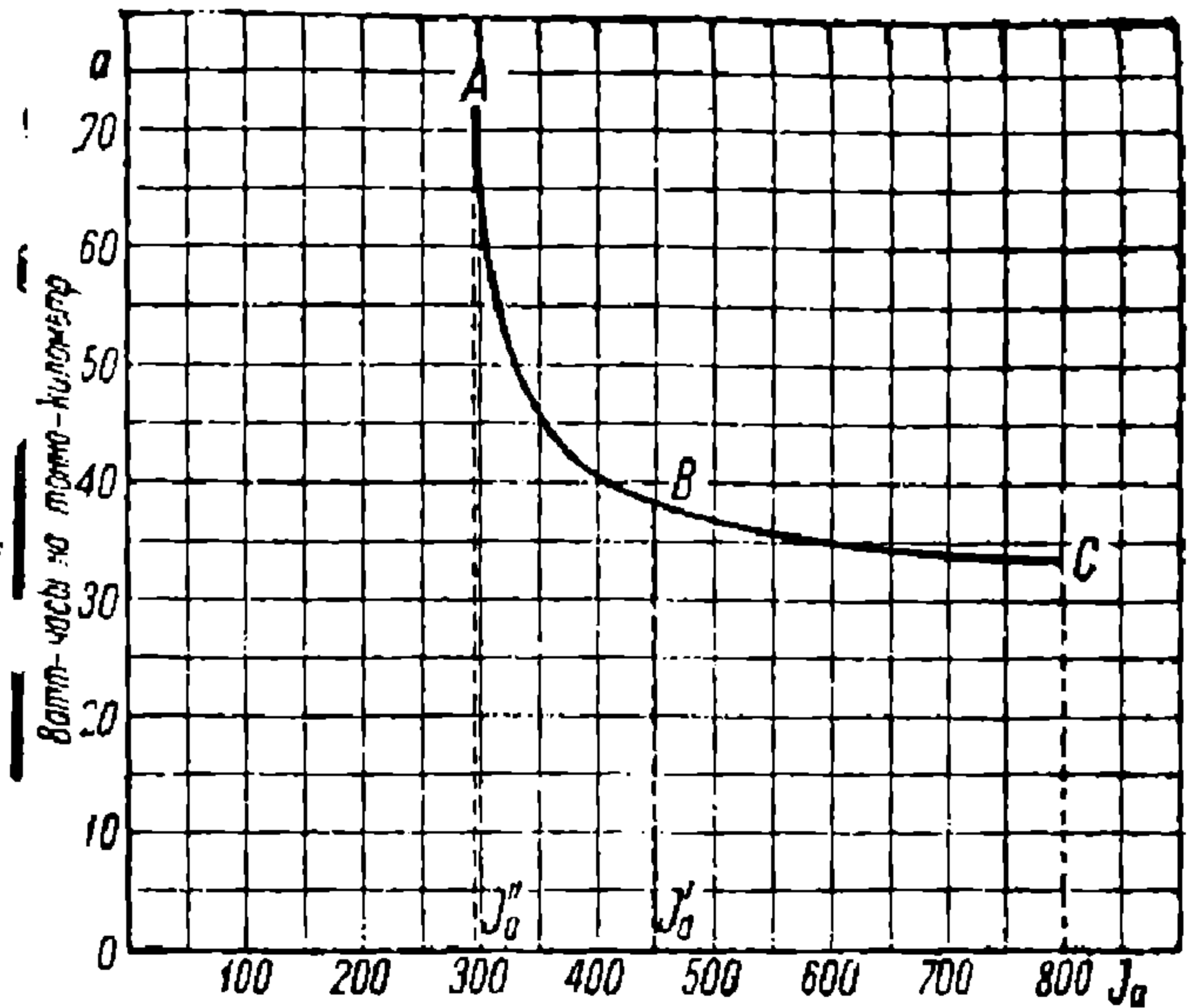


Рис. 26.

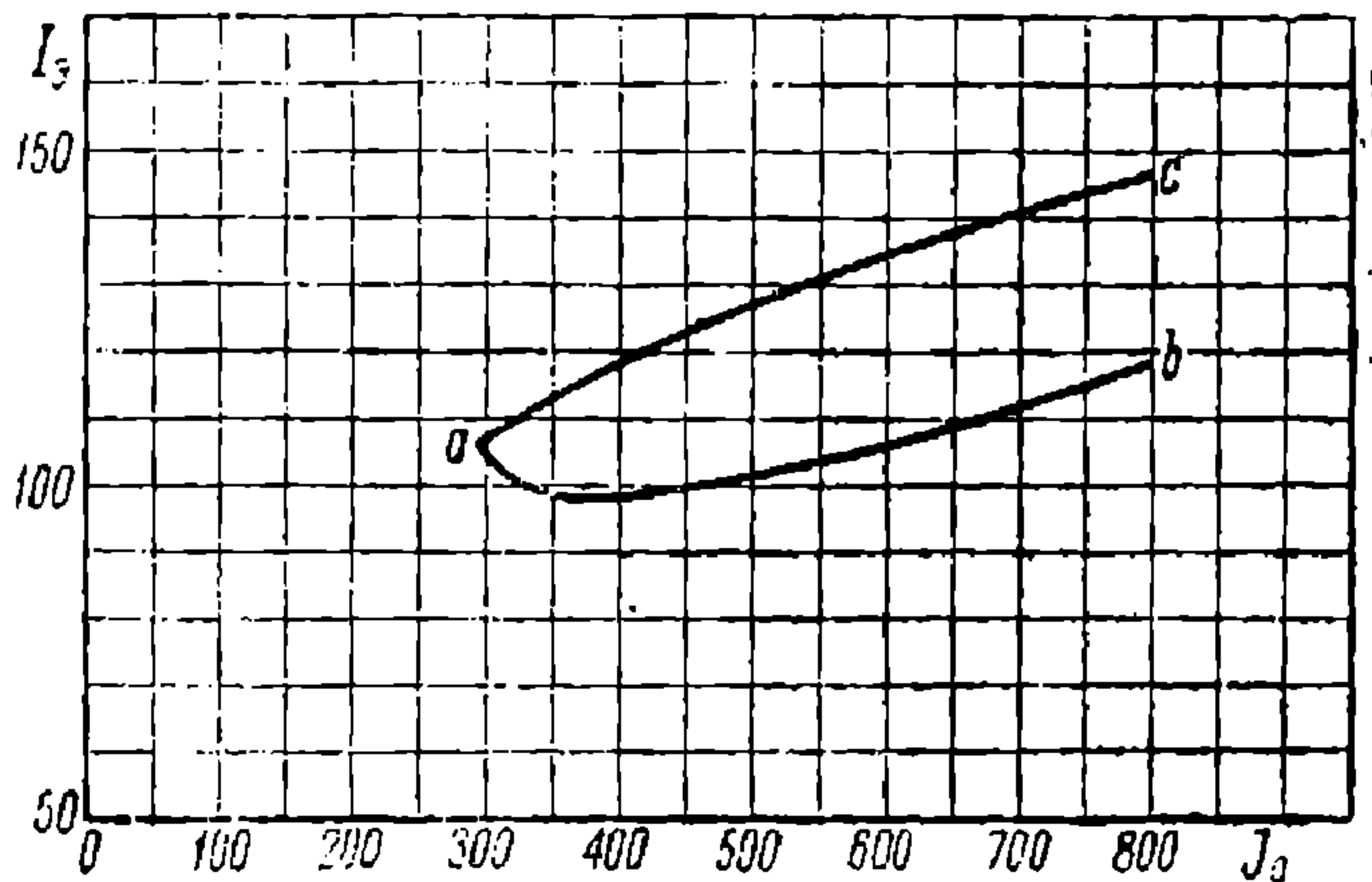


Рис. 27.

При пользовании только начальным участком кривой разгона до точки *a* (рис. 27) мы всегда будем иметь преимущество на стороне большого ускорения, так как при этом мы имеем меньшие потери в пусковых реостатах и тормозах. Последнее очевидно из рис. 28, ибо при повышении ускорения скорость в момент начала торможения понижается, время разгона при той же пусковой мощности сокращается и скорость в момент выхода на автоматическую характеристику падает.

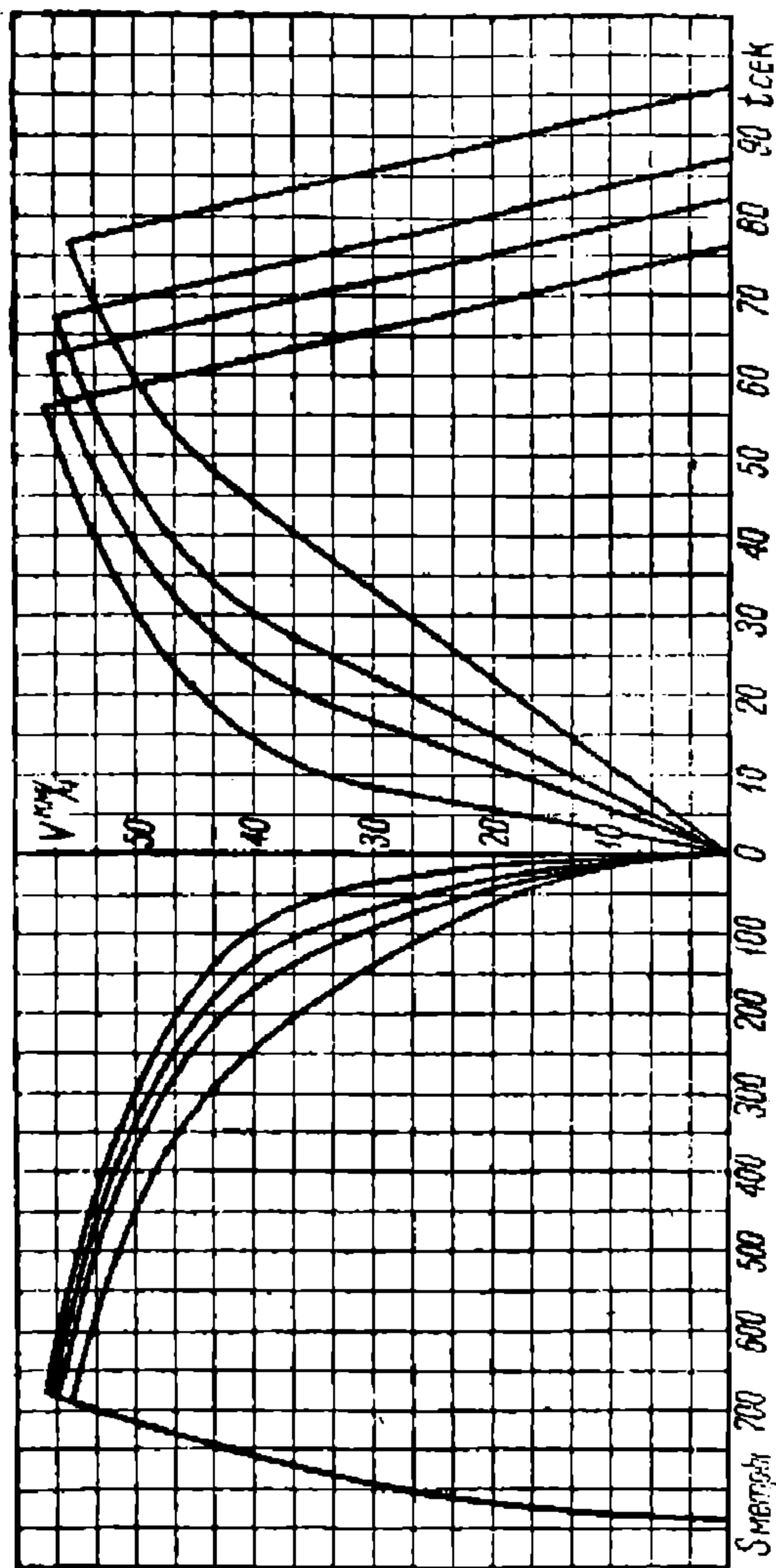


Рис. 24.

Это обстоятельство, очевидно, сказывается при малых длинах перегонов и больших скоростях. При использовании кривой разгона за пределами точки *a*, по мере удаления от нее, преимущества большого ускорения в отношении расхода энергии начинают уменьшаться, и в конце концов меньшее ускорение оказывается более благоприятным. Это объясняется тем, что потери в тормозах при нем, как явствует из диаграммы рис. 29, будут ниже и будут компенсировать перерасход энергии при работе под реостатом. Уменьшение ускорения за некоторыми пределами может стать вновь невыгодным. В этом легко убедиться по рис. 30. Из него видно, что при уменьшении ускорения до величины, соответствующей кривой *Oa*, скорость в момент начала торможения вновь повышается.

На диаграмме рис. 30 построены кривые движения поезда по одному и тому же перегону при различных вариантах передаточного числа μ . Кривые рис. 30 относятся к тому же двигателю и тем же μ , которые были нами

рассмотрены на рис. 25 и 26. В четвертом координатном угле рис. 30 нанесены кривые расхода тока. По ним может быть подсчитан для каждого μ расход энергии.

Если построить зависимость удельного расхода энергии α от величины передаточного числа, как это сделано на рис. 31, то по полученной кривой мы можем найти наиболее благоприятную передачу.

Из рис. 30 мы видим, что кривая Obc соответствует максимальному возможному ускорению, так как при дальнейшем повышении ускорения мы не будем в состоянии получить заданное время хода по перегону.

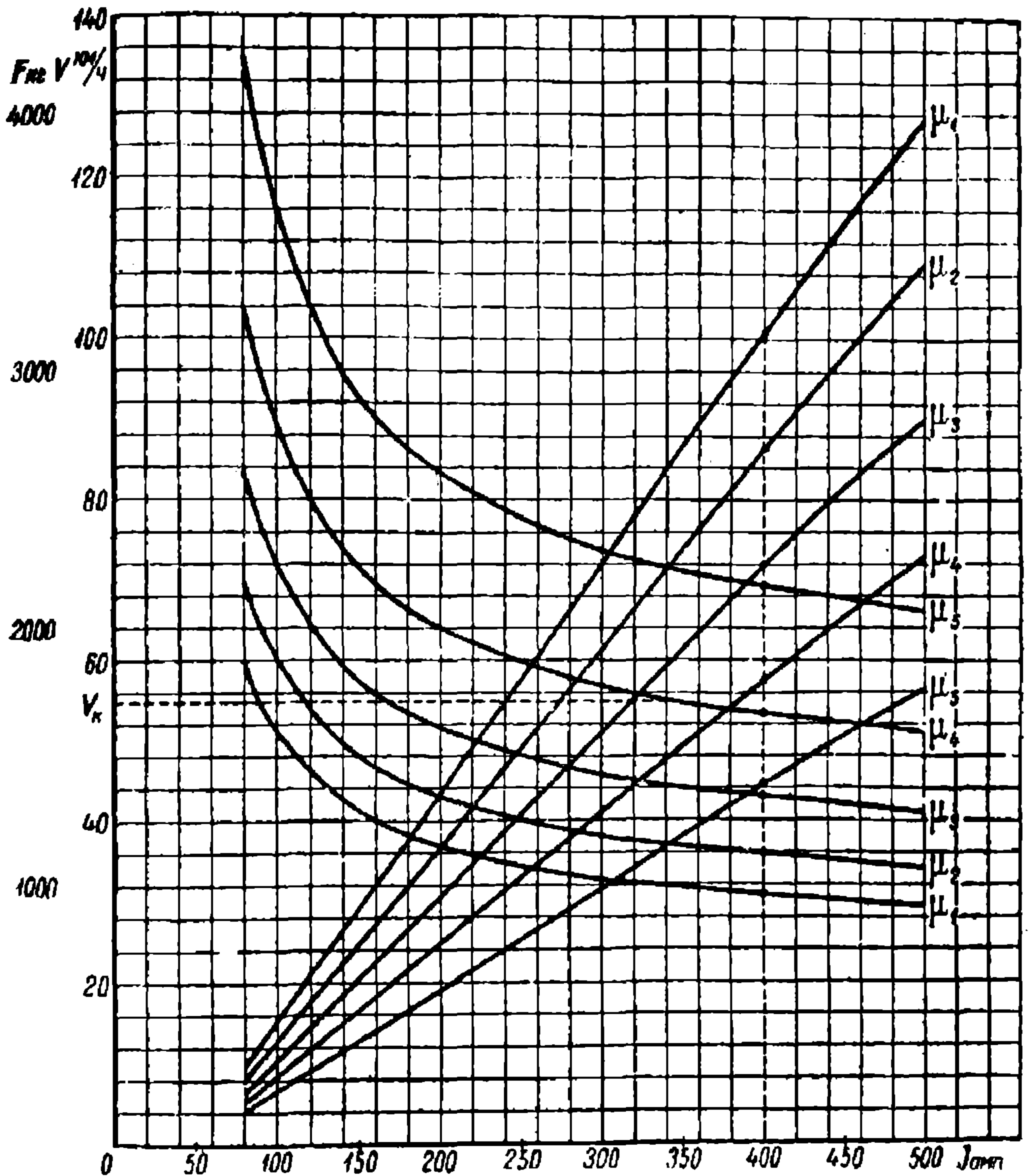


Рис.

Следует отметить, что на больших перегонах при повышении передаточного числа соблюдение заданных ходовых скоростей может оказаться невозможным, так как установившаяся скорость движения будет очень мала.

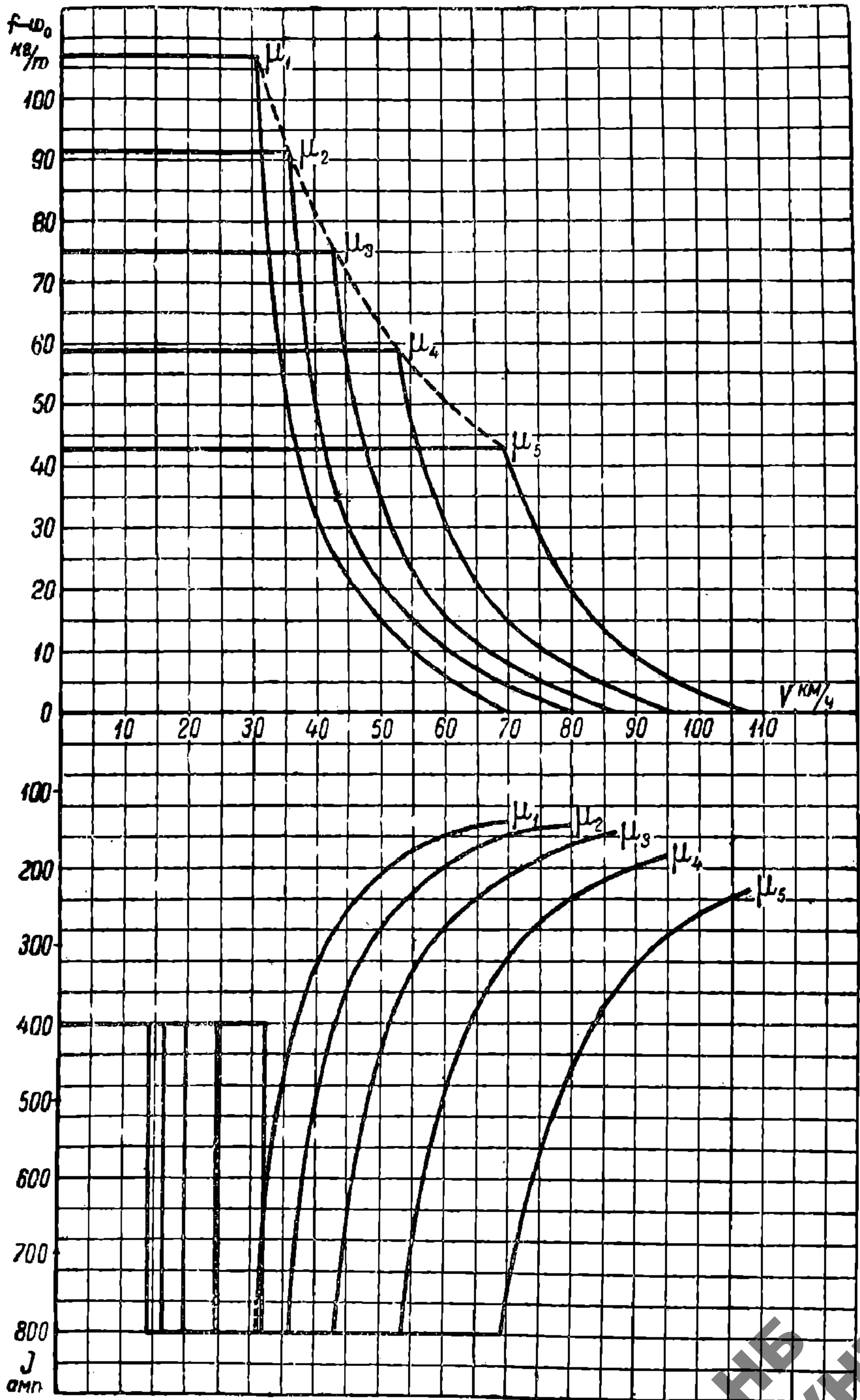


Рис. 26.

НБ
УДУУЕТ
(ДИТ)

так как при этом повышении мы сокращаем время хода под током и время работы с большими пусковыми токами. На более длинных перегонах, которые были рассмотрены на рис. 30, повышенные ускорения от минимальной величины снижает нагрев, но максимальное ускорение может вновь его повысить, так как при максимальном ускорении двигатели имеют длительную работу под током. Таким образом некоторое ускорение даст минимум нагрева.

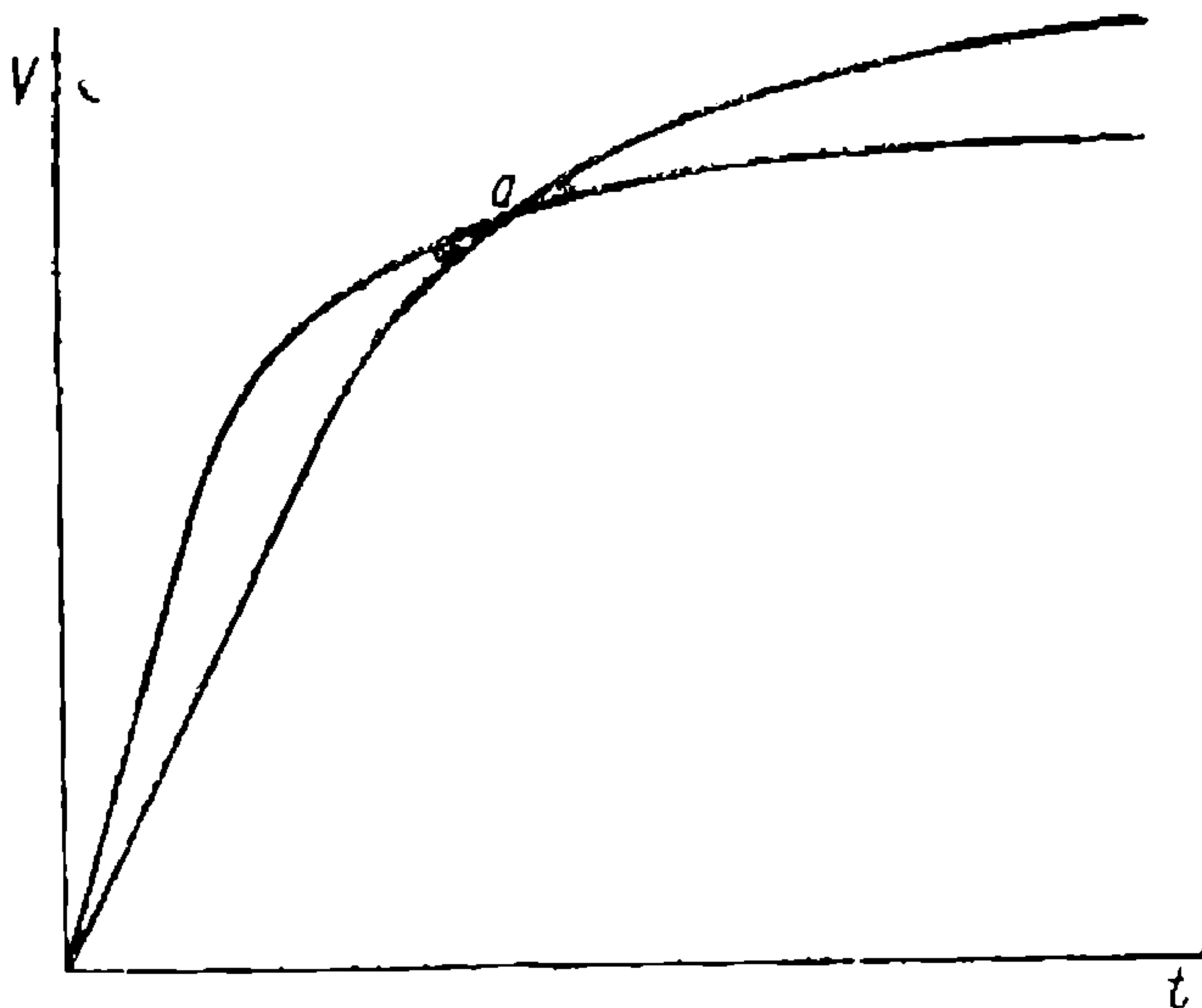


Рис. 27.

Во всех предыдущих рассуждениях мы предполагали, что моторные вагоны будут иметь заданное колесо. Вопрос о влиянии диаметра колеса на режим движения поезда, расход энергии и нагрев двигателей может быть разрешен аналогично вопросу о передаточном числе. Со-

вершенно очевидно, что увеличение диаметра колеса при той же передаче влияет так же, как понижение передаточного числа зубчатого механизма при данном колесе, а потому влияние величины диаметра колеса может быть исследовано изложенным выше порядком.

В заключение установим, в каких пределах может изменяться передаточное число зубчатого механизма для данного двигателя.

Пусть центр двигателя, т. е. расстояние между геометрическими осями якоря и колесной пары будет равно C .¹ Уменьшение передаточ-

¹ Имеется в виду движущий механизм с обычной «трамвайной» подвеской двигателя.

ного числа зубчатого механизма при данной централи, очевидно, связано с увеличением диаметра малой зубчатки. Увеличивая ее мы можем подойти к таким ее размерам, при которых линейная скорость на окружности зубчатого колеса получит недопустимо большую величину. Дабы избежать этого, но вместе с тем получить желательное малое ускорение при данной пусковой мощности, мы можем перейти к вагонным колесам большего диаметра. Наибольшее возможное передаточное число зубчатой передачи определяется конструктивными соображениями.

Если обозначить через m модуль шага зубца, т. е. величину $m = \frac{t}{\pi}$,

где t — шаг, то суммарное число зубьев обоих зубчатых колес при данной централи C будет равно:

$$Z_1 + Z_2 = \frac{2C}{m}. \quad (24)$$

Если принять во внимание, что число зубьев Z_1 малой зубчатки при современном состоянии техники не может быть ниже 12, то наибольшее возможное передаточное число может быть равным

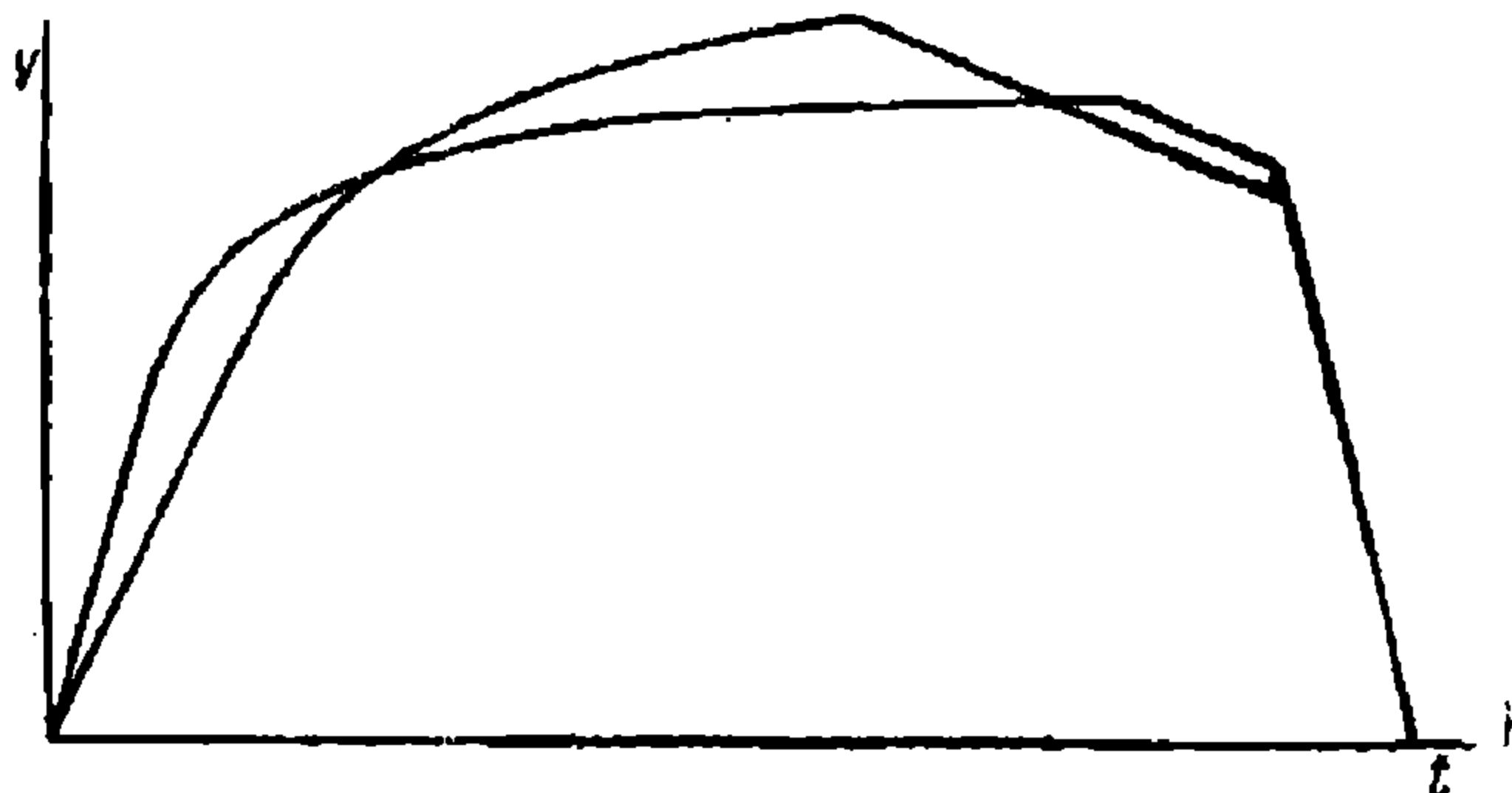


Рис. 29.

$$\mu_{max} = \frac{\frac{2C}{m} - 12}{12} = \frac{C}{6m} - 1. \quad (25)$$

Возможность осуществления передачи нужно также проверить по величине зазора между ее кожухом и уровнем головки рельсов.

Радиус делительной окружности большого зубчатого колеса, очевидно, будет равен

$$R_3 = C \frac{\mu}{\mu + 1}. \quad (26)$$

Радиус кожуха можно положить равным

$$R_4 = C \frac{\mu}{\mu + 1} + \lambda, \quad (27)$$

где λ — отрезок, равный сумме высоты головки зубца, зазора от зубца до стенки кожуха и толщины этой стенки. Зазор между кожухом и уровнем головки рельсов, очевидно, будет

$$\varepsilon = \frac{D_3}{2} - C \frac{\mu}{\mu + 1} - \lambda, \quad (28)$$

где D_3 — диаметр колеса.

Величина модуля для современных зубчатых колес тяговых двигателей в большинстве случаев лежит в пределах от 6 до 10 мм.

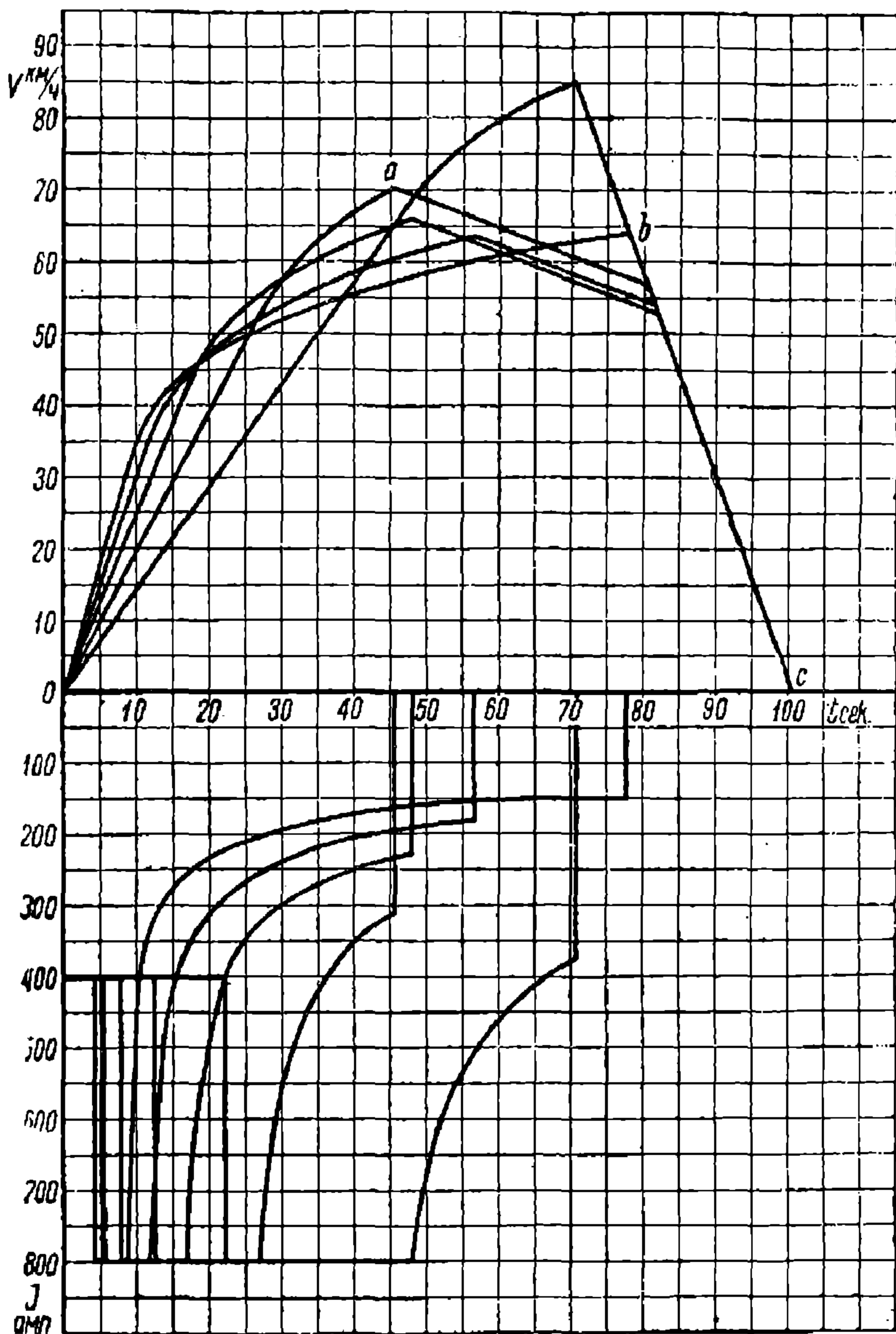


Рис. 30.

Минимум величины λ для малых трамвайных двигателей можно считать равным 16 мм.

НБ
УДМУНТ
(ДИПТ)

3. Выбор пусковой мощности при данном начальном ускорении разгона поезда

Предположим, что нам дан некоторый двигатель, а также задано начальное ускорение разгона для поезда. Требуется выбрать пусковую мощность.

Пусть на рис. 32 даны электромеханические характеристики нашего двигателя. Зададимся рядом пусковых токов I_1, I_2, I_3, I_4 . При установлении этих токов будем иметь в виду ранее сделанное нами указание, что в современных тяговых двигателях пусковой ток нежелательно повышать сверх 175% от часового тока. Пусть приня-

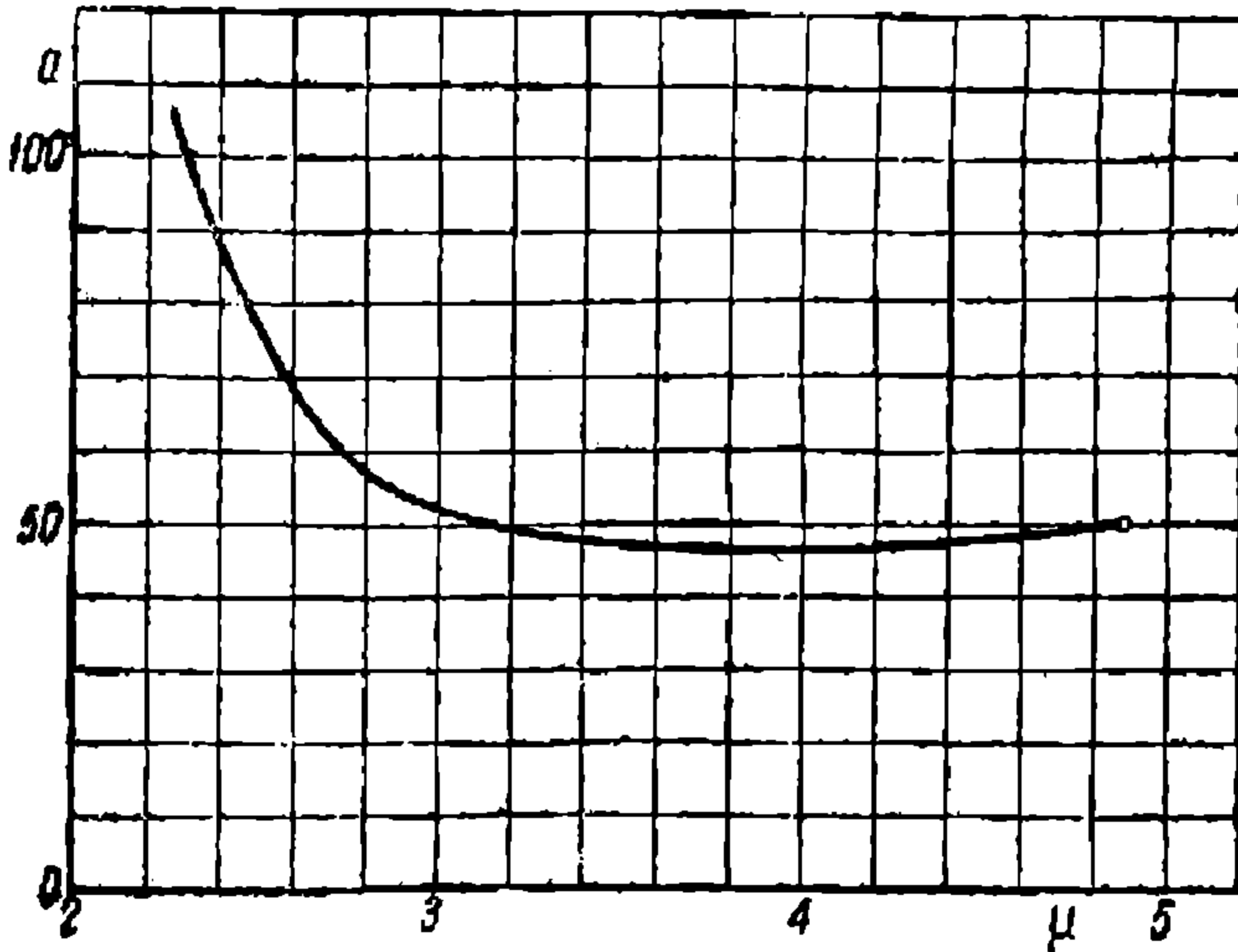


Рис. 31.

тым нами пусковым токам отвечают моменты вращения M_1, M_2, M_3 и M_4 на валу двигателя. Обозначим заданное нами начальное ускорение через σ . Тогда при вытяти с места поезд должен реализовать удельную силу тяги

$$f_a = \sigma \frac{dV}{dt} + w = \sigma u_1 + w. \quad (29)$$

Та же удельная сила тяги может быть выражена в функции момента вращения на валу двигателя

$$f_a = \frac{2m M \mu \eta_n}{D_n (P + Q)}, \quad (30)$$

где η_n — коэффициент полевого действия передачи от вала двигателя сцепным осям;

P — вес моторного вагона;

Q — вес прицепных вагонов, приходящийся на 1 моторный;

m — число двигателей в моторном вагоне.

Из формул (29) и (30) мы найдем передаточное число μ зубчатого механизма, которым должны быть снабжены двигатели для того, чтобы взять поезд с места при заданном ускорении. Мы будем иметь

$$\mu = \frac{D_k (P + Q) f_a}{2m M \eta_n} = \frac{D_k (P + Q) (\sigma u_1 + w)}{2m M \eta_n}. \quad (31)$$

Отсюда следует, что при заданном ускорении u_1 при повышении пускового тока, а следовательно, при увеличении момента M мы должны понизить величину передаточного числа μ . Таким образом для наших вариантов пусковой мощности мы будем иметь четыре различных передаточных числа: μ_1, μ_2, μ_3 и μ_4 . Для каждой из этих передач мы можем построить кривую удельных ускоряющих усилий. Таким

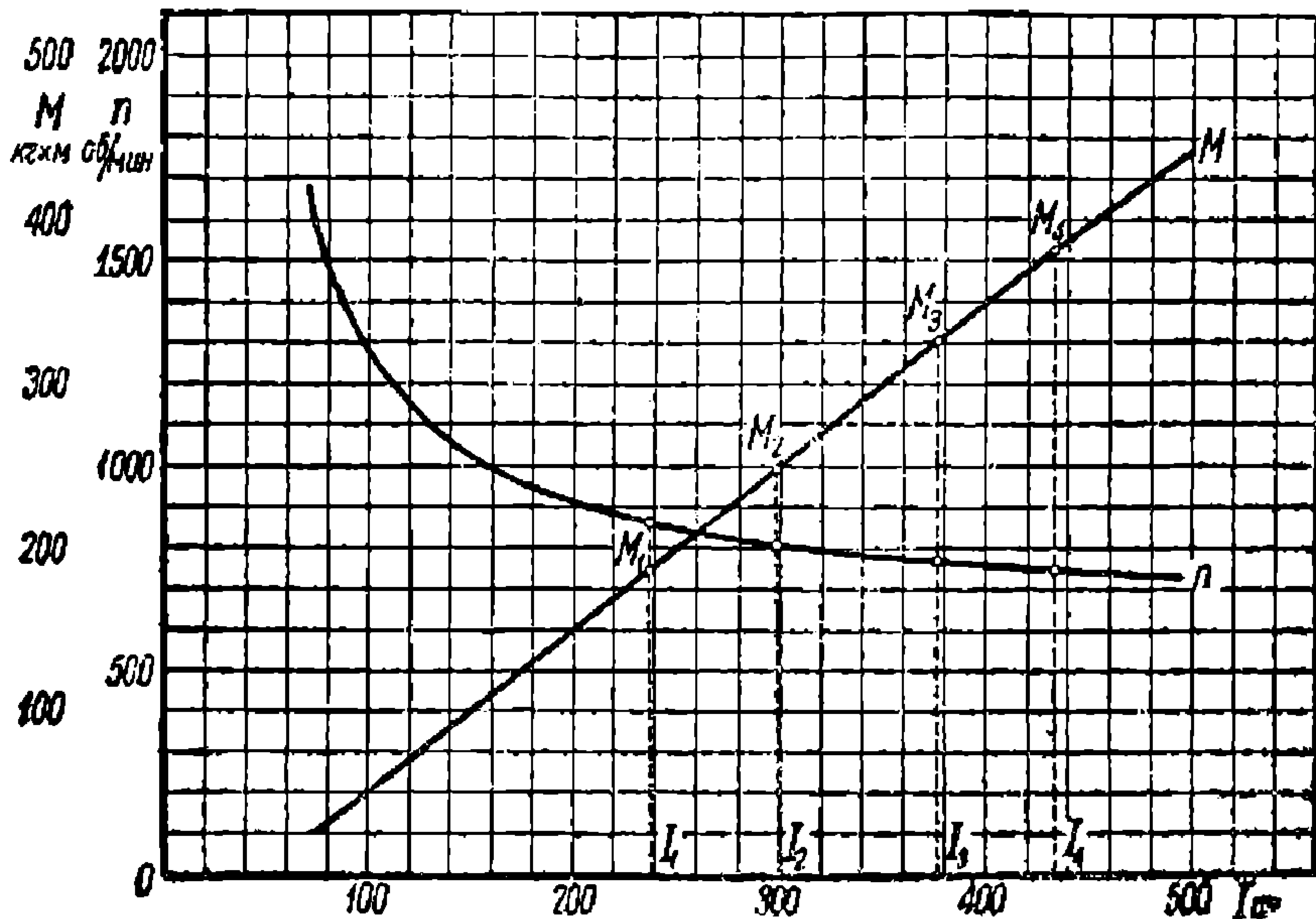


Рис. 32.

образом мы получим диаграмму рис. 33. Чем выше пусковая мощность и чем ниже передаточное число, тем выше будет лежать кривая ускоряющих усилий. На той же диаграмме рис. 33 даны кривые силы тока в функции скорости.

Имея диаграммы удельных остаточных сил тяги, мы можем построить диаграммы движения поезда для заданного времени хода на данном перегоне. Эти диаграммы даны на рис. 34.

По кривым силы тока в функции времени находим удельный расход энергии a для разных пусковых мощностей. Строя зависимость удельного расхода энергии a от пускового тока (рис. 35), мы видим, что при повышении этого тока сверх J_{min} удельный расход энергии сначала снижается. Это снижение объясняется значительным уменьшением скорости в момент начала торможения, тогда как скорость в момент выхода на автоматическую характеристику увеличивается мало. Благодаря этому потери в тормозах уменьшаются более, чем воз-

растают потери в реостатах. При токе J_m получается минимум расхода энергии, при дальнейшем повышении пусковой мощности a вновь растет. Этот рост есть следствие небольшого снижения скорости в момент начала торможения при более значительном повышении скорости в момент выхода на автоматическую характеристику.

Из диаграмм рис. 34 следует, что ток J_{min} является минимальным возможным пусковым током, так как при меньших пусковых токах двигатель не в состоянии провезти поезд по данному перегону с пад-
тежащей скоростью. Наибольший принятый нами ток близок к мак-
симальному возмож-
ному пусковому току J_{max} , так как при этом последнем токе вы-
ключение двигателя
происходит в момент
выключения пуско-
вых реостатов. Разгон
поезда при токах,
больших J_{max} , был бы
абсурдным, так как
тогда выключение
двигателя происхо-
дило бы до выхода
на автоматическую
характеристику, и
двигатель совершен-
но бесцельно работал
бы при больших то-
ках при неисполь-
зованной пусковой
мощности. Таким об-
разом для данного
ускорения и данного
времени хода по пе-
регону мы можем най-
ти крайние пределы
возможных пусковых
токов и установить

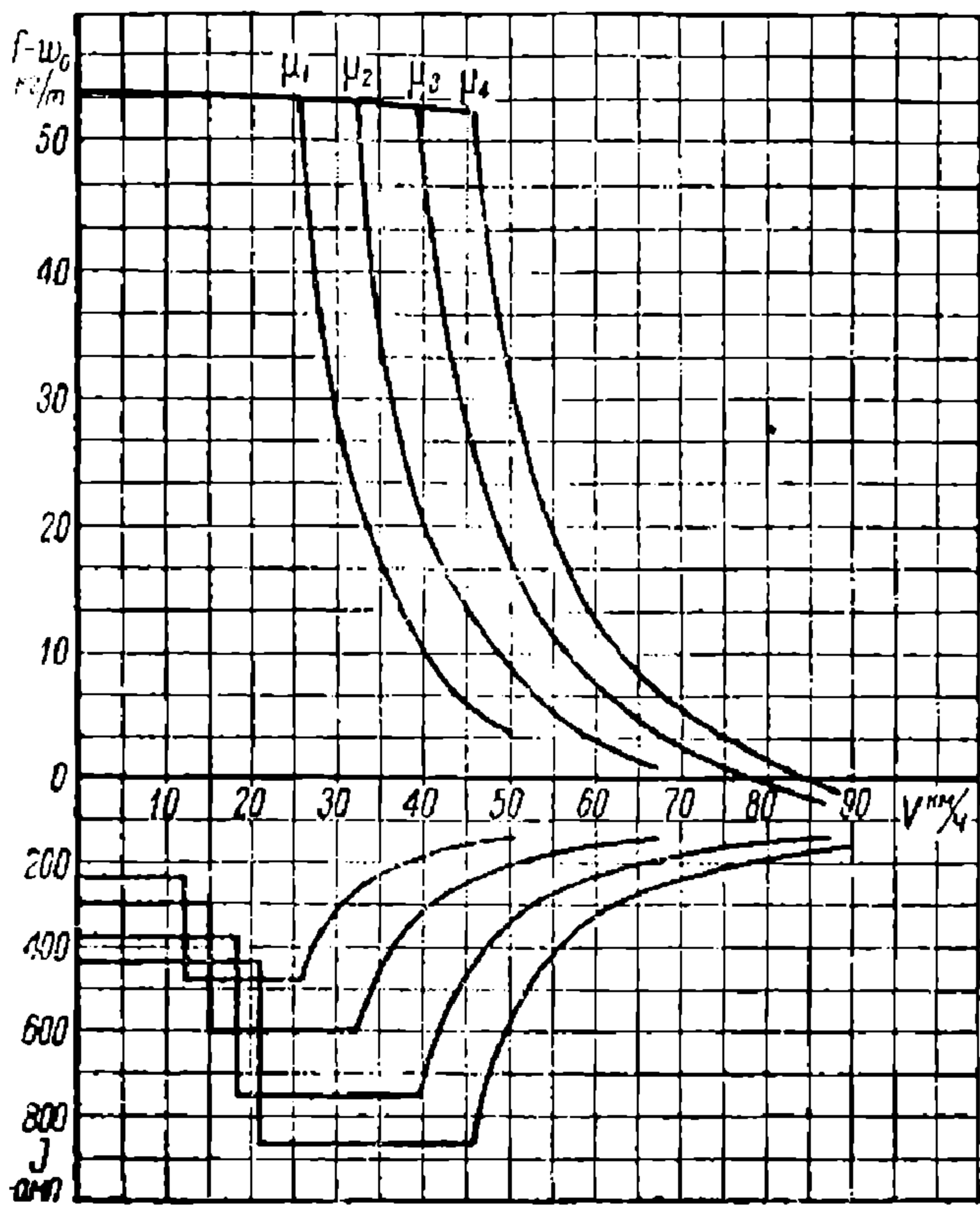


Рис. 33.

тот пусковой ток J_m , который будет наиболее выгодным с точки зрения расхода энергии.

Для суждения о возможности работы двигателя при выбранном режиме пуска необходимо проверить двигатель на нагревание.

На диаграмме рис. 36 построена зависимость сверхтемпературы двигателя от величины пускового тока. Диаграмма соответствует тем режимам ведения поезда, которые изображены на рис. 34. Нужно однако иметь в виду, что в действительности движение поезда может отступать от этих режимов, в частности при нагоне опозданий, и тогда двигатель может получить нагреты, превосходящие подсчитанные нами на диаграмме рис. 36. На рис. 36 пунктирной линией показаны те сверхтемпературы, которые двигатель может получить при тех же

пусковых токах при отсутствии выбега и соответственном сокращении времени хода. При минимальном пусковом токе обе кривые совпадают, так как в этом последнем случае нагон опоздания невозможен.

Мы видим, что при пусковых токах, больших J_1 , движение поезда при нагоне опозданий с наименьшим временем хода дает перегрев тяговых электродвигателей.

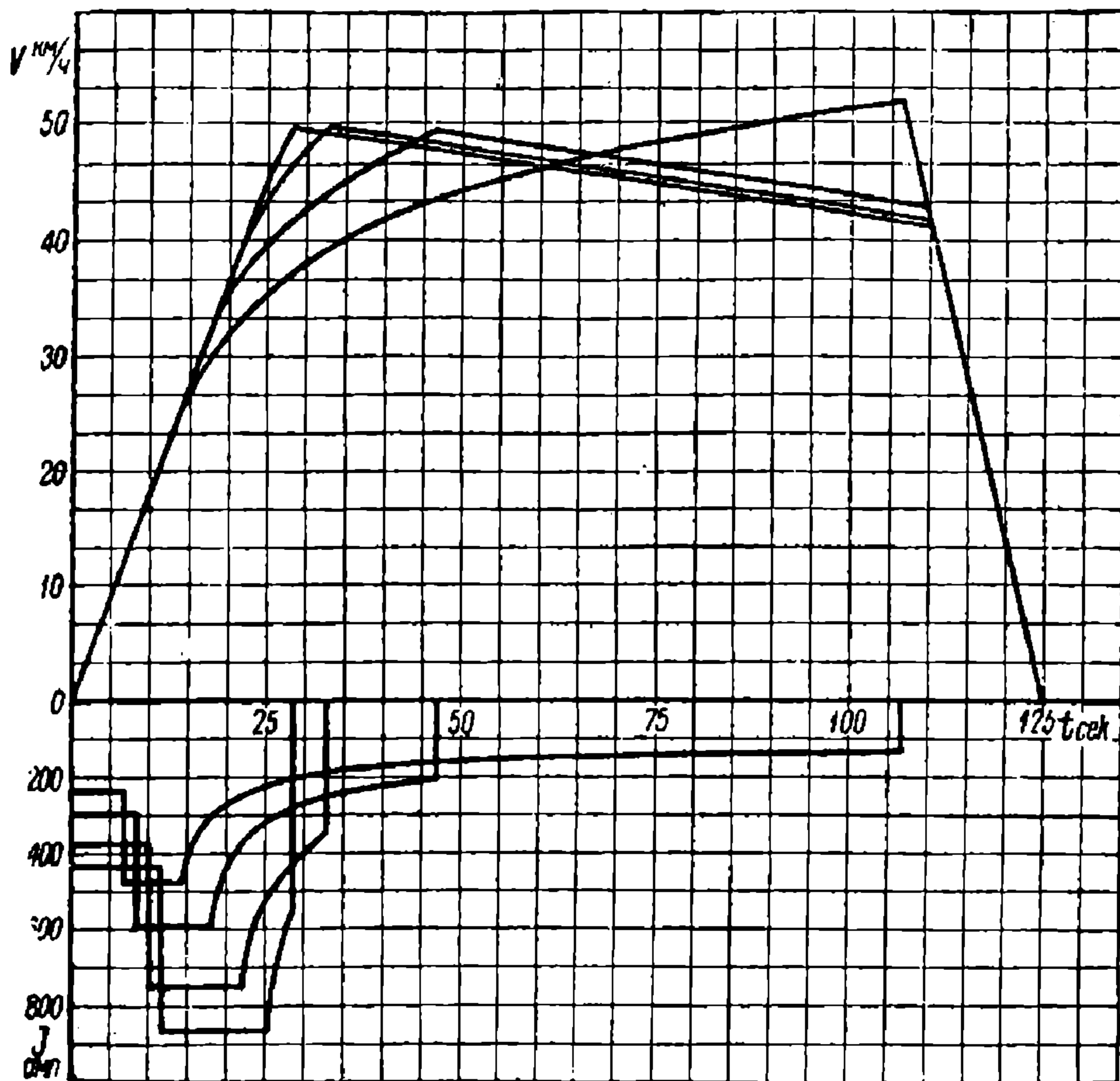


Рис. 34.

4. Совместный выбор передачи и пускового тока для данного двигателя

Дан тяговой электродвигатель определенной часовой мощности. Задан типовой перегон дороги, дана потребная скорость движения поездов или время хода по типовому перегону. Число двигателей в поезде и вес поезда также заданы. Требуется выбрать передачу и пусковой ток двигателя. Вопрос в такой постановке очень часто приходится решать в практике, когда промышленность предлагает дороге двигатель данного типа.

Зададимся рядом возможных передаточных чисел μ зубчатой передачи двигателя, найдем для каждой передачи характеристики двига-

теля на ободу колеса и построим для каждого варианта μ диаграмму удельных ускоряющих сил. Мы получим кривые рис. 37. При каждом передаточном числе мы можем производить разгон поезда при различных пусковых токах, т. е. при различных ускорениях.

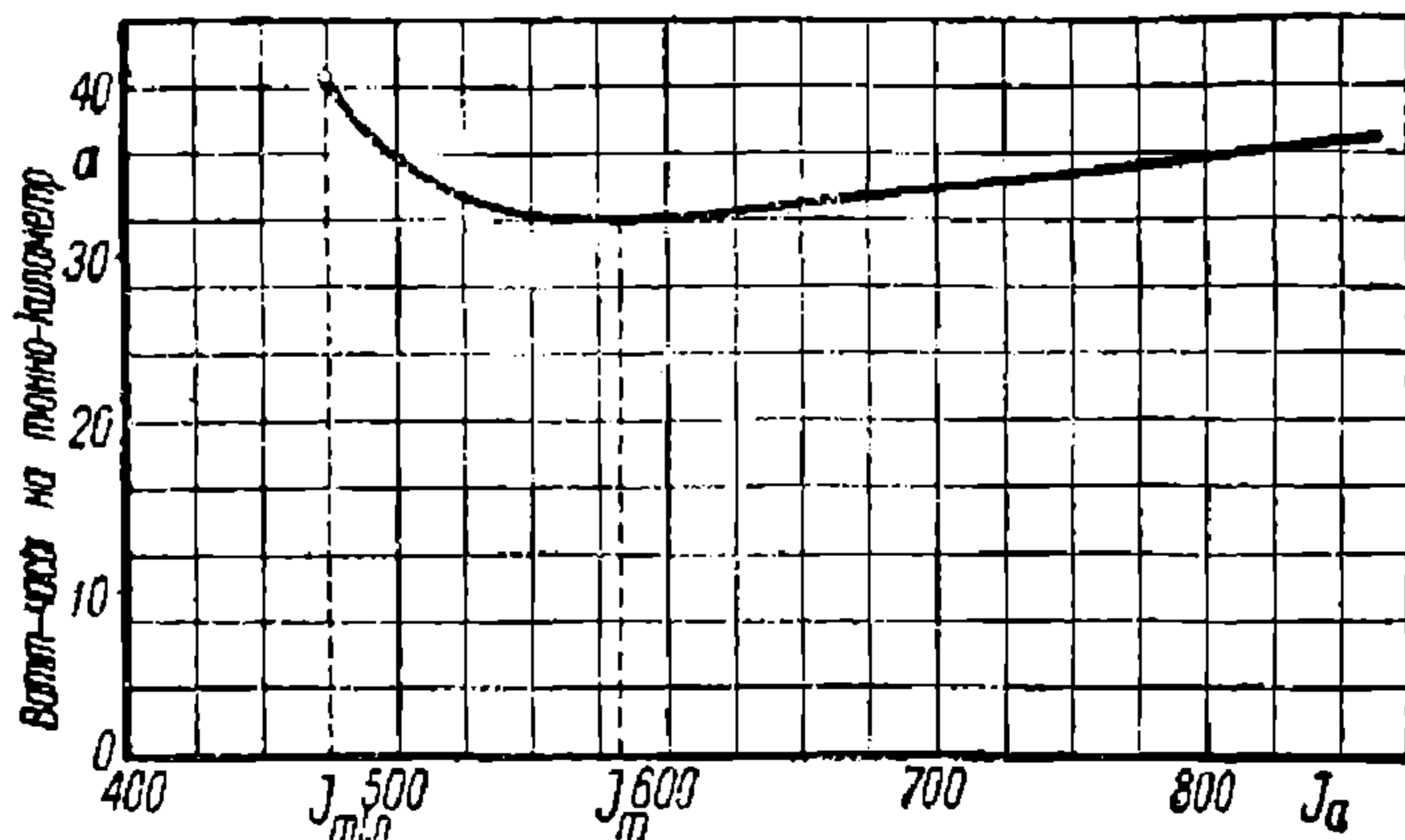


Рис. 35.

чение по сцеплению. Оно выражается в том, что поезд не может реализовать остаточной силы тяги, превосходящей значений $(f - w_0)$, указанных кривой AB на рис. 37. Уменьшая передаточное число и увеличивая пусковой ток, мы подойдем к максимальному току J_{max} допустимому при пуске двигателей. Таким образом ограничение по мощности тяговых двигателей изобразится для ускоряющих усилий кривой CD , а для токов — прямой J_{max} , параллельной оси абсцисс. Помимо перечисленных ограничений мы имеем ограничение по наибольшей скорости, указанное на рис. 37. Мы, видим, что при наименьшем передаточном числе мы можем пользоваться только участком DE автоматической характеристики.

Поэтому передача, соответствующая этой кривой, могла бы быть применена только на поездах, имеющих обращение по коротким перегонам. Для длинных перегонов, а также для поездов-скорыходов,

При одном и том же ускорении разгона меньшее передаточное число требует пуска двигателей при большем токе, как мы в этом убедились в предыдущем параграфе.

Нанесем на диаграммах рис. 37 те ограничения, которые приходится иметь при пользовании данным двигателем.

Первым ограничением будет ограни-

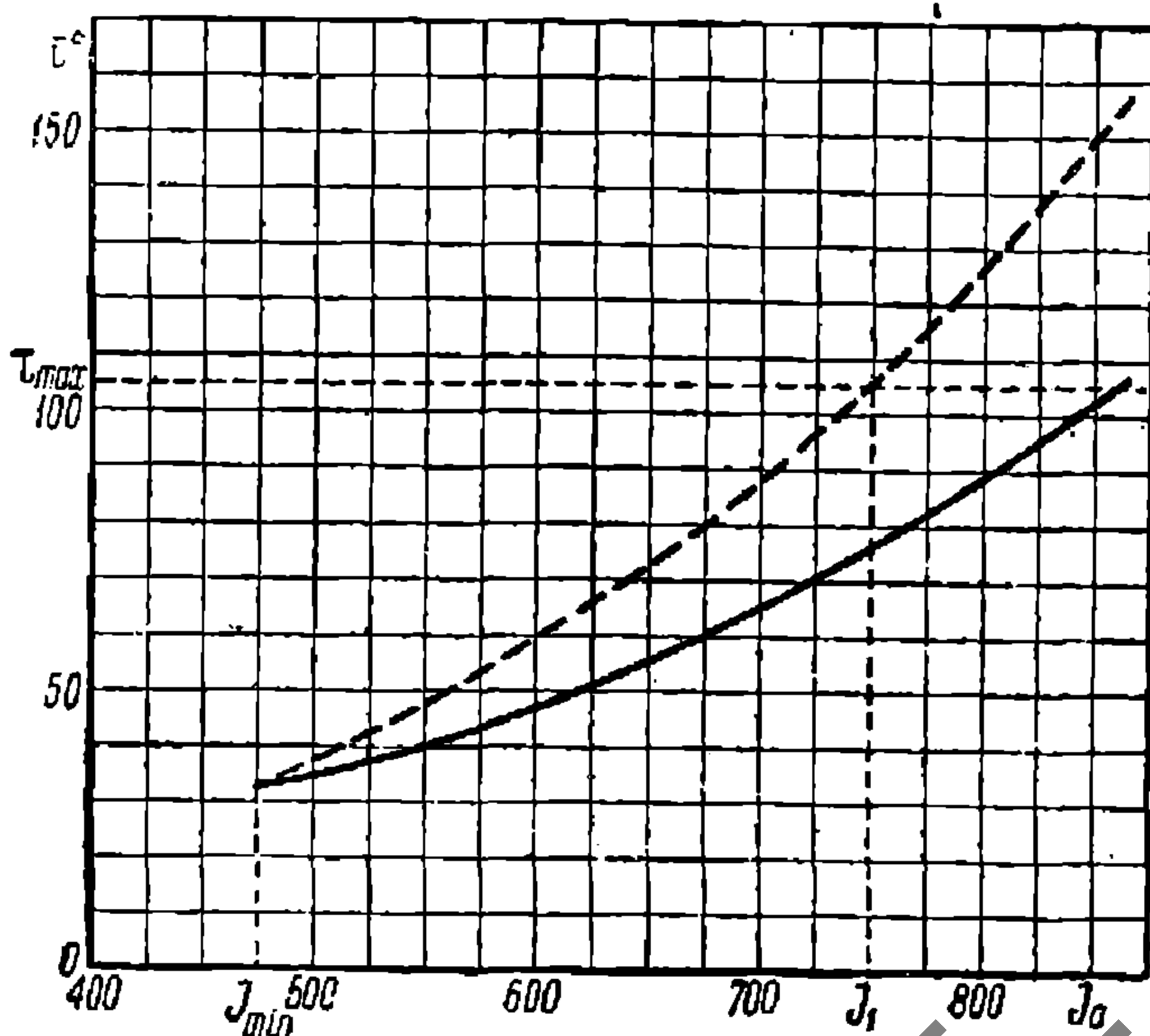


Рис. 36.

проходящих ряд перегонов безостановочно, такого рода передача неприменима.

Таким образом в результате ряда ограничений мы приходим к выводу, что на изображенной нами диаграмме рис. 37 мы можем пользоваться только теми участками кривых остаточной силы тяги, которые начерчены сплошными линиями; пунктирные участки кривых отпадают.

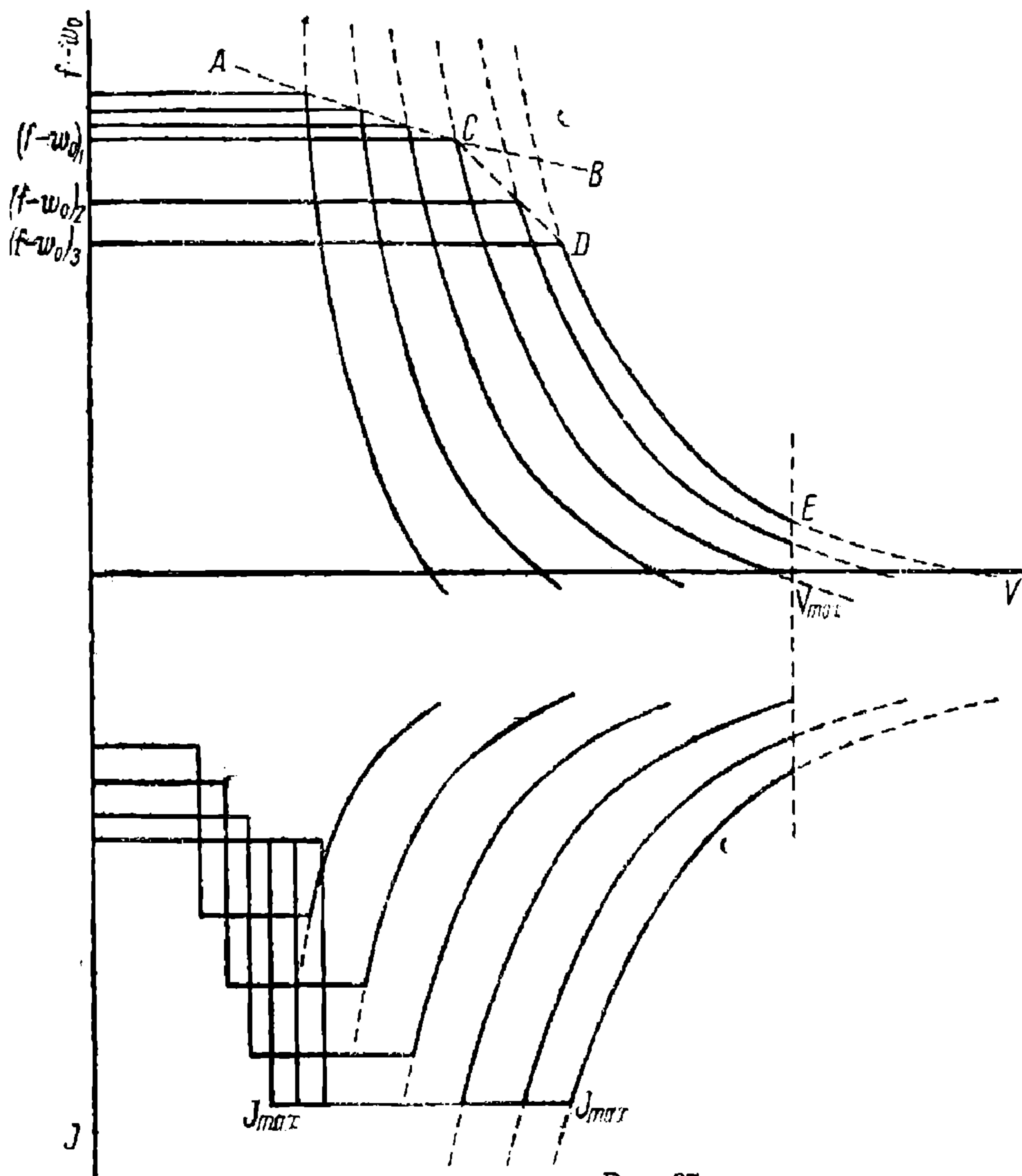


Рис. 37.

При выбранных ограничениях мы могли бы пользоваться для каждой передачи различными пусковыми ускоряющими усилиями при разгоне. Так, например, можно было бы принять для разгона ускоряющие усилия $(f-w_0)_1$, $(f-w_0)_2$ и т. п.

Выше, на стр. 34, мы доказали, что при данной передаче наиболее выгоднейшим с точки зрения расхода энергии ускорением является наи-

большее ускорение. Поэтому для всех начерченных нами диаграмм удельных остаточных сил тяги наиболее выгодными по расходу энергии будут те пусковые остаточные силы тяги, которые определяются пересечением кривых ($f - w_0$) с кривыми AC и CD . Эти пусковые остаточные силы тяги изображены на рис. 37 сплошными линиями.

Таким образом задача выбора передачи и пускового тока сводится к сравнению вариантов удельных ускоряющих усилий, изображенных на рис. 37. Задачу эту целесообразно расчленить на две части.

Сравним сначала те варианты, в которых мы имеем ограничение по сцеплению (в нашем примере их четыре). Для каждого из этих вариантов строим диаграммы движения для заданного времени хода и паходим расход энергии. Строим зависимость удельного расхода энергии от величины передаточного числа μ . При этом могут быть два случая.

I случай. В этом случае минимум расхода энергии будет лежать в пределах рассматриваемых вариантов. Тогда вариант μ , дающий этот минимум, будет с точки зрения расхода энергии наимыгоднейшим из всех вариантов рис. 37. Рассмотрение вариантов, имеющих ограничение по кривой CD , будет в этом случае излишним, так как заведомо можно сказать, что эти варианты дадут худший результат. В этом легко убедиться. Действительно, варианты, ограниченные кривой CD , дадут большие расходы энергии, чем варианты, ограниченные сцеплением по кривой CB . Это мы доказали на стр. 34. Но наимыгоднейший вариант, ограниченный по сцеплению, т. е. по кривой AB , для рассматриваемого случая лежал в пределах кривой AC . Следовательно вариант этот с точки зрения расхода энергии был вообще наимыгоднейшим.

II случай. Во втором случае минимум расхода энергии не будет лежать в пределах вариантов, ограниченных кривой AC . Исследование будет показывать, что он лежит где-то правее. В этом случае нужно произвести сравнение между собою вариантов, ограниченных пусковой мощностью, т. е. кривой CD . Порядок сравнения таких вариантов был нами рассмотрен на стр. 37—43. Вариант, дающий минимум расхода энергии, в этом случае будет наимыгоднейшим из всей совокупности вариантов рис. 37.

Вариант, выбранный по расходу энергии, нужно проверить на перегревание тягового электродвигателя. Если двигатель даст перегрев, приходится при данном двигателе принять менее выгодный с точки зрения расхода энергии, но посильный для двигателя вариант, либо перейти на двигатель более мощный. Этот последний при большей часовой мощности можно заставить работать по режиму установленного нами наиболее выгодного варианта.

Из изложенного мы можем сделать вывод, что при выборе передачи и пусковой мощности с точки зрения расхода энергии нужно стремиться принять то наибольшее ускорение, которое является допустимым по сцепному весу (см. ограничение AB на рис. 37). Снижение ускорения является неизбежным в том случае, если мы изменяем передачу при наибольшей допустимой пусковой мощности двигателя, т. е. встречаемся с ограничением по кривой CD рис. 37.

При выборе передачи и пускового тока надлежит иметь в виду сказанное нами на стр. 35, т. е. то, что не всегда следует останавли-

ваться на режиме работы, дающем минимум расхода энергии. В некоторых случаях незначительное отступление от минимума дает существенные выгоды в отношении толчков нагрузок и может быть принято.

5. Выбор передачи и пускового тока для длинных перегонов

На длинных перегонах ускорение при разгоне и пусковая мощность не могут иметь сильного влияния ни на скорость движения поездов, ни на расход электрической энергии. Техническая скорость движения поездов на таких перегонах по преимуществу определяется установившимся движением поезда. В виду этого передаточное число зубчатого механизма в этом случае должно быть определено, исходя из установившейся скорости.

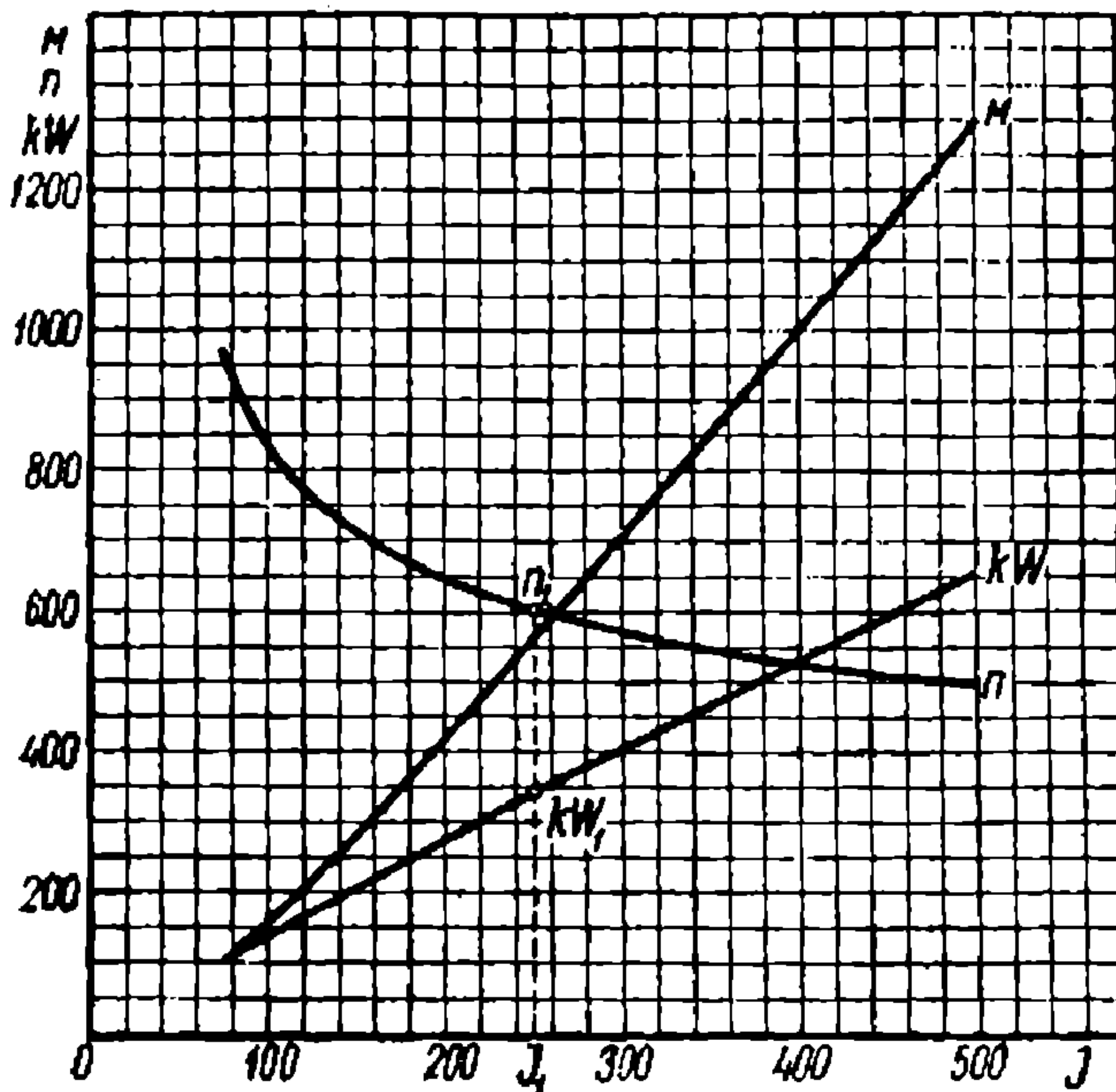


Рис. 38.

Предположим, что поезд должен иметь на данном подъеме i установившуюся скорость V . Тогда мощность, которую будет развивать на ободу колес моторный вагон или электровоз при установившемся движении, будет равна:

$$\frac{[P(\omega_0' + i) + Q(\omega_0'' + i)] V}{367} = kW. \quad (32)$$

Мощность на валу каждого двигателя будет:

$$kW_1 = \frac{[P(\omega_0' + i) + Q(\omega_0'' + i)] V}{367 m \eta_n}, \quad (33)$$

где:

m — число двигателей;

η_n — коэффициент полезного действия передачи от вала двигателя ведущим колесам.

УЧУНБ
УЧУНТ
(ДІП)

Обращаемся к электромеханическим характеристикам двигателя (рис. 38) и находим на них режим работы, соответствующий мощности kW_1 . Как видим из характеристик, при мощности kW_1 двигатель будет поглощать из сети ток I_1 . Ток I_1 соответствует скорости вращения n_1 . Зная n_1 , находим передаточное число μ зубчатого механизма по формуле (34):

$$\mu = \frac{\pi D_k n 60}{1000 V} = \frac{0,188 D_k n}{V}, \quad (34)$$

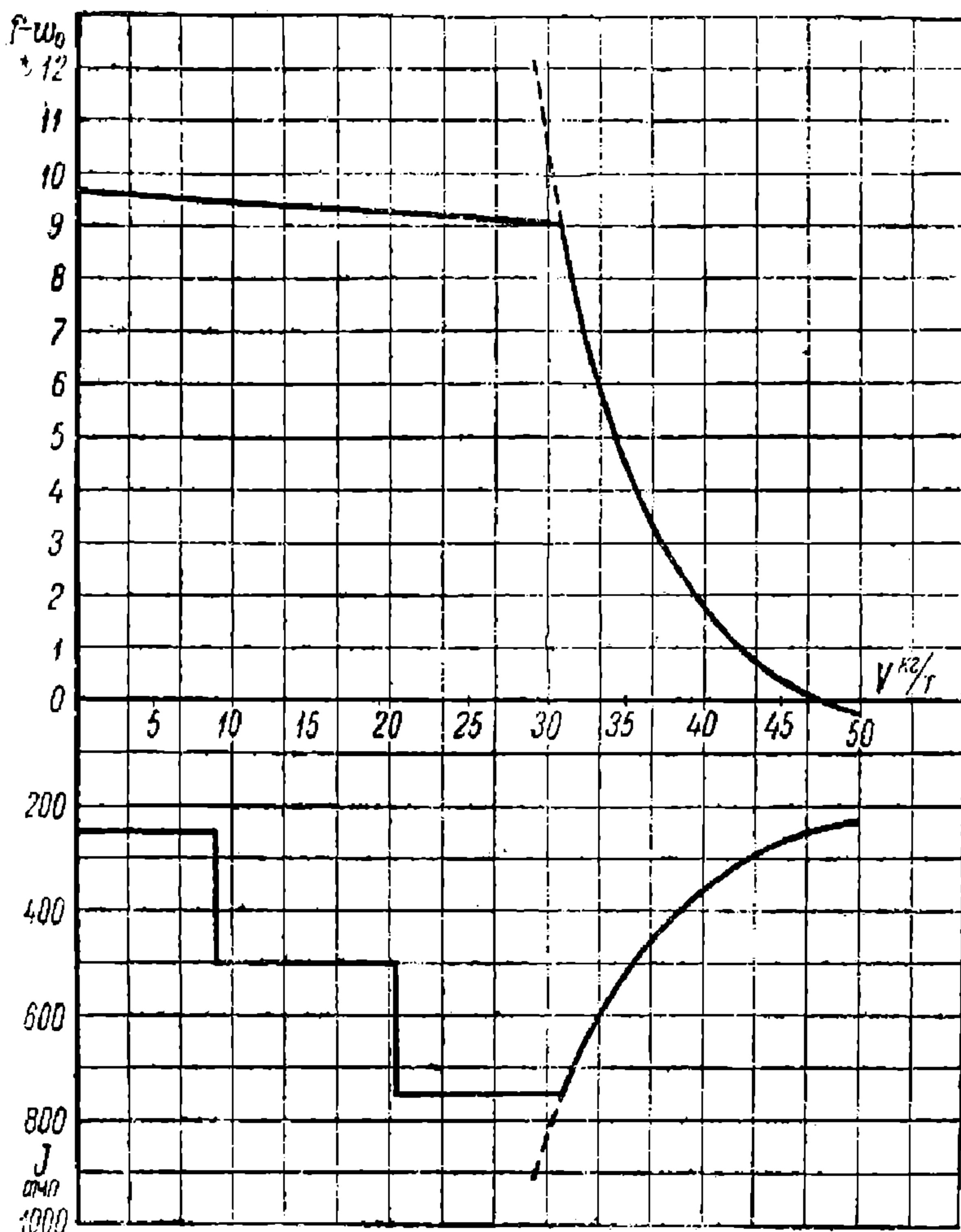


Рис. 39.

где V выражено в км/час, а диаметр колеса D_k — в м.

Если скорость подсчитывается в метрах в секунду, то

$$\mu = 0,0524 \frac{D_k n}{V}. \quad (85)$$

Таким образом необходимая для нас передача определяется.

Зная передачу, строим кривую удельной остаточной силы тяги. Получаем диаграмму, рис. 39. Нам остается определить пусковой ток при разгоне поезда.

Если мощность подстанций и сечение проводов это допускают, разгон поезда можно производить при максимальной силе тяги, допускаемой сцеплением. При этом мы будем иметь минимум расхода энергии. Если толчковые нагрузки, создаваемые при этих условиях, недопустимы, придется идти на снижение пусковой силы тяги, что при длинных перегонах не так сильно влияет на расход энергии. При ввяти поезда с места мы должны иметь надлежащее ускорение.

В нашем примере мы приняли для расчета среднюю силу тяги, равную силе тяги, реализуемой электровозом на руководящем подъеме.

Рассмотрим пример.

Предположим, что электровоз весом $P = 138 \text{ т}$ должен везти поезд $Q = 2030 \text{ т}$ на руководящем подъеме 9% со скоростью $V = 31 \text{ км/час}$. Определить передачу двигателей, если характеристики заданы на рис. 38. Поезд состоит из большегрузных товарных вагонов весом 70 т . Электровоз имеет шесть тяговых электродвигателей.

Определяем основное удельное сопротивление движения для электровоза и состава при скорости 31 км/час .

Для электровоза по формуле Davis'a будем иметь:

$$w_0' = 0,65 + \frac{13,15}{\Pi} + 0,0093 V + \frac{0,0045 S V^2}{P}, \quad (36)$$

где

Π — давление на ось,

S — площадь поперечного сечения электровоза, перпендикулярного продольной его оси.

Полагая в нашем случае $\Pi = 23 \text{ т}$ и $s = 12 \text{ м}^2$, для скорости $V = 31 \text{ км/час}$ будем иметь $w_0' = 1,89 \text{ кг/т}$.

Для состава удельное сопротивление движению находим по формуле Иллинойского университета:

$$w_0'' = \frac{V + 65}{12 + 0,55q}, \quad (37)$$

где q — вес вагона брутто.

Для $q = 70$ и $V = 31$ получаем $w_0'' = 1,9 \text{ кг/т}$. По формуле (38) находим мощность на валу двигателя, развиваемую на руководящем подъеме

$$kW_1 = \frac{[138(1,89+9) + 2030(1,9+9)]31}{367 \cdot 6 \cdot 0,97} = 343.$$

Из характеристики рис. 38 находим, что при мощности 343 kW двигатель делает 603 оборота в минуту. Принимая диаметр колеса равным $1,2 \text{ м}$, по формуле (34) имеем

$$\mu = \frac{0,188 \cdot 1,2 \cdot 603}{31} = 4,39.$$

Можно остановиться на передаче $87:20 = 4,35$.

Выбрав передачу, необходимо проверить, получим ли мы при ней надлежащую скорость движения поездов на дороге вообще и в част-

ности на наиболее трудном ее перегоне, определяющем пропускную способность. Кроме того нужно выяснить, с каким расходом энергии движение поездов будет связано и какой нагрев получают при этом тяговые электродвигатели.

Все эти вопросы могут быть разрешены общеизвестными методами производства тяговых расчетов, однако в некоторых случаях достаточно точные результаты могут дать приближенные способы. К числу таковых способов относится метод равновесных скоростей, находящий себе широкое применение в практике тяговых расчетов для дорог с длинными перегонами. Метод этот, как известно, не строит полной кривой изменения скорости поезда на данном профиле пути, а предполагает, что каждый данный подъем проходит при той скорости, которую поезд мог бы приобрести на подъеме данной крутизны при установившемся движении. Таким образом в расчете по этому методу принимается, что при переходе с одного элемента профиля на другой скорость поезда изменяется не плавно, а скачком, и сразу приобретает значение установившейся или равновесной скорости, соответствующей данному подъему.

Мы не будем здесь останавливаться на изложении существа метода равновесных скоростей, так как он подробно изложен в большинстве руководств по тяговым расчетам.¹

При применении метода равновесных скоростей обыкновенно рассматривают один за другим все последовательно расположенные элементы профиля всей дороги и находят для каждого из них время хода, расход энергии и т. д. Если мы ставим себе задачей определить время хода, расход энергии и нагрев двигателя не для каждого перегона дороги в отдельности, а сразу для всей дороги в целом или для полного тягового участка, нам, очевидно, нет необходимости учитывать каждый элемент профиля. Мы можем определять суммарное время хода, суммарный расход энергии и суммарную величину I^2t для суммарного протяжения всех подъемов, имеющих одну и ту же крутизну $i\%$. Таким образом для расчета нам достаточно иметь процентное содержание подъемов и спусков каждой крутизны в профиле нашей линии.

Рассмотрим решение задачи на примере, разобранным на стр. 55. Предположим, что тяговый участок, на котором работает электровоз, имеет подъемы и спуски, перечисленные в столбце первом табл. 2. Подъемы и спуски даны с учетом кривых. Предположим, что суммарное протяжение подъемов данной крутизны, выраженное в процентах от общего протяжения участка, дано для четного направления в столбце третьем таблицы, а для нечетного направления в столбце пятом.

На основании диаграммы рис. 39 выписываем в столбце втором таблицы те установившиеся или равновесные скорости V , которые поезд будет иметь на данном подъеме. Для спусков выписываем скорости на основании ограничения по тормозам.

¹ См. Ю. В. Домоносков, Тяговые расчеты, Верный, 1922, стр. 197. В. Ф. Егорченко, Тяговые расчеты, 1930, стр. 197. Проф. А. Б. Лебедев, Расчеты элементов электрических жел. дорог, стр. 93. Г. А. Лучай, Тяговые расчеты при электрической тяге, 1932, стр. 89, и т. д.

i°/∞	V_i км/час	Четное направление		Нечетное направление	
		$\alpha_i\%$	$\frac{\alpha_i}{V_i}$	$\alpha_i\%$	$\frac{\alpha_i}{V_i}$
9	31	11,25	0,363	10,73	0,346
8	31,5	1,97	0,063	2,36	0,075
7	32	3,98	0,124	4,45	0,139
6	33	4,49	0,136	5,02	0,152
5	34,5	1,47	0,043	1,56	0,045
4	36	0,98	0,027	0,96	0,027
3	37,6	4,08	0,109	3,65	0,097
2	39,5	0,66	0,017	1,06	0,027
0	47	46,04	0,980	46,07	0,980
-2	50	0,96	0,019	0,98	0,020
от -3 до -5	45	4,08	0,091	3,93	0,087
от -5 до -9	40	20,04	0,501	19,23	0,481
		100	$\sum \frac{\alpha_i}{V_i} = 2,473$	100	$\sum \frac{\alpha_i}{V_i} = 2,476$

Если обозначить через α_i — суммарное протяжение подъемов величиною i на данном тяговом участке, выраженное в процентах от его длины L , то время T пробега участка, очевидно, может быть определено по формуле:

$$T = \sum \frac{\alpha_i L}{100 V_i} + N\tau, \quad (38)$$

где:

N — число остановочных пунктов,

τ — дополнительное время, затрачиваемое на приобретение и потерю скорости на каждом остановочном пункте.

Формулу (38) можно переписать следующим образом:

$$T = \frac{L}{100} \sum \frac{\alpha_i}{V_i} + N\tau \quad (39)$$

или

$$T = L \left[\frac{1}{100} \sum \frac{\alpha_i}{V_i} + n\tau \right], \quad (40)$$

где $n = \frac{N}{L}$ — число остановочных пунктов на 1 км пути.

Из формулы (40) совершенно очевиден метод расчета.

Для определения величины T найдем для каждого данного подъема i величину $\frac{\alpha_i}{V_i}$. Для четного направления дороги напишем эти величины в четвертом столбце табл. 2, а для нечетного — в шестом. Далее просуммируем все числа столбцов четвертого и шестого. Мы получим таким образом величины $\sum \frac{\alpha_i}{V_i}$ для обоих направлений.

Величину τ , т. е. дополнительное время, затрачиваемое на разгон и торможение, можно приближенно принять равным 2 мин. Предположим, что на нашем тяговом участке среднее расстояние между остановочными пунктами равно 16,6 км, т. е. $n = \frac{1}{16,6} = 0,06$. Таким образом для нашего примера будем иметь время хода в четном направлении

$$T_2 = L \left[0,02473 + 0,06 \cdot \frac{12}{60} \right] = 0,02673 L \text{ час.}$$

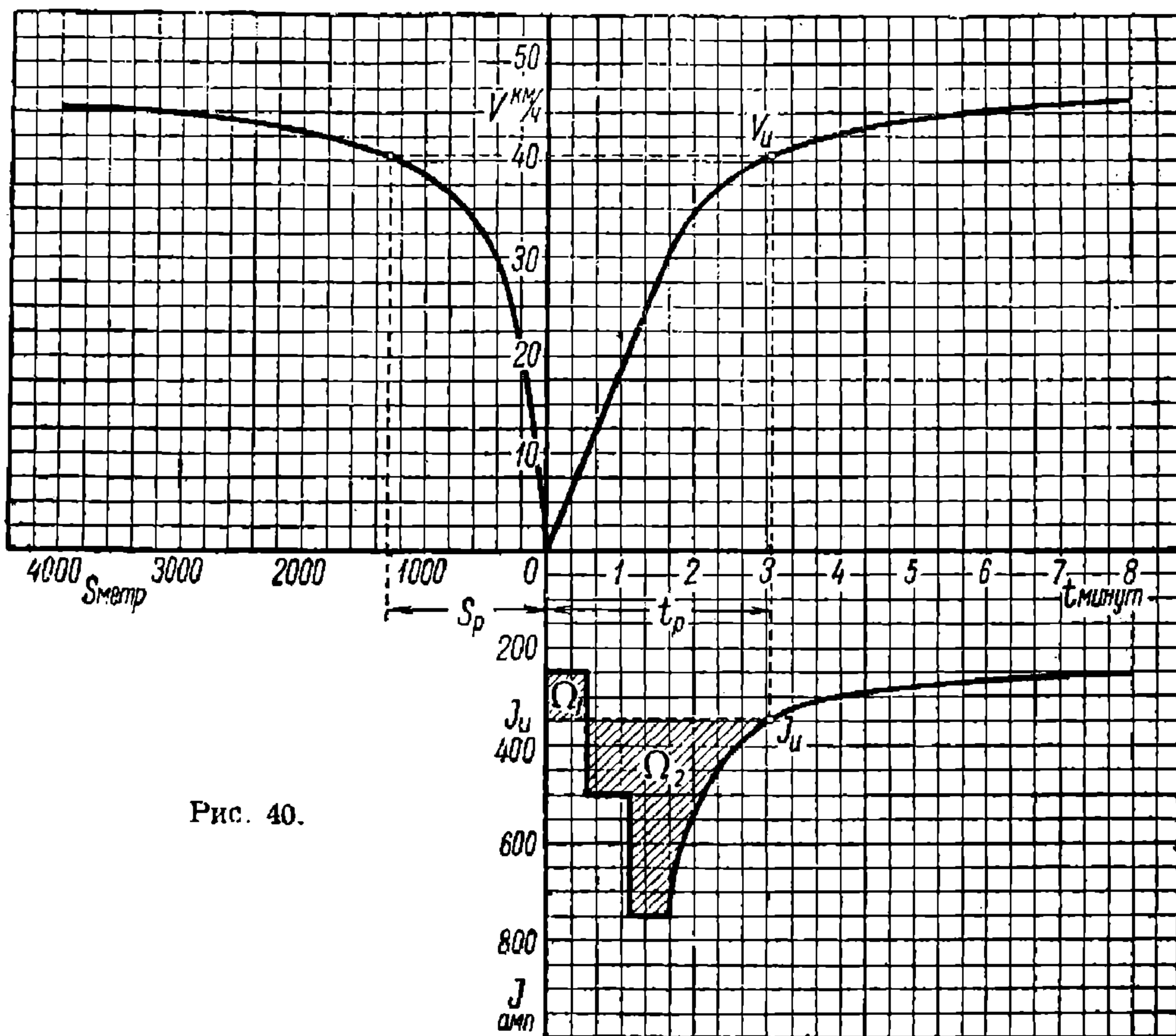


Рис. 40.

Время хода для нечетного направления получится равным

$$T_1 = L \left[0,02476 + 0,06 \cdot \frac{2}{60} \right] = 0,02676 L \text{ час.}$$

Среднеходовая или техническая скорость для четного направления будет, очевидно, равна

$$V_2 = \frac{L}{T_2} = \frac{1}{0,02673} = 37,4 \text{ км/час.}$$

Для нечетного направления скорость определится так же.

Мы определили времена хода и скорости, приняв величину $\tau = 2$ мин. Более точно можно получить значение τ , построив диаграммы разгона и торможения поезда.

Предположим, что на рис. 40 построена диаграмма $V = \varphi(t)$ и $V = \psi(s)$ для разгона поезда на площадке. Отметим на диаграмме ту среднюю скорость, с которой будет проходить рассматриваемый тяговой участок поезд, движущийся безостановочно. Очевидно, что эта скорость будет равна

$$V_u = \frac{L}{T} = \frac{100}{\sum \frac{a_i}{V_i}} \quad (41)$$

Беря из таблицы величину $\sum \frac{a_i}{V_i}$, находим V_u и отмечаем ее на диаграмме.

В нашем случае, в среднем для обоих направлений

$$V_u = \frac{100}{2,474} = 40,5 \text{ км/час.}$$

Мы получаем, что для разгона до скорости V_u требуется время t_p , причем разгон этот происходит на пути s_p .

В нашем расчете таблицы мы предполагали, что путь s_p проходится безостановочно. Предполагая, что в среднем путь на станционных площадках прямолинеен и горизонтален, можно считать, что при безостановочном ходе на пробег пути s_p тратится время $\frac{s_p}{V_0}$, где V_0 —

скорость движения поезда на площадке. Таким образом разгон требует дополнительной затраты времени, равной

$$\tau_p = t_p - \frac{s_p}{V_0} \quad (42)$$

В нашем примере

$$\tau_p = 3,06 - \frac{1,3 \cdot 60}{47} = 1,4 \text{ мин.}$$

Обращаемся теперь к диаграмме выбега и торможения, построенной на рис. 41. Отмечаем на диаграмме скорость V_u . Мы видим, что для остановки поезда от этой скорости при нормальном ходе затрачивается время t_b и проходится путь s_b . На пробег этого пути при

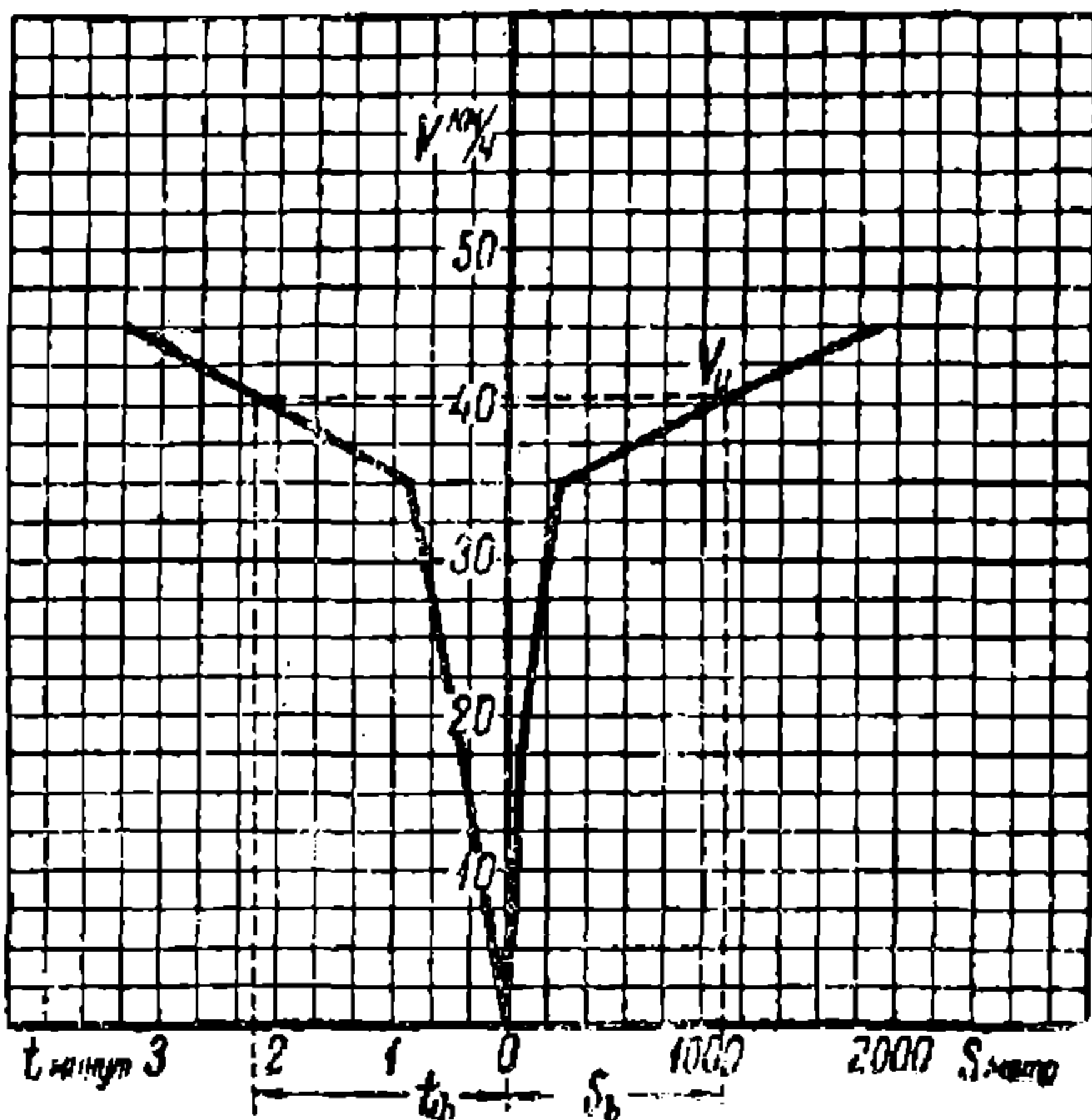


Рис. 41

безостановочном ходе в среднем затрачивалось бы время $\frac{s_0}{V_0}$. Таким образом дополнительная затрата времени на вылет и торможение при подходе к станции выразится, как

$$\tau_0 = t_0 - \frac{s_0}{V_0} \quad (43)$$

Очевидно, что величина τ будет равна

$$\tau = \tau_p + \tau_0. \quad (44)$$

В рассматриваемом нами примере

$$\tau_0 = 2,2 - \frac{1,11 \cdot 60}{47} = 0,8 \text{ мин.},$$

а потому

$$\tau = 1,4 + 0,8 = 2,2 \text{ мин.}$$

Перейдем теперь к расходу энергии на движение поезда на нашем тяговом участке. Удельный расход энергии может быть подсчитан по формуле (3), однако несколько более простой подсчет может быть произведен методом, изложенным ниже.

Расход энергии на движение поезда, как известно, равняется

$$A = \int_0^T EJ dt, \quad (45)$$

где E — напряжение на токоприемнике.

Принимая напряжение на токоприемнике постоянным и равным среднему напряжению, получим

$$A = E \int_0^T J dt. \quad (46)$$

Вводившая эту формулу применительно к методу равновесных скоростей, мы можем написать следующее приближенное выражение для A :

$$A = E \sum_0^T J_i \Delta t_i + A_c N, \quad (47)$$

где:

Δt_i — время пробега данного подъема, на котором электровоз поглощает ток J_i ;

A_c — добавочный расход энергии, вызванный остановкой; он равен потерям в пусковых реостатах и тормозах.

Применяя формулу (47) ко всему тяговому участку в целом, мы можем понимать под Δt_i суммарное время пробега всех подъемов крутизной i . Тогда

$$\Delta t_i = \frac{a_i l}{100 V_i}. \quad (48)$$

Подставляя выражение (48) в формулу (47), получим

$$A = \frac{EL}{100} \sum \frac{a_i}{V_i} J + A_c N. \quad (49)$$

Удельный расход энергии, очевидно, будет равен

$$a = \frac{A}{L(P + Q)} \quad (50)$$

т. е.

$$a = \frac{E}{100(P + Q)} \sum \frac{a_i}{V_i} J_i + a_c \quad (51)$$

где a_c — удельный добавочный расход энергии на остановки, равный

$$a_c = \frac{A_c N}{(P + Q)L} = \frac{A_c n}{P + Q} \quad (52)$$

Из формулы (51) следует метод расчета.

Выпишем в первом столбце табл. 3 все подъемы и спуски, имеющиеся в продольном профиле пути нашего тягового участка.

Таблица 3

‰	J_i ампер	Четкое направление	
		$\frac{a_i}{V_i}$	$J_i \frac{a_i}{V_i}$
9	750	0,363	272
8	710	0,063	45
7	660	0,124	82
6	610	0,136	83
5	557	0,043	24
4	500	0,027	13
3	435	0,109	47
2	370	0,017	6
0	242	0,980	237
-2	35	0,019	1
		$\sum J_i \frac{a_i}{V_i} = 810$	

Найдем по характеристике ускоряющей силы тяги (рис. 39) те точки, которые поезд будет поглощать на каждом из подъемов и спусков. Эти точки выписаны в столбце втором табл. 3. Мы предполагаем, что в нашем примере электровоз не имеет рекуперативного торможения, в виду чего сила тока для всех вредных спусков положена равной нулю.

Некоторую трудность может представлять установление силы тока для тех безвредных спусков, на которых при езде по автоматической характеристике мы получили бы недопустимо большую скорость. В нашем примере (рис. 39) таким спуском является спуск в 2‰. Очевидно, в электровозе без рекуперации на таком спуске, если он

затяжной, необходимо применить пилообразную езду, т. е. попеременно включать ток, сохраняя скорость поезда вблизи предельной, но не выше ее. Среднюю силу тока, которую при этом будет поглощать электровоз, можно положить равной

$$J = \frac{(P + Q)(w_0 - i)V_i \cdot 10^3}{367 E \eta} \quad (53)$$

где η — средний коэффициент полезного действия электровоза для тех нагрузок, которые он получает при включениях на данном спуске. Таким образом силу тока для всех подъемов и спусков мы определили.

Для удобства нахождения токов J_i целесообразно построить диаграмму зависимости тока J_i от величины подъема. Для нашего примера такая диаграмма дана на рис. 42. Мы видим, что на спуске $i = 2,3$ ‰ сила тока равна нулю и установившееся движение поезда происходит за счет силы тяжести без применения тормозов.

Воспользуемся теперь данными табл. 2 и выпишем в столбце третьем таблицы 3 для каждого подъема величину $\frac{a_i}{V_i}$ для пробега в четном направлении. Найдем далее для каждого подъема величину $J_i \frac{a_i}{V_i}$ и напишем ее в столбце четвертом. Числа этого столбца таким образом представляют собою произведение чисел столбцов второго и третьего. Просуммировав все числа столбца четвертого, мы найдем для четного направления величину $\sum J_i \frac{a_i}{V_i}$. Аналогичным образом ту же величину можно найти и для нечетного направления. Величина a_c может быть найдена двойко.

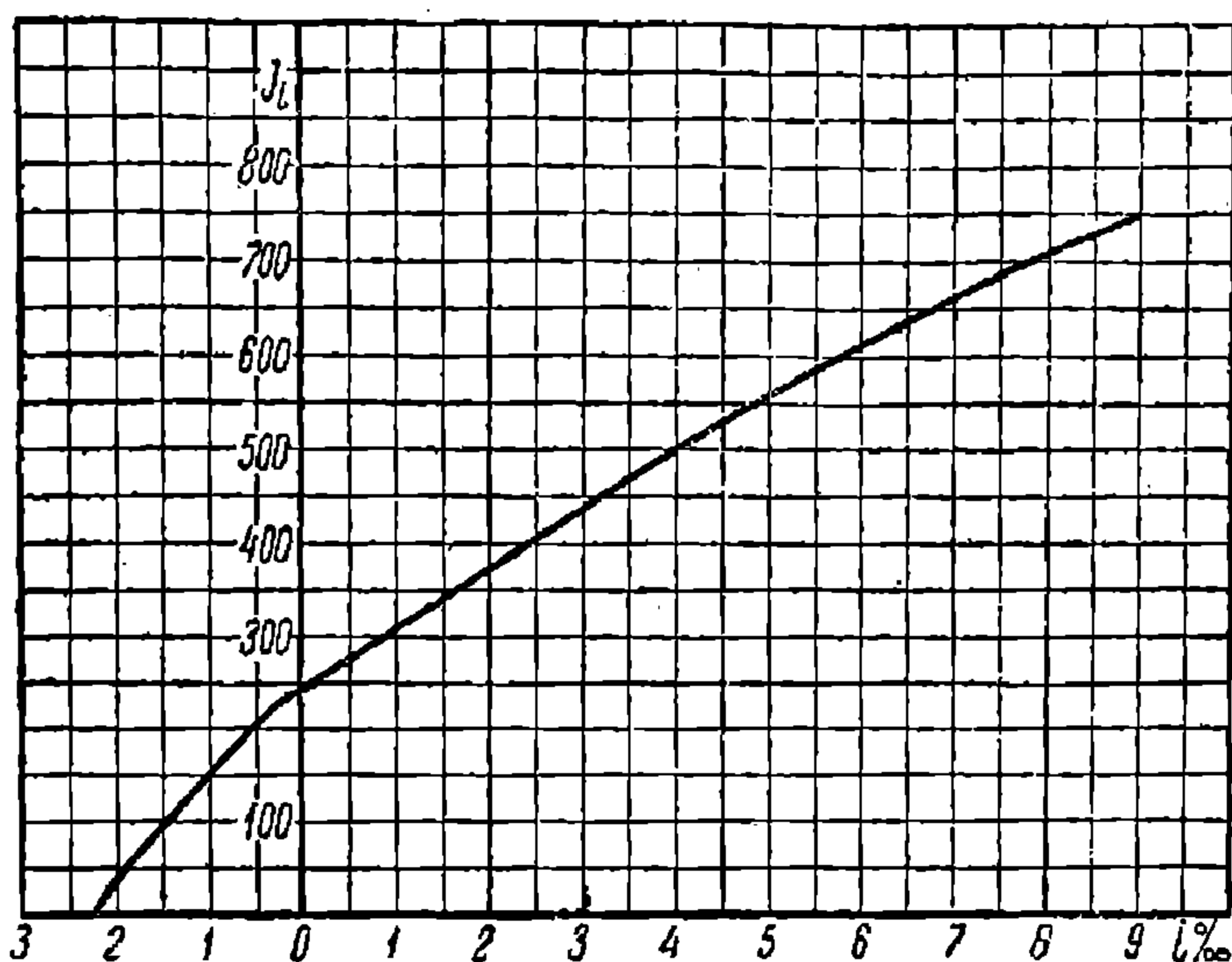


Рис. 42.

Учитывая, что a_c представляет собою сумму удельных расходов энергии в реостатах и тормозах, можно определить ее по формуле¹

$$a_c = 0,5n \left[2,725 w_p \frac{V_a^2}{2w_1} + 0,0107 V_a^2 \right] + 0,0107 (1 + \gamma) n V_b^2 \frac{b_c}{b_c + w_0}. \quad (54)$$

В этой формуле мы принимаем те же обозначения, как и в формулах на стр. 10 и 12.

С другой стороны, величину a_c можно определить по диаграмме рис. 40. Отметим на ней ток J_u , соответствующий скорости V_u , и проведем прямую $J_u J_u$, параллельную оси абсцисс. Мы видим, что по сравнению с безостановочным ходом каждая остановка вызывает дополнительный расход тока, выражающийся разностью площадей $\Omega_2 - \Omega_1$.

¹ См. В. А. Шевалин. Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев, 1931, стр. 287 и 295.

Если $\Omega_2 - \Omega_1$ выражена в ампер-часах, то

$$a_c = \frac{(\Omega_2 - \Omega_1) E}{P + Q} n. \quad (55)$$

Таким образом все слагаемые в формуле (51) нами определены и мы можем рассчитать удельный расход энергии a .

В нашем примере $\Omega_2 - \Omega_1 = 7,13 \text{ Ah}$, а потому для напряжения 3000 V в контактном проводе согласно формуле (55) имеем

$$a_c = \frac{3000 \cdot 7,13}{138 + 2030} \cdot 0,06 = 0,6 \text{ ваттчаса на тоннокилометр.}$$

Далее, беря из табл. 3 величину $\sum \frac{a_i}{V_i} J_i$, по формуле (51) получаем удельный расход энергии для четного направления:

$$a = \frac{3000}{100(138 + 2030)} \cdot 810 + 0,6 = 11,8 \approx 12 \text{ ваттчасов на тоннокилометр.}$$

Отметим, что отрицательная площадь Ω_1 появилась в нашем примере результатом того, что мы применили три группировки двигателей при пуске. Если бы в электровозе мы имели только две группировки (последовательное и параллельное включение), то отрицательная площадь Ω_1 отсутствовала бы.

Нам остается проверить тяговые электродвигатели на нагревание. Сделаем это помощью метода среднеквадратичного тока. Как известно, среднеквадратичный ток равен

$$I_s = \sqrt{\frac{\int_0^T I^2 dt}{T}}, \quad (56)$$

где I — ток, протекающий через один тяговый электродвигатель.

Применительно к методу равновесных скоростей можно приближенно написать

$$I_s = \sqrt{\frac{\sum_0^T I_i^2 \Delta t_i + CN}{T}}, \quad (57)$$

где C есть увеличение $\int_0^T I^2 dt$, вызванное одним разгоном.

$$\text{Так как} \quad N = \frac{L}{l}, \quad (58)$$

где l — длина перегона между остановочными пунктами, то, воспользовавшись выражением (48) для Δt_i , получим

$$I_s = \sqrt{\frac{L}{100T} \sum I_i^2 \frac{a_i}{V_i} + \frac{CL}{Tl}}. \quad (59)$$

Так как $\frac{L}{T}$ есть техническая скорость V_x , то

$$I_s = \sqrt{\left[0,01 \sum I_i^2 \frac{a_i}{V_i} + \frac{C}{l} \right] V_x}. \quad (60)$$

Для подсчета величины $\sum I_i^2 \frac{a_i}{V_i}$ составим табл. 4. Первый столбец, как и в предыдущих двух таблицах, включает в себе перечень всех подъемов и спусков, имеющихя в профиле нашего тягового участка. Во втором столбце помещены квадраты сил токов, протекающих по одному двигателю. В столбцах третьем и пятом из табл. 2 выписаны величины $\frac{a_i}{V_i}$ для четного и нечетного направления. В столбцах четвертом и шестом дан подсчет величин $I_i^2 \frac{a_i}{V_i}$, представляющих собою произведение чисел второго и третьего, а также второго и пятого столбца.

Просуммировав все числа столбцов четвертого и шестого табл. 4, находим величину $\sum I_i^2 \frac{a_i}{V_i}$ для обоих направлений движения.

Таблица 4

$i^{\text{дв}}_{\text{дв}}$	I_i^2	Четное направление		Нечетное направление	
		$\frac{a_i}{V_i}$	$I_i^2 \frac{a_i}{V_i}$	$\frac{a_i}{V_i}$	$I_i^2 \frac{a_i}{V_i}$
9	62 500	0,363	22 700	0,345	21 600
8	56 000	0,063	3 530	0,075	4 200
7	48 400	0,124	6 000	0,139	6 730
6	41 300	0,136	5 620	0,152	6 280
5	34 420	0,043	1 480	0,045	1 548
4	27 770	0,027	750	0,027	750
3	21 020	0,109	2 291	0,097	2 040
2	15 200	0,017	258	0,027	411
0	6 500	0,980	6 370	0,980	6 370
-2	122	0,019	2	0,02	2
			$\sum I_i^2 \frac{a_i}{V_i} =$ = 49 001		$\sum I_i^2 \frac{a_i}{V_i} =$ = 49 931

Для определения величины C строим на рис. 43 диаграмму I^2 в функции времени для разгона поезда. Отмечаем на диаграмме время t_p , потребное для разгона поезда до скорости V_x (см. стр. 59). Находим таким образом I_x^2 . Проводим прямую AB , параллельную оси абсцисс. Величина C будет определяться заштрихованной площадью. В зависимости от тех единиц, в которых мы выражаем время, C должно быть выражено в ампер²-часах, ампер²-минутах или ампер²-секундах.

Так как время T и скорость $V_x = \frac{L}{T}$ мы нашли уже ранее, теперь мы имеем все данные для расчета эквивалентного тока I_x по формуле (60). В нашем примере $C = 1596$ ампер²-часов. Скорость V_x получилась равной 37,4 км/час (см. стр. 58). Средняя длина перегона была задана равной 16,6 км. Поэтому согласно формуле (60) в соответствии с рас-

четом табл. 4 эквивалентный ток для обоих направлений движения будет:

$$I_3 = \sqrt{\left[490,01 + 499,31 + \frac{1596}{16,6} \right]} 37,4 = 202 \text{ А.}$$

Расчет нагревания двигателя по эквивалентному току даст, как известно, удовлетворительные результаты, если профиль пути на всем протяжении тягового участка однороден. Если трудная часть профиля сосредоточена в одном месте, необходимо применить другие методы¹.

Вместо расчета по эквивалентному току можно провести расчет по средним нагревающим потерям в двигателе. Ход расчета будет тот же, только вместо I^2 в формулах (57), (59) и (60) и в табл. 4 придется подставить нагревающие потери W_a . В результате расчета мы получим средние нагревающие потери, которые надлежит сравнить с нагревающими потерями при продолжительной мощности.

Мы изложили метод приближенного определения технической скорости, расхода энергии и нагрева двигателя для случая работы электровоза на тяговом участке дороги. Очевидно, что тот же метод в полной мере применим ко всей дороге в целом или к наиболее трудному ее перегону, если мы будем иметь данные о суммарном пропелтном протяжении подъемов и спусков на всей дороге или на наиболее трудном перегоне, определяющем пропускную способность.

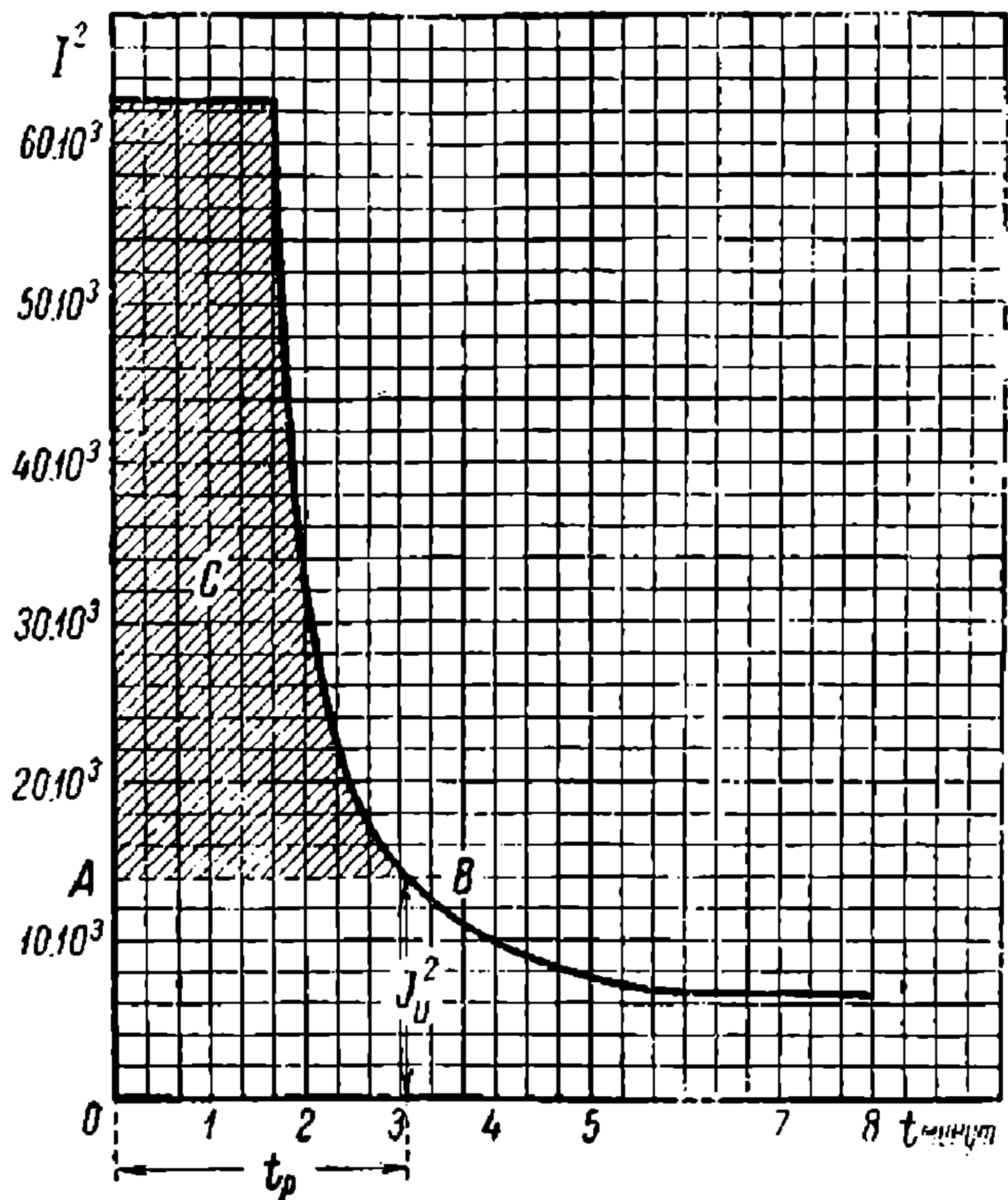


Рис. 43.

Мы изложили метод приближенного определения технической скорости, расхода энергии и нагрева двигателя для случая работы электровоза на тяговом участке дороги. Очевидно, что тот же метод в полной мере применим ко всей дороге в целом или к наиболее трудному ее перегону, если мы будем иметь данные о суммарном пропелтном протяжении подъемов и спусков на всей дороге или на наиболее трудном перегоне, определяющем пропускную способность.

¹ См. В. А. Шовалев, Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев, 1931, стр. 314.

НБ
УДМУНТ
(ДИПТ)

ГЛАВА III

Принцип подобия в тяговых расчетах

Практическое значение принципа подобия для тяговых расчетов

Электромеханические характеристики тяговых двигателей различных мощностей с известной точностью можно считать подобными друг другу¹

Благодаря этому при определенных соотношениях между силой тяги и сопротивлением движению, а также при определенных соотношениях между временем движения под током и временем выбега, диаграммы движения поезда на различных перегонах при надлежащих мощностях двигателей будут приблизительно подобны друг к другу. Мы ниже доказываем это положение и отмечаем, за счет каких погрешностей этот вывод может быть сделан.

Подобие диаграмм движения является для тяговых расчетов весьма ценным обстоятельством, так как оно может облегчить разрешение ряда практических вопросов, встречающихся при проектировании. Достаточно для какого-либо одного перегона подробно проработать диаграммы движения для различных скоростей хода, различных мощностей двигателей и т. п., чтобы по этим диаграммам иметь возможность приблизительно установить требуемую мощность двигателя, надлежащий пусковой его режим, целесообразный порядок движения поезда и расход электрической энергии для любого перегона с соответствующим средним подъемом.²

Если электромеханические характеристики тяговых двигателей можно считать приблизительно подобными, то мы можем построить универсальную электромеханическую характеристику, принимая часовую силу тока, часовую скорость и часовую силу тяги за единицу. Такая характеристика, построенная для двигателей моторных вагонов пригородных жел. дорог, дана на рис. 44.

¹ См. В. А. Шевалин, Тяговые расчеты электрических железных дорог и трамваев, 1931, стр. 31—33.

² Метод подобия в тяговых расчетах в последнее время подробно проработан Dr. H. Voigtländer'ом в его труде *Fahrzeit, Motorleistung und Wattstundenverbrauch bei Strassen- und Stadtschnellbahnen*, Berlin, 1931. Неточностью метода Voigtländer'a является то, что он принимает сопротивление движению не зависящим от скорости движения поезда. Излагаемый нами метод лишен этого недостатка, однако приведенные здесь выводы не проработаны с той полнотой и подробностью, как выводы Dr. Voigtländer'a. Ввиду этого читателей, интересующихся методом подобия, автор отсылает к вышеупомянутому труду.

Универсальная тяговая характеристика моторного вагона

Если мы принимаем, что электромеханические характеристики двигателей подобны, мы можем сказать, что тяговые характеристики двигателей также подобны, и может быть построена универсальная тяговая характеристика. На диаграмме рис. 45 такая тяговая характеристика двигателя изображена, причем в ней скорость, сила тяги и ток часовой мощности так же приняты за единицу.

Если полная сила тяги двигателя, отнесенная к силе тяги часовой мощности, может быть выражена универсальной кривой рис. 45,

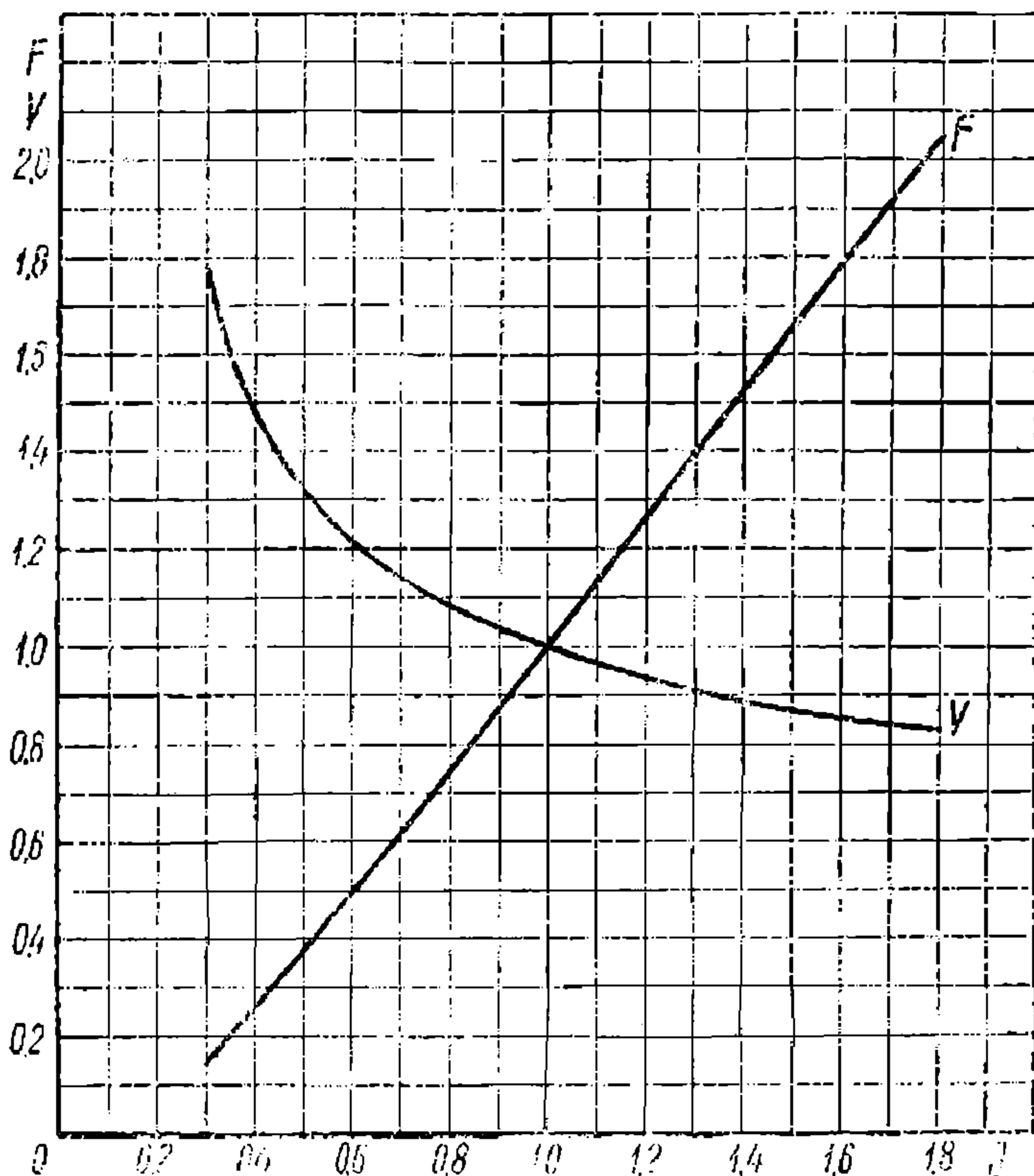


Рис. 44.

то, очевидно, что та же кривая будет универсальной характеристикой и удельной силы тяги поезда, если удельную силу тяги при часовой мощности двигателя принять за единицу.

Если силу тяги универсальной характеристики, выраженную в долях от силы тяги при часовой мощности, обозначить через ϕ , то действительная удельная сила тяги при любой скорости может быть выражена следующим образом:

$$f = \phi f_0 \quad (61)$$

где f_0 — удельная сила тяги при часовой мощности.

НБ
УДУНТ
(ДПТ)

Аналогичным образом для скорости и силы тока, поглощаемого поездом, будем иметь

$$V = vV_u, \quad (62)$$

$$J = jJ_u, \quad (63)$$

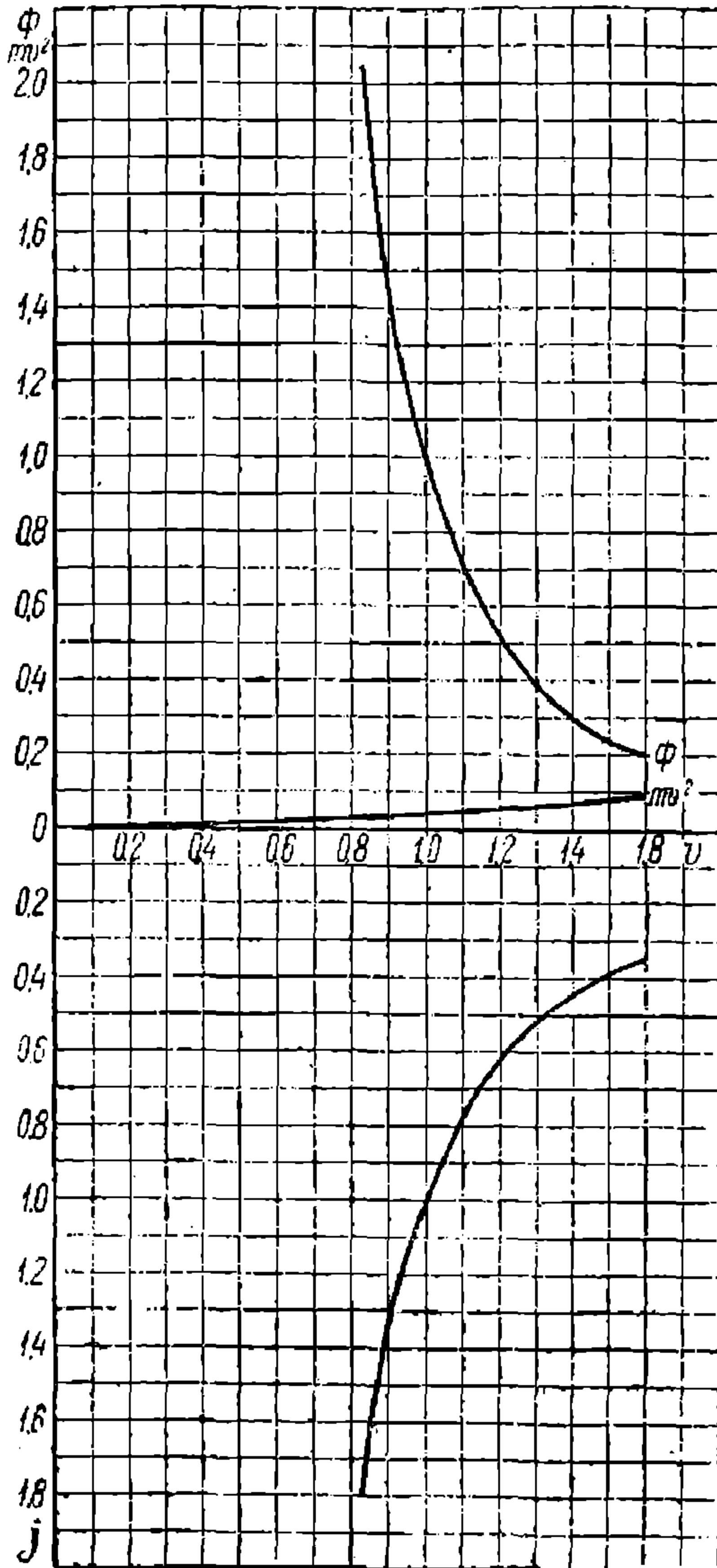


Рис. 45.

где:

V_u и J_u — скорость и сила тока поезда при часовой мощности,

v и j — скорость и сила тока поезда по универсальной характеристике рис. 45.

Удельная диаграмма универсальной удельной ускоряющей силы тяги — основное сопротивление движению с достаточной точностью можно выразить формулой вида

$$w_0 = a + cV^2. \quad (64)$$

Тогда удельная остаточная сила тяги для подъема i может быть выражена так:

$$f - w = \phi f_u - a - i - cV^2. \quad (65)$$

Обозначим

$$\frac{a + i}{f_u} = k. \quad (66)$$

С другой стороны, согласно формуле (62)

$$\frac{cV^2}{cV_u^2} = \left(\frac{V}{V_u}\right)^2 = v^2, \quad (67)$$

т. е.

$$f - w = \phi f_u - a - i - cV_u^2 v^2. \quad (68)$$

Пусть

$$\frac{cV_u^2}{f_u} = m. \quad (69)$$

Тогда

$$f - w = (\phi - k - mv^2) f_u \quad (70)$$

НЕ
УДУНТ
(ДУНТ)

Нанесем на диаграмме рис. 45 параболу mv^2 , где параметр m есть отношение переменной составляющей удельного сопротивления движению при часовой скорости к удельной силе тяги при часовой мощности (формула 69). Вычитая ординаты параболы из ординат кривой ϕ , мы получим кривую $(\phi - mv^2)$ в функции v , изображенную на рис. 46.

Для данного m из кривой рис. 46 можно найти универсальную диаграмму удельной ускоряющей силы тяги. Действительно, если мы хотим иметь эту кривую для данного подъема i , то по постоянной составляющей сопротивления движения a и подъему i нужно найти величину $k = \frac{a+i}{f_v}$. Проведем

в нашем масштабе на расстоянии k от прямой Ov прямую $O_k v$. Тогда кривая $(\phi - mv^2)$, рассматриваемая относительно оси $O_k v$, как оси абсцисс, даст нам универсальную диаграмму остаточной силы тяги для данного подъема. Эта кривая будет справедлива для данного m . Из изложенного следует, что за единицу универсальной удельной остаточной силы тяги принимается удельная сила тяги при часовой мощности.

Так как величина часовой скорости для данного вида тяги и данной категории поездов меняется в сравнительно узких пределах, можно получить универсальную диаграмму ускоряющей силы тяги для поезда данной категории, если принять некоторое среднее значение m для поездов этого типа. Ввиду того, что универсальная характеристика двигателей не в полной мере совпадает с действительными их характеристиками, введение в расчет среднего значения m не снижает заметным образом точности тех расчетов и выводов, которые могут быть сделаны на основе универсальных характеристик.

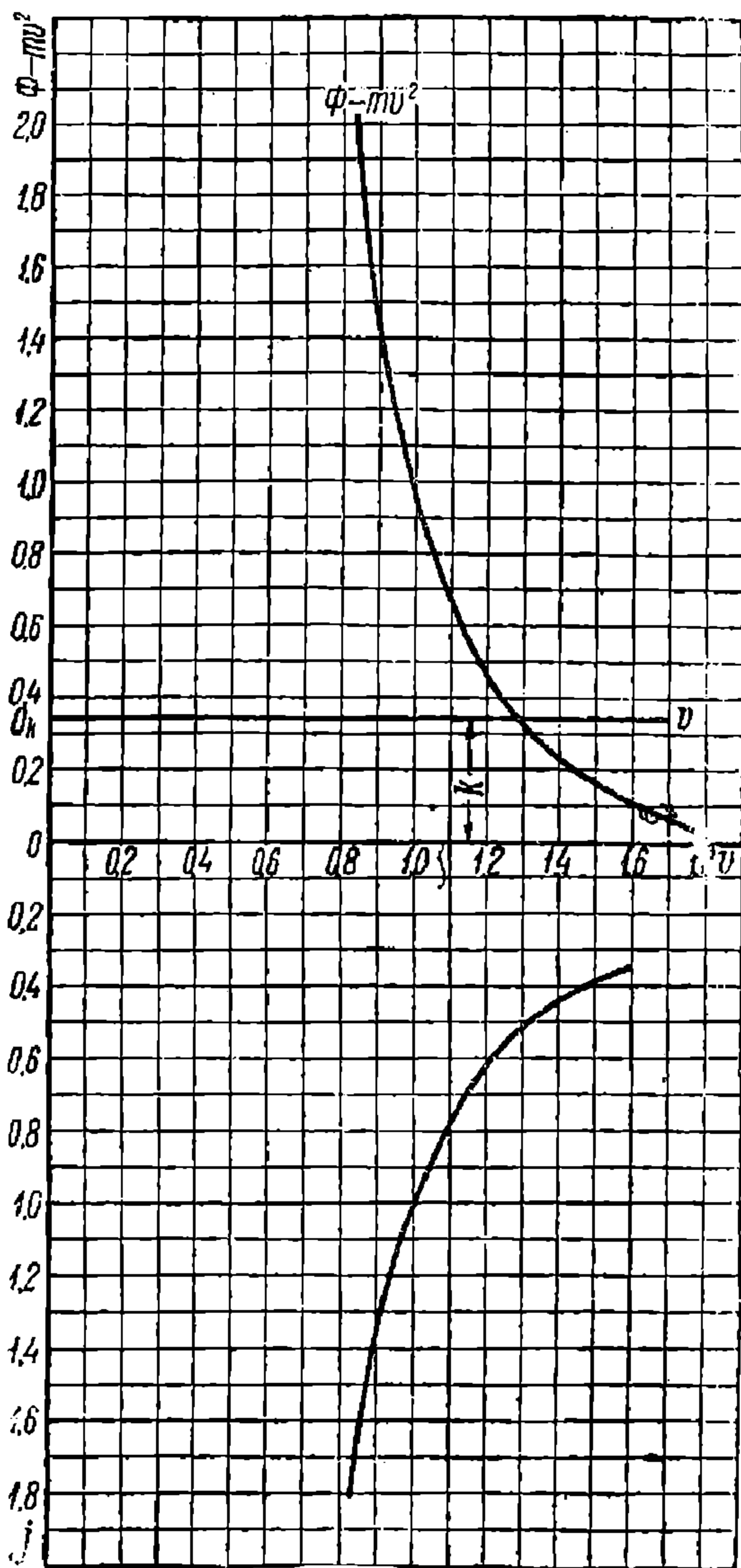


Рис. 46.

введение в расчет среднего значения m не снижает заметным образом точности тех расчетов и выводов, которые могут быть сделаны на основе универсальных характеристик.

На диаграмме универсальной характеристики остаточной силы тяги на рис. 46 нами нанесена также универсальная диаграмма силы тока.

Пользуясь уравнением (70), мы можем написать уравнение второго закона движения Ньютона следующим образом:

Единица ускорения в универсальных диаграммах движения

$$f_u (\phi - k - mv^2) = \sigma \frac{dV}{dt} \quad (71)$$

Откуда

$$\frac{dV}{dt} = f_u (\phi - k - mv^2). \quad (72)$$

Мы видим, что кривая универсальной остаточной силы тяги $(\phi - k - mv^2)$ будет выражать величину ускорения при данной скорости, если за единицу ускорения мы примем величину $\frac{f_u}{\sigma}$. Единица ускорения, очевидно, есть то ускорение, которое мы получили бы, если на поезд действовала бы удельная сила тяги f_u при отсутствии сопротивления движению.

Зависимость скорости от времени в универсальных диаграммах

Из уравнения (72) следует, что

$$dt = \frac{\sigma}{f_u} \cdot \frac{dV}{\phi - k - mv^2}. \quad (73)$$

Так как:

$$V = vV$$

то

$$dt = \frac{\sigma V_u}{f_u} \frac{dv}{\phi - k - mv^2} = \frac{\sigma V_u}{f_u} \cdot d\tau. \quad (74)$$

где

$$d\tau = \frac{dv}{\phi - k - mv^2} \quad (75)$$

Следовательно,

$$t = \frac{\sigma V_u}{f_u} \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{\phi - k - mv^2} = \frac{\sigma V_u}{f_u} \tau. \quad (76)$$

Из формулы (76) явствует, что универсальной диаграммой зависимости скорости поезда от времени для данного подъема будет зависимость $v = \varphi(\tau)$, где

$$\tau = \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{\phi - k - mv^2}. \quad (77)$$

Вспомним, что кривая $V = \varphi(t)$ строится по уравнению

$$t = \sigma \int \frac{dV}{f - w}.$$

Мы видим, что зависимость $v = \varphi(\tau)$ может быть построена теми же методами, которые обычно применяются для построения кривой скорости в функции времени.¹ Все отличие будет заключаться в том,

¹ См. В. А. Шевалин, Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев, 1931 г., гл. V.

что вместо приращений скорости V в расчете $v = \varphi(\tau)$ нужно брать приращение величины v ; вместо остаточной силы тяги $f - w$ в расчет вводится величина $(\phi - k - mv^2)$, а величина σ полагается равной единице.

Диаграмма зависимости $V = \varphi(t)$ для данного случая может быть получена из универсальной диаграммы $v = \varphi(\tau)$ путем умножения величин v на V_* , а величины τ на $\frac{\sigma V_*}{f_*}$. Таким образом в универсальных

диаграммах величина $\frac{\sigma V_*}{f_*}$

есть единица времени, а величина V_* — единица скорости.

Для построения универсальной диаграммы $v = \varphi(\tau)$ для данного подъема необходимо задаться пусковым током j_a или пусковой остаточной силой тяги $(\phi_a - k - mv_a^2)$. Тогда мы получаем универсальную кривую остаточной силы тяги и универсальную кривую тока, изображенные на рис. 47. По диаграмме определяется скорость v_a в момент выхода на автоматическую характеристику. Величина времени τ_a , соответствующая разгону под реостатами, очевидно, будет

$$\tau_a = \frac{v_a}{\phi_a - k - mv_a^2}.$$

Далее, после выхода на автоматическую характеристику строим $v = \varphi(\tau)$ по конечным приращениям величин v и τ аналогично тому, как это делается при построении кривой $V = \varphi(t)$. Мы получаем диаграмму разгона на рис. 48.

Отметим, что ускорение на диаграмме $v = \varphi(\tau)$ будет равно

$$\frac{dv}{d\tau} = \phi - k - mv^2,$$

т. е. ускорение на универсальной диаграмме движения $v = \varphi(\tau)$ численно равно универсальной остаточной силе тяги $(\phi - k - mv^2)$, взятой для данной скорости v из диаграммы рис. 47.

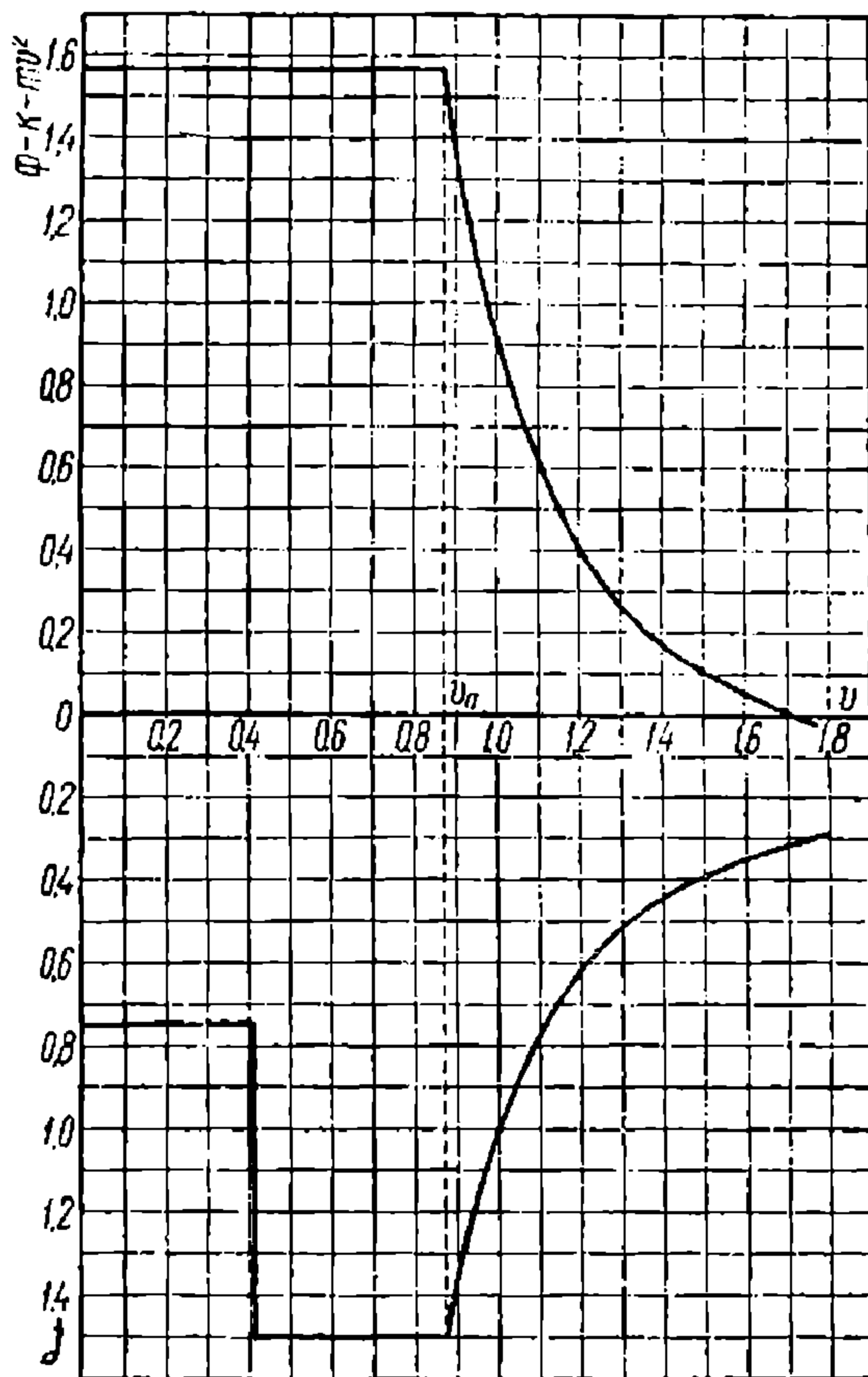


Рис 47.

УЧЕБНИК
(ДИПЛОМ)

Для выбега формула (77) получает такой вид:

$$\tau = - \int_{v'}^{v''} \frac{dv}{k_1 + m_1 v^2} \quad (78)$$

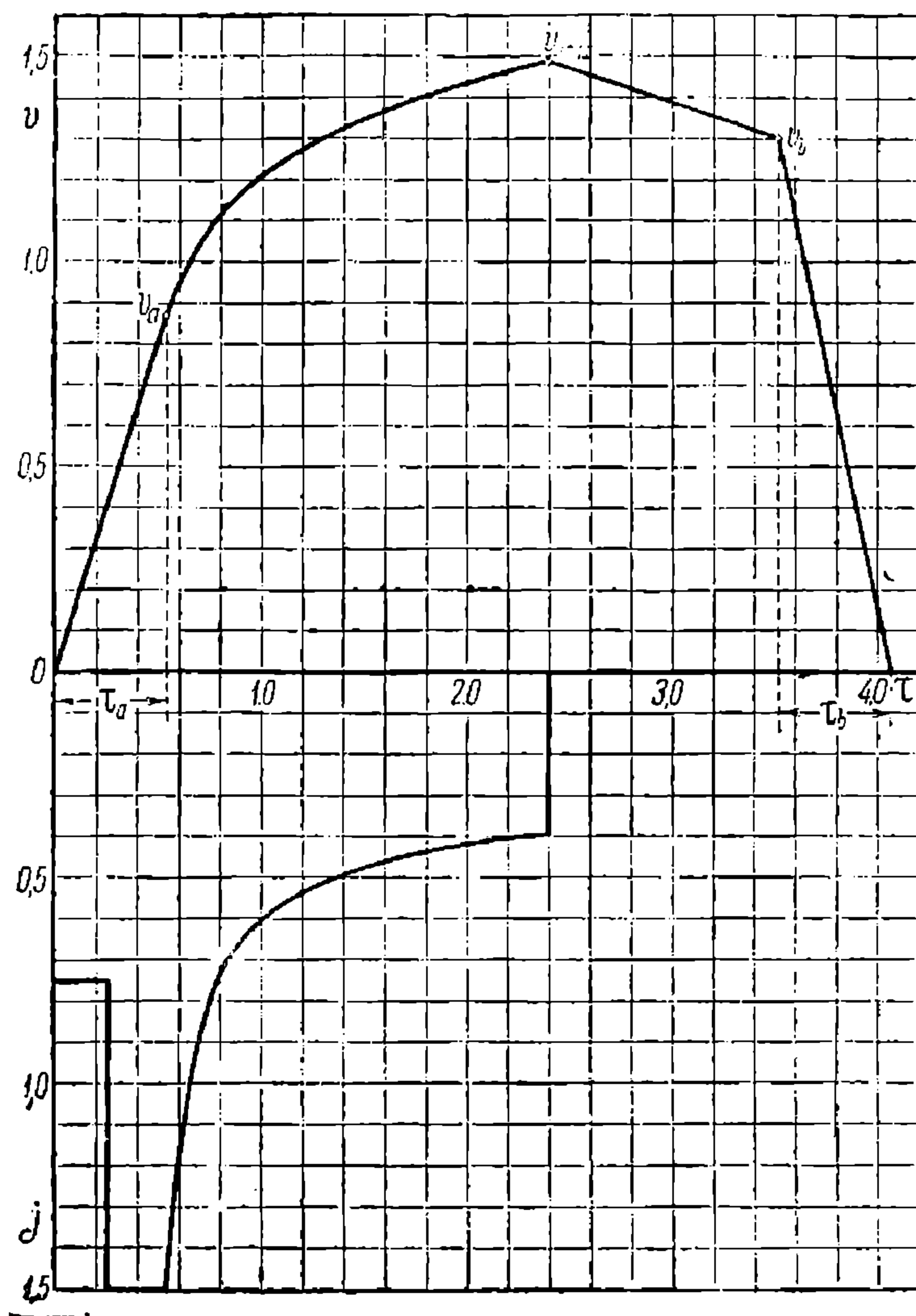


Рис. 48.

причем

$$k_1 = \frac{a_1 + i}{f_1}, \quad (79)$$

$$m_1 = \frac{c_1 V^2}{f_1}, \quad (80)$$

где a_1 — есть постоянная составляющая удельного сопротивления движения при выбеге, а $c_1 V^2$ — значение переменной составляющей того же сопротивления при часовой скорости.

Таким образом кривая выбега на универсальной диаграмме строится теми же методами, как кривая выбега конкретных диаграмм $V = \varphi(t)$, полагая лишь $\sigma = 1$.

Предположим, что остановка поезда помощью тормозов должна произойти с замедлением u_2 . Тогда время торможения будет

$$t_b = \frac{V_0}{u_2} \quad (81)$$

Если выразить замедление u_2 через единицу ускорения универсальной диаграммы (см. стр. 70), то¹

$$u_2 = \frac{f_v}{\beta} \cdot \beta. \quad (82)$$

Следовательно,

$$t_b = \frac{\sigma V_0 v_b}{f_v \beta} = \frac{\sigma V_0}{f_v} \cdot \tau_b. \quad (83)$$

т. е. τ_b на диаграмме $v = \varphi(\tau)$ есть

$$\tau_b = \frac{v_b}{\beta}. \quad (84)$$

Универсальная диаграмма скорости в функции пути

По уравнению кинематики мы имеем

$$\frac{ds}{dt} = a V,$$

откуда

$$ds = a V dt,$$

где a есть коэффициент, согласующий размерность пути, времени и скорости.²

На основании формул (62) и (74) можно написать, что

$$ds = a v V_0 \frac{\sigma V_0}{f_v} \cdot d\tau = \frac{a \sigma V_0^2}{f_v} v d\tau, \quad (85)$$

или

$$ds = \frac{a \sigma V_0^2}{f_v} d\lambda, \quad (86)$$

где

$$d\lambda = v d\tau.$$

Из уравнения (85), интегрируя, имеем

$$s = \frac{a \sigma V_0^2}{f_v} \int_{v_1}^{v_2} v d\tau = \frac{a \sigma V_0^2}{f_v} \int_{v_1}^{v_2} d\lambda = \frac{a \sigma V_0^2}{f_v} \lambda. \quad (87)$$

¹ Очевидно, что

$$\beta = \frac{\sigma u_2}{f_v} = \frac{b + w_0 + i + w_m}{f_v},$$

т. е. β есть удельное результирующее тормозящее усилие, выраженное в долях f_v .

² См. В. А. Шевалин. Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев 1931, стр. 195.

Мы видим, что универсальной диаграммой зависимости скорости поезда от пути является диаграмма $v = \psi(\lambda)$, где $\lambda = \int v d\tau$. Действительную диаграмму $V = \varphi(s)$ мы можем получить из универсальной путем помножения величин v на V_v и величин λ на $\frac{\alpha \sigma V_v^2}{f_v}$. Таким образом в универсальных диаграммах движения величина $\frac{\alpha \sigma V_v^2}{f_v}$ есть единица пути.

Путь λ , проходимый поездом за время разгона под реостатами, в универсальной диаграмме движения, очевидно, равен

$$\lambda_a = \frac{v_a \tau_a}{2},$$

ибо скорость в конце этого пути равна v_a .

Путь, проходимый поездом при работе двигателей по автоматической характеристике и при выбеге, определяется по соотношению

$$\lambda = \int v d\tau.$$

Для построения $v = \psi(\lambda)$ можно воспользоваться обычными методами определения зависимости $V = \varphi(s)$ по конечным приращениям скорости и пути.¹ Путь, проходимый за время торможения при подходе к остановочному пункту, в диаграмме $v = \psi(\lambda)$ равняется

$$\lambda_b = \frac{v_b \tau_b}{2}.$$

Таким образом для данного рода поезда, данного подъема, при определенном соотношении между пусковым и часовым током, при данном соотношении между временем хода под током и временем выбега мы получаем универсальную диаграмму $v = \psi(\lambda)$, изображенную на рис. 49.

Универсальной диаграммой силы тока в функции времени является диаграмма $j = f(\tau)$. Она строится так же, как и диаграмма $J = f(t)$, с той лишь разницею, что вместо t по абсциссам откладывается τ , а по ординатам вместо J величина j , взятая из универсальной диаграммы остаточной силы тяги (рис. 47). Для перехода от универсальной к действительной диаграмме нужно, очевидно, величину j умножить на J_v а величину τ на $\frac{\sigma V_v}{f_v}$.

Расход тока, как известно, равняется

$$\int_0^{t_m} J dt.$$

С помощью формул (63) и (74) мы можем написать, что тот же расход будет

$$\int_0^{t_m} J dt = \frac{J_v \sigma V_v}{f_v} = \int_0^{\tau_m} j d\tau. \quad (88)$$

¹ В частности может быть применен метод, изложенный на стр. 234 книги автора „Тяговые расчеты электрических железных дорог и трамваев“. Для построения кривой $v = \psi(\lambda)$ величина α в этом методе полагается равной единице.

Таким образом для определения расхода тока нужно найти вели-

чину $\int_0^{\tau_m} j d\tau$ площади кривой $j = f(\tau)$ и помножить ее на $\frac{J_v \sigma V_v}{f_v}$.

Определение расхода энергии по универсальным диаграммам движения

Если время, как в большинстве случаев в моторвагонной тяге, исчисляется в секундах, то расход энергии на пробег перегона, исчисленный в ваттчасах, будет

$$A = \frac{E}{3600} \int_0^{t_m} J dt.$$

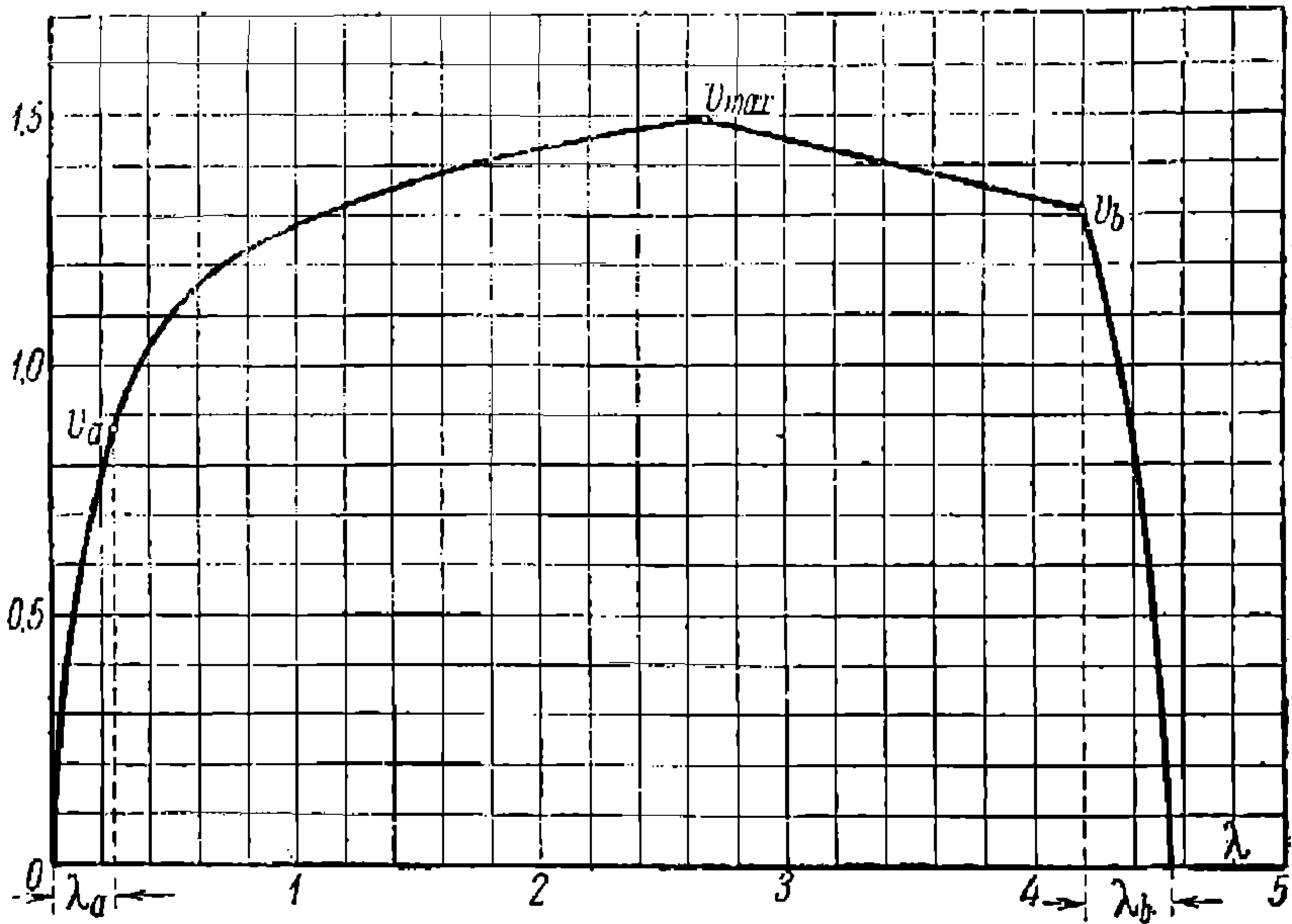


Рис. 49.

Согласно формуле (88) тот же расход энергии можно выразить следующим образом:

$$A = \frac{E}{3600} \cdot \frac{J_v \sigma V_v}{f_v} \cdot \int_0^{\tau_m} j dt. \quad (89)$$

Удельный расход энергии будет

$$a = \frac{E}{3600 (P + Q) L} \cdot \int_0^{t_m} J dt.$$

Так как L можно представить как

$$L = l \frac{a \sigma V_v^2}{f_v} \quad (90)$$

то

$$a = \frac{E J_v}{3600 a V_v (P + Q)} \cdot \frac{\int_0^{\tau_m} j dt}{l}, \quad (91)$$

где l — длина перегона в универсальных диаграммах движения.

Если $V_ч$ выражено в км/час, то величину $EJ_ч$ можно представить следующим образом:

$$EJ_ч = \frac{(P + Q) f_ч V_ч}{0,367 \eta_ч},$$

где $\eta_ч$ — коэффициент полезного действия двигателя при часовой мощности.

При исчислении пути в километрах, а времени в секундах будем иметь $\alpha = \frac{1}{3600}$.

Тогда

$$\alpha = \frac{f_ч}{0,367 \eta_ч} \cdot \frac{\int_0^{\tau_m} j d\tau}{l} = \frac{f_ч}{0,367 \eta_ч} \cdot \varepsilon, \quad (92)$$

где

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\tau_m} j d\tau}{l}.$$

Тот же результат мы, очевидно, получим, если будем исчислять скорость в метрах в секунду. В этом случае $\alpha = 1$ и

$$EJ_ч = \frac{(P + Q) f_ч V_ч}{102 \eta_ч}.$$

Таким образом для определения удельного расхода энергии нужно по универсальным диаграммам определить $\frac{\int j d\tau}{l}$ и умножить его на $\frac{f_ч}{0,367 \eta_ч}$. Эта последняя величина является единицей удельного расхода энергии в универсальных диаграммах

Проверка двигателей на нагревание по универсальным диаграммам

Для приближенной оценки пригодности двигателя по нагреву необходимо определить эквивалентный ток поезда.

Он равен

$$J_э = m \sqrt{\frac{\int I^2 dt}{t_э}},$$

где m — число параллельных цепей включения тяговых двигателей при полном ходе.

Если двигатели построены на полное напряжение сети, то m равно числу двигателей. Если двигатели построены на половинное напряжение сети, то m равно половине числа двигателей.

Руководствуясь формулами (63), (74) и (76), можно написать, что

$$J_э = m \sqrt{\frac{\frac{I_ч^2 \sigma V_ч}{f_ч} \int j^2 d\tau}{\frac{\sigma V_ч}{f_ч} \cdot \tau}},$$

где

- j_{∂} — ток одного двигателя по универсальной диаграмме,
- τ_0 — время хода плюс остановки по универсальной диаграмме.

После сокращения получаем

$$J_{\partial} = I_{\partial} m \sqrt{\frac{\int j_{\partial}^2 d\tau}{\tau_0}} = I_{\partial} J_{\partial}, \quad (93)$$

где

$$j_{\partial} = m \sqrt{\frac{\int j_{\partial}^2 d\tau}{\tau_0}}.$$

Как известно, нагрев двигателя определяется соотношением¹ $\frac{I_{\infty}}{I_{\partial}}$

В свою очередь $I_{\infty} = k I_{\partial}^2$.

Отсюда

$$\frac{J_{\partial}}{J_{\infty}} = \frac{m}{k} \sqrt{\frac{\int j_{\partial}^2 d\tau}{\tau_0}}. \quad (94)$$

Средняя сверхтемпература, которую достигнет двигатель при установившемся тепловом режиме, будет

$$\vartheta_{\partial} = \frac{\vartheta_{\infty}}{k^2} \cdot \frac{m^2 \int j_{\partial}^2 d\tau}{\tau_0} = \frac{\vartheta_{\infty}}{k^2} \cdot j_{\partial}^2. \quad (95)$$

Мы видим, что нагрев двигателя определяется из универсальных диаграмм непосредственно. Для определения нагрева нужно построить кривую квадратов токов j_{∂} , протекающих через один двигатель, найти площадь этой кривой и по формулам (93) и (95) подсчитать J_{∂} и ϑ_{∂} .

При практическом проведении этого подсчета встречается та трудность, что время простоя на станциях, зависящее от местных условий, не может быть учтено, как постоянная надбавка ко времени хода в универсальных диаграммах движения. Ввиду этого j_{∂} удобнее определять, отнеся его не к величине τ_0 , а ко времени хода τ_x по универсальным диаграммам движения. Таким образом мы получим

$$j_{\partial}^{\prime} = \sqrt{\frac{\int j_{\partial}^2 d\tau}{\tau_x}}.$$

¹ См. В. А. Шевалкин. Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев 1931, стр. 315, формула (458).

² Величины k даны в той же книге на стр. 100.

Имея j' мы получаем $J' = J_0 j'$, т. е. величину эквивалентного тока, рассчитанного без учета простоя на станциях. Эквивалентный ток, рассчитанный с учетом остановок на станциях, очевидно, будет

$$J = J' \sqrt{\frac{t_c}{t_0}} \quad (96)$$

где

t_c — время чистого хода по перегону в данном конкретном случае.

t_0 — время чистого хода плюс остановка на станции.

Итоги выводов о подобии диаграмм движения

Из изложенного следует, что по универсальным характеристикам двигателя для данного подъема при данном соотношении пускового тока к часовому мы можем построить универсальные диаграммы движения. Пример такой диаграммы дан на рис. 48 и 49. Для перехода от универсальных диаграмм к обычным, относящимся к данному частному случаю, необходимо умножить параметры универсальных диаграмм на коэффициенты, указанные в табл. 5.

Таблица 5

Коэффициент перехода от универсальных диаграмм к частным

Параметр универсальной диаграммы	Коэффициент перехода от универсального к частному значению параметра
1 Скорость v	V_0
2 Удельная сила тяги ϕ	j_0
3 Сила тока j	J_0
4 Ускорения $\frac{dv}{dt}$	j_0
5 Время τ	$\frac{\sigma}{\sigma V_0}$
6 Путь λ	$\frac{j_0}{\sigma V_0^2}$
7 Удельный расход энергии $\frac{\int j dt}{l}$	$\frac{j_0}{j_0}$
8 Эквивалентный нагревающий ток j_0	$0,367 \eta_0$

Вполне очевидно, что диаграмма рис. 18 будет универсальной диаграммой для тех перегонов и тех режимов движения поезда, для которых соотношение $\frac{V_{max}}{V_0}$ а также соотношение длительности движения под током, выбега и торможения остаются постоянными. Такая диаграмма дает нам возможность разрешить сравнительно узкий круг вопросов. Для более широкого практического применения универсальных диаграмм движения нужно построить их для различных соотношений времени хода под током к полному времени хода, а также для различных соотношений V_{max} к V_0 .

Применение универсальных диаграмм движения для выбора целесообразного режима движения поезда

Универсальные диаграммы движения могут быть применены для выяснения вопроса о выборе целесообразного режима движения поезда. Для этой цели подлежит построить универсальную диаграмму для данной универсальной длины l перегона при различных временах хода τ , полученных за счет изменения продолжительности выбега. Пример такой диаграммы дан на рис. 50.

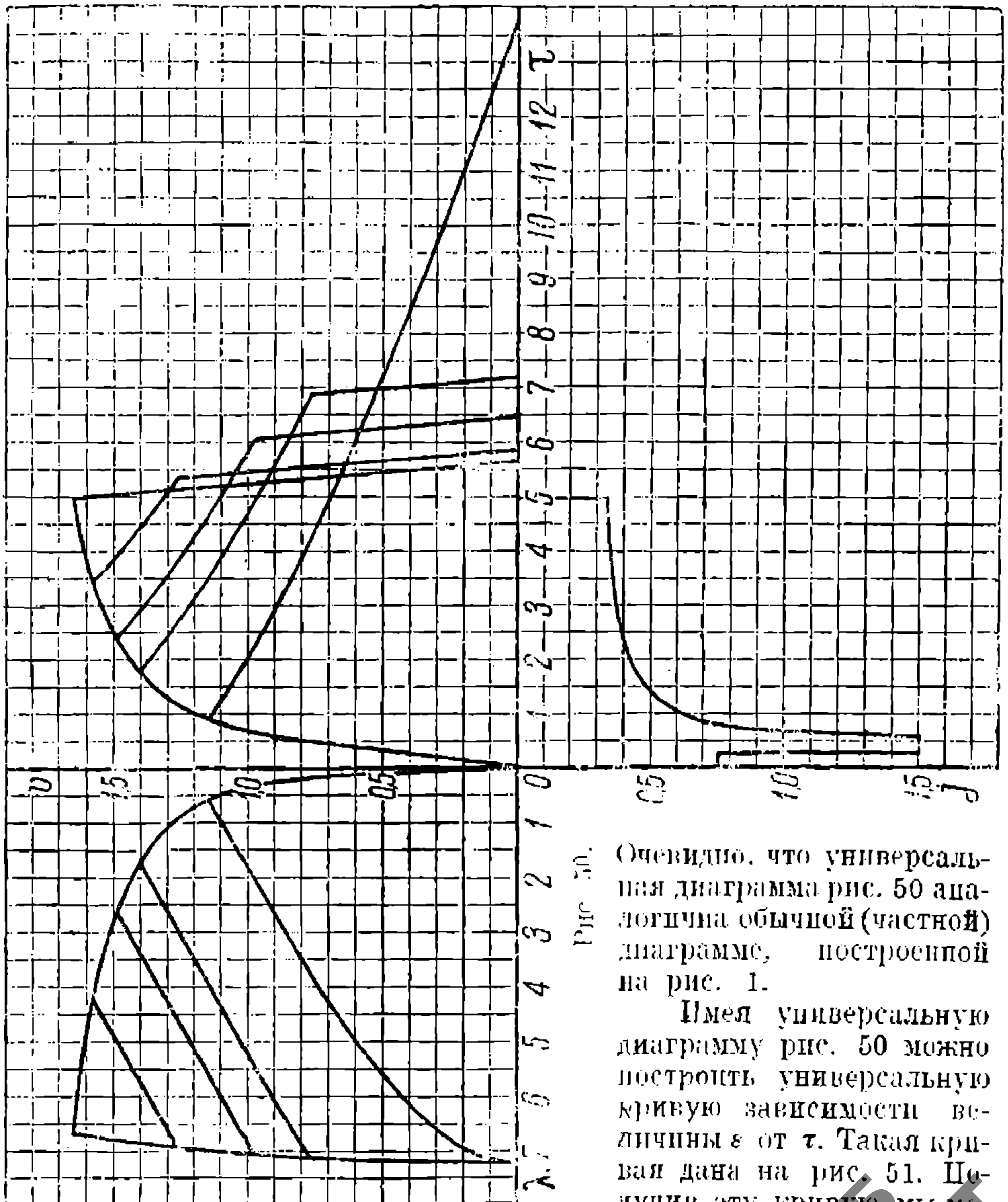


Рис. 50. Очевидно, что универсальная диаграмма рис. 50 аналогична обычной (частной) диаграмме, построенной на рис. 1.

Имея универсальную диаграмму рис. 50 можно построить универсальную кривую зависимости величины ϵ от τ . Такая кривая дана на рис. 51. Получив эту кривую, мы мо-

жем воспользоваться коэффициентами, указанными в табл. 5, и построить кривую удельного расхода энергии σ в функции времени τ для данного частного случая. Далее вопрос о выборе нормального порядка движения поезда решается так, как это указано в главе 1.

Аналогичным образом для диаграммы рис. 50 можно построить кривую зависимости j от времени хода τ , и таким образом разрешить вопрос о влиянии скорости сообщения на нагрев тягового электродвигателя.

Построение универсальных диаграмм движения для различных соотношений $\frac{V_{max}}{V_a}$:

Диаграмма рис. 50 расширяет круг вопросов, которые могут быть разрешены на основе универсальных диаграмм движения. Этот круг вопросов в весьма большой мере может быть расширен, если мы построим диаграммы, аналогичные рис. 50 для различных соотношений V_{max} к V_a . Такие диаграммы построены на рис. 52. Для подсчета удельного расхода энергии, соответствующего режимам движения, указанным на диаграмме, на рис. 53 построены диаграммы $\epsilon = \varphi(\tau_r)$. Для определения эквива-

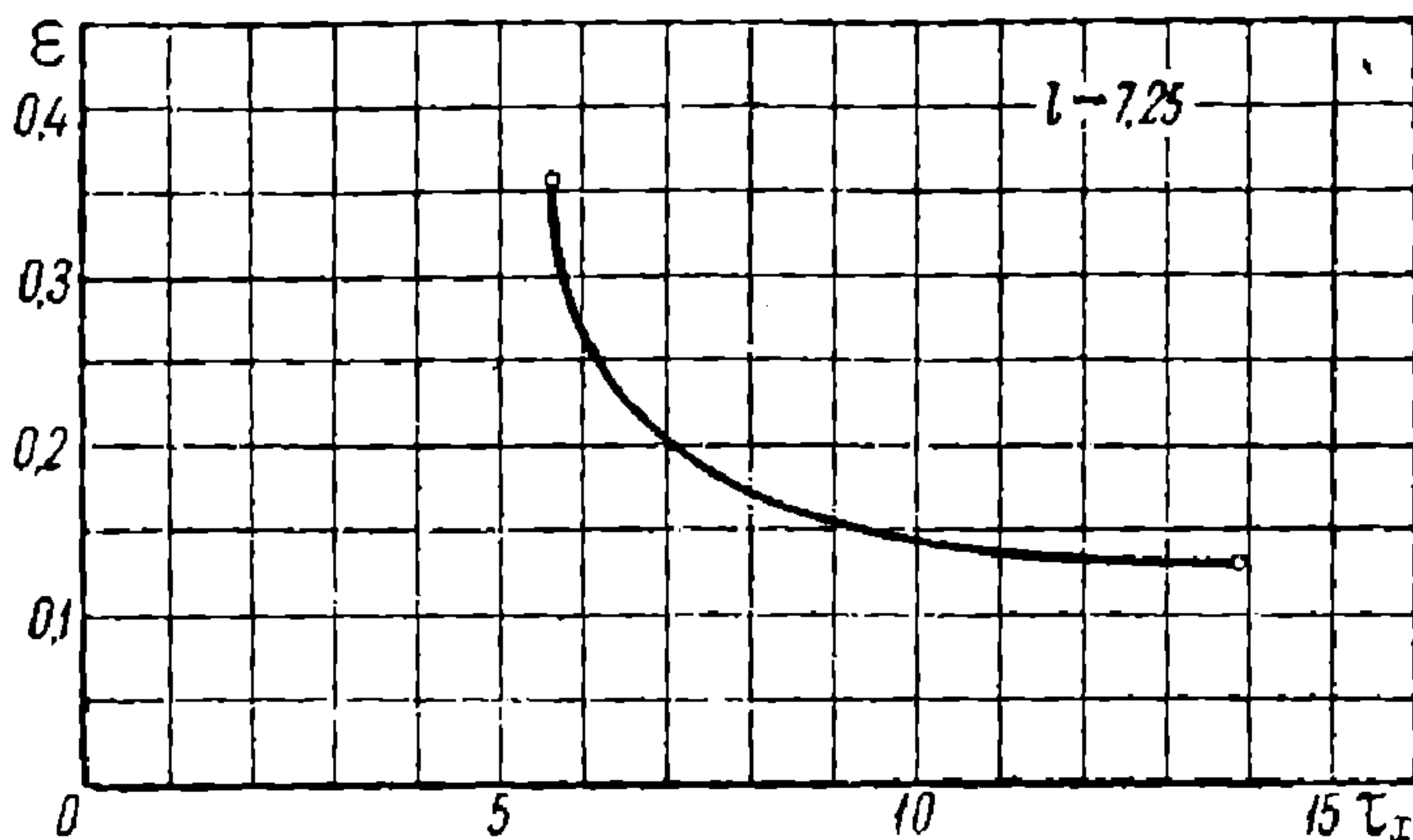


Рис. 51.

лентного тока для тех же режимов на диаграмме рис. 54 построена зависимость $j_s' = \varphi(\tau_r)$. Диаграммы рис. 52, 53 и 54, очевидно, справедливы для определенного соотношения величины пускового тока J_a и часового тока J_v поезда. В нашем примере соотношение $\frac{J_a}{J_v}$ принято равным 1,5.

Примеры практического применения универсальных диаграмм движения

Рассмотрим применение универсальных диаграмм движения на примерах.

Пример 1. Пусть на пригородной электрической жел. дороге мы имеем типовой перегон длиной $L = 2000$ м при среднем подъеме в $0\%_{00}$. Время хода на данном перегоне должно быть равно $t_r = 165$ сек. Требуется найти диаграмму движения $V = \varphi(t)$ и $V = \varphi(s)$ при условии, чтобы вид их (конфигурация) соответствовал диаграммам рис. 48 и 49. Вес поезда $P + Q = 163$ т. Напряжение E между контактным проводом и рельсом 1500 В.

Будем выражать в наших диаграммах путь в метрах, время в секундах, а скорость — в километрах в час. Тогда $a = \frac{1}{3,6}$. Пусть для нашего поезда коэффициент γ , учитывающий наличие вращающихся масс, будет

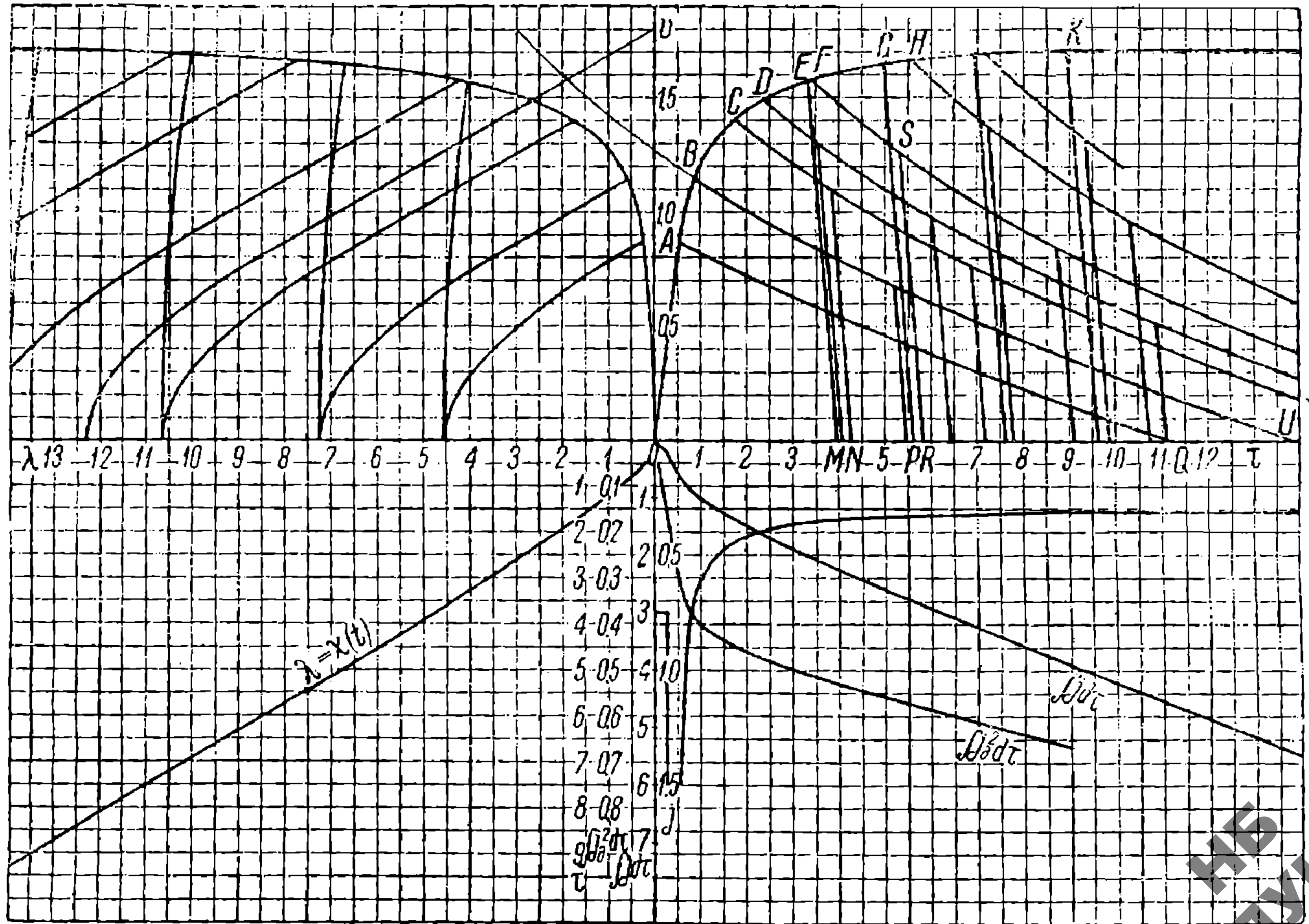


Рис.

ИЗДАНИЕ
(ДИПТ)

равен 0,05. Тогда в соответствии с принятыми единицами для скорости и времени

$$\sigma = \frac{1000(1 + 0,05)}{9,81 \cdot 3,6} = 29,7 \cong 30.$$

Между длиной перегона на универсальной диаграмме и действительной длиной перегона существует соотношение

$$\frac{\sigma V_v^2}{f_v} \cdot l = L. \quad (97)$$

Так как по диаграмме рис. 49 мы имеем $l = 4,55$, то для нашего частного случая будем иметь

$$\frac{30}{3,6} \cdot 4,55 \cdot \frac{V_v^2}{f_v} = 2000,$$

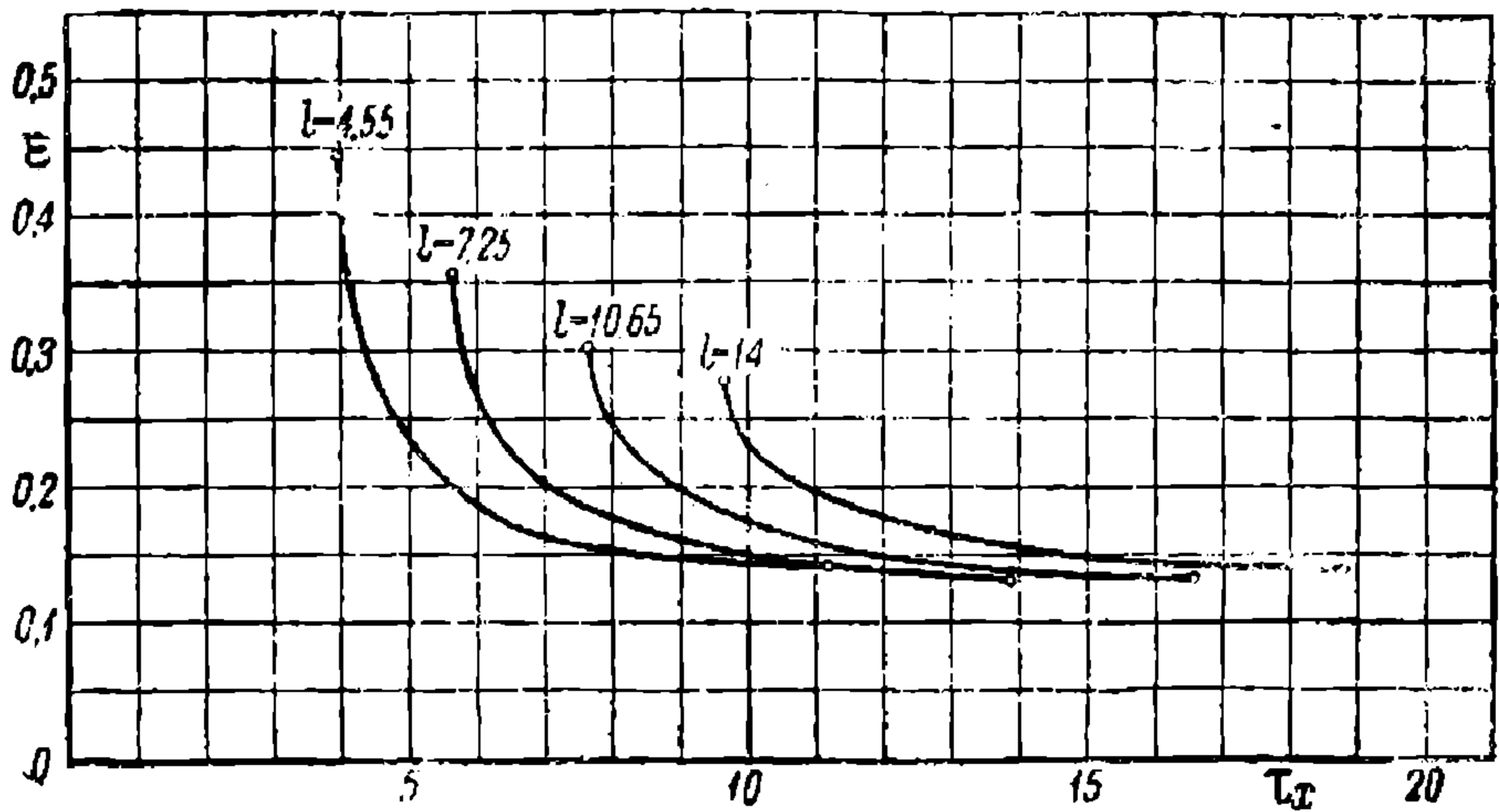


Рис. 53.

или

$$\frac{V_v^2}{f_v} = 52,8. \quad (97')$$

Связь между временем хода по универсальной и частной диаграмме движения выражается уравнением

$$\frac{\sigma V_v}{f_v} \cdot \tau_x = t_x. \quad (98)$$

Так как на диаграмме рис. 48 величина τ_x равна $\tau_x = 1,05$, то в нашем частном случае получится

$$30 \cdot 1,05 \cdot \frac{V_v}{f_v} = 165,$$

или

$$\frac{V_v}{f_v} = 1,36. \quad (98')$$

Таким образом мы получаем два уравнения (97') и (98') для определения величин f_v и V_v . Решая их, имеем

$$V_v = 38,8 \text{ км/час,}$$

$$f_v = 28,5 \text{ кг/т.}$$

Взяв из диаграммы скорость $v_a = 0,87$ в момент выхода на автоматическую характеристику, скорость $v_{max} = 1,49$ в момент выключения тога и скорость $v_b = 1,31$ в момент начала торможения, получаем

$$V_a = v_a V_v = 33,7;$$

$$V_{max} = v_{max} V_v = 57,8;$$

$$V = v_b V_v = 50,8.$$

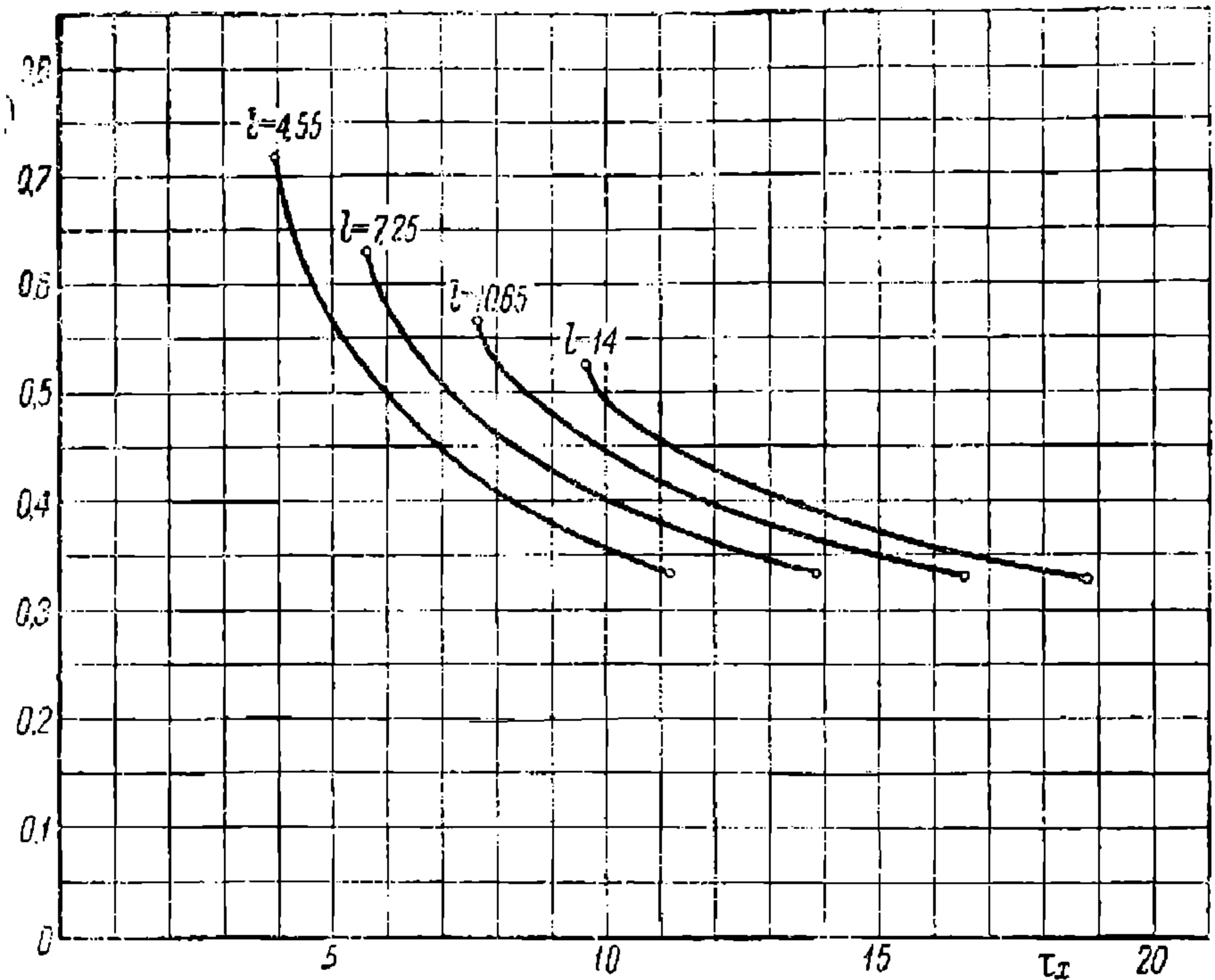


Рис. 54.

Зная отдачу η_v двигателя при часовой мощности, определяем удельный расход энергии. Он равен

$$a = \frac{f_v \varepsilon}{0,367 \eta_v}.$$

По диаграмме рис. 53 в нашем случае $\varepsilon = 0,365$.

Следовательно,

$$a = \frac{28,5 \cdot 0,365}{0,367 \cdot 0,9} = 31,5 \text{ ваттчаса на тоннокилометр.}$$

НБ
УДУНТ
(ДИТ)

Имея вес поезда, находим полную силу тяги при часовой мощности

$$F_v = (P + Q)f_v = 4650.$$

Теперь мы имеем возможность найти часовой ток:

$$J_v = \frac{F_v V_v}{0,367 E \eta_v} = 364 \text{ А.}$$

Находя по диаграмме рис. 48 величину j'_s , соответствующую нашему режиму движения поезда, находим эквивалентный нагревающий ток:

$$J'_s = j'_s J_v = 0,68 \cdot 364 = 247 \text{ А.}$$

Этот ток определен без учета простоев на станциях. Полагая, что к каждому перегону относится стоянка продолжительностью 45 сек, находим по формуле (96) действительный эквивалентный нагревающий ток:

$$J_s = J'_s \cdot \sqrt{\frac{t_z}{t_s}} = 247 \sqrt{\frac{165}{210}} = 220 \text{ А.}$$

По этому току мы можем судить о пригодности тягового электродвигателя к данным условиям работы.

Универсальные диаграммы движения рис. 48 и 49 построены в предположении, что пусковой ток J_a составляет 150% часового тока, а пусковая сила тяги равняется 166% от часовой силы тяги. Таким образом пусковая сила тяги нашего примера должна быть равна $4650 \cdot 166 = 7720 \text{ кг}$.

Задавшись коэффициентом сцепления, мы можем найти по пусковой силе тяги потребный сцепной вес и необходимое число сцепных осей. Отсюда определяется число двигателей m . Если нагрев двигателя оказывается удовлетворительным, мощность каждого двигателя должна быть

$$kW = \frac{E J_s \eta_v}{m}.$$

Таким образом мы определили основные параметры диаграмм движения и основные данности для выбора двигателя. Если результаты расчета получились неудовлетворительными в отношении ходовых скоростей, числа двигателей или расхода энергии, то была неправильно выбрана форма диаграммы движения. Нужно выбрать форму более целесообразную. Если получается перегрев или недоиспользование двигателя, приходится изменять норму перегрузки двигателя при разгоне и в связи с этим конфигурацию самой диаграммы движения. В нашем примере двигатель выбран без запаса мощности, а потому мощность его недостаточна.

Методом, изложенным выше, можно не только быстро устанавливать приближенную диаграмму движения и руководящие данные для выбора двигателя, но и сопоставлять между собой диаграммы движения различных конфигураций и влияние мощности двигателя на обстоятельства движения поезда, расход энергии и пр. Порядок разрешения этих вопросов будет указан в последующих главах настоящей книги.

Пример 2. Предположим, что нам задана длина типового перегона пригородной электрической жел. дороги, равная $L = 2500$ м. Средний подъем $i = 0\text{‰}$. Кроме того в связи с величиною сцепного веса дано то ускорение u_1 , которое моторвагонный поезд может реализовать при разгоне. Пусть это ускорение будет $u_1 = 0,5$ м/сек². Остальные данные те же, как и в предыдущем примере.

Зададимся определенной формой диаграмм движения. Пусть это будет диаграмма *OFSR* на рис. 52.

Определяем ускорение $\frac{dv}{d\tau}$ для прямолинейного разгона на универсальной диаграмме движения. Оно численно равно величине $\phi - k - mv^2$ для участка работы под реостатами (рис. 47).

В нашем случае $\frac{dv}{d\tau} = 1,57$.

Для связи ускорения по универсальной диаграмме с действительным ускорением существует соотношение (см. стр. 70 и 78)

$$\frac{f_r}{\sigma} \cdot \frac{dv}{d\tau} = u_1. \quad (99)$$

Если ускорение u_1 выражено в м/сек², то

$$\sigma = \frac{1000 \cdot (1 + \gamma)}{9,81}.$$

Принимая $\gamma = 0,05$, получим $\sigma = 107$.

Подставляя эти данные в уравнение (99), получаем

$$\frac{f_r}{107} \cdot 1,57 = 0,5. \quad (99')$$

Из уравнения (99') определяется $f_r = 34$ кг/т.

Далее обращаемся к универсальной диаграмме скорости в функции пути и находим из нее длину перегона l .

Применяя уравнение (97) к нашему примеру, имеем

$$\frac{30 \cdot V_v^2}{3,6 \cdot 34} \cdot 7,25 = 2500. \quad (97'')$$

Из уравнения (97'') находим

$$V_v = 37,5 \text{ км/час.}$$

Из диаграммы скорости в функции времени находим величину $\tau_x = 5,86$.

Воспользовавшись уравнением (98), подсчитываем время хода

$$t_x = 5,86 \cdot \frac{30 \cdot 37,5}{34} = 194 \text{ сек.}$$

Если время хода получилось удовлетворительным, определяем параметры диаграммы движения и данные для определения мощности двигателя так, как это указано в предыдущем примере.

Если время хода не представляется приемлемым, нужно избрать другую форму диаграммы движения. Для уменьшения времени хода нужно принять универсальную диаграмму с меньшим τ_x . Для увеличения t_x величину τ_x , очевидно, нужно увеличить. Далее следует вновь определить по формуле (97'') новое V_q и т. д. Величина f_q остается при этом неизменной.

Рассмотренными двумя примерами далеко не исчерпывается тот круг задач, который может быть разрешен на основе подобия диаграмм движения. Мы в этом убедимся в последующих главах.

Применение диаграмм движения, построенных ранее Если по универсальной диаграмме движения можно построить частную диаграмму движения, то и обратно, имея частную диаграмму, можно найти универсальную. Пусть на частной диаграмме движения скорость хода была V' , время t' путь s' , сила-тока J' , удельный расход энергии α' и эквивалентный нагревающий ток J_e . Тогда, согласно ранее найденным формулам, те же параметры на универсальной диаграмме будут равны

$$v = \frac{V'}{V'_q}, \quad (100)$$

$$j = \frac{J'}{J'_q} \quad (101)$$

$$\tau = \frac{f'_q}{\sigma V'_q} \cdot t', \quad (102)$$

$$\lambda = \frac{f'_q}{\alpha \sigma V_q'^2} s', \quad (103)$$

$$= \frac{0,367 \eta'_q}{f'_q} \alpha', \quad (104)$$

$$j_e = \frac{J_e}{J'_q} \quad (105)$$

Получив таким образом универсальную диаграмму движения, мы можем находить по ней ряд новых частных диаграмм для новых длин перегона, других времен хода, измененных мощностей двигателей и пр. Как мы уже ранее подробно указывали, скорость новых частных диаграмм движения мы получим, умножив величину v универсальной диаграммы на часовую скорость V_q'' при новых условиях.

Таким образом мы будем иметь

$$V'' = v V_q''. \quad (62a)$$

Аналогичным образом мы получим параметры новой частной диаграммы, умножая соответственный параметр универсальной диаграммы на надлежащий коэффициент. Мы будем иметь

$$J'' = j J'_q, \quad (63a)$$

$$t'' = \frac{\sigma V_q''}{f_q''} \tau, \quad (76a)$$

$$s'' = \frac{\alpha \sigma V_q''^2}{f_q''} \lambda, \quad (87a)$$

$$a'' = \frac{f_q''}{0,367 \eta_q''} \varepsilon, \quad (92a)$$

$$J_a'' = J_q'' j_0, \quad (93a)$$

Сопоставляя формулы (100)... (105) с формулами (62 а)... (93 а), мы видим, что имея диаграммы движения, построенные для некоторого частного случая, мы можем построить по ним ряд новых диаграмм для других частных случаев, пользуясь подобием диаграмм движения. При этом нет необходимости прибегать к универсальным диаграммам движения. Действительно, на основании только что перечисленных двух групп формул мы получаем:

$$V'' = \frac{V_q''}{V_q'} \cdot V', \quad (106)$$

$$J'' = \frac{I_q''}{I_q'} \cdot J', \quad (107)$$

$$t'' = \frac{V_q''}{V_q'} \cdot \frac{f_q'}{f_q''} t', \quad (108)$$

$$s'' = \frac{\bar{V}_q''^2}{V_q'^2} \cdot \frac{f_q'}{f_q''} \cdot s', \quad (109)$$

$$a'' = \frac{f_q''}{f_q'} \cdot \frac{\eta_q'}{\eta_q''} \cdot a', \quad (110)$$

$$J_s'' = \frac{I_q''}{I_q'} \cdot J_s', \quad (111)$$

При выводе этих соотношений мы полагали, что величины α и σ в обоих случаях будут одни и те же.

Таким образом из диаграмм, построенных для перегона длиной L' , могут быть легко получены диаграммы, пригодные для перегона длиной L'' , если соотношение между часовыми скоростями и часовыми удельными силами тяги будут удовлетворять условию

$$\frac{L''}{L'} = \frac{V_q''^2}{V_q'^2} \cdot \frac{f_q'}{f_q''} \quad (109a)$$

Это соотношение вытекает из формулы (109). Если оно соблюдено, то новая диаграмма движения будет получена, если значения скоро-

стей в старой диаграмме будут умножены на $\frac{V''}{V'}$. Значения токов дол-

жны быть умножены на $\frac{J''}{J'}$, время на $\frac{V'' f''}{V' f'}$, а расход энергии на $\frac{f'' \eta''}{f' \eta'}$.

Переход от одних диаграмм движения к другим делается особенно простым в том случае, если часовая удельная остаточная сила тяги f_v остается одной и той же, а коэффициенты полезного действия двигателей η_v при часовой мощности будут равны. Формулы (108), (109) и (110) получают при этом следующий вид:

$$t'' = \frac{V''}{V'} t', \quad (112)$$

$$s'' = \frac{V''^2}{V'^2} \cdot s' \quad (113)$$

$$a'' = a' \quad (114)$$

Применим формулу (113) к полным длинам перегона. Будем иметь

$$L'' = L' \frac{V''^2}{V'^2}$$

Отсюда

$$\frac{V''}{V'} = \sqrt{\frac{L''}{L'}}. \quad (115)$$

Подставляя соотношение (115) в формулы (106) и (112), получим

$$V'' = V' \sqrt{\frac{L''}{L'}}, \quad (116)$$

$$t'' = t' \sqrt{\frac{L''}{L'}}. \quad (117)$$

Часовая мощность двигателей поезда равна

$$kW_v = \frac{f_v (P + Q) V_v}{367}.$$

Если удельная сила тяги f_v для перегонов L' и L'' будет одна и та же, то соотношение потребных часовых мощностей на ободе колеса будет

$$\frac{kW_v''}{kW_v'} = \frac{(P'' + Q'') V_v''}{(P' + Q') V_v'}$$

Если отдачи двигателей при часовой мощности равны и напряжение между контактным проводом и рельсом одинаково, то вместо соотношения полезных мощностей мы можем написать соотношение токов. Тогда

$$\frac{J_v''}{J_v'} = \frac{(P'' + Q'') V_v''}{(P' + Q') V_v'}$$

НЕ
УДУМ
(ДИТ)

или согласно формуле (115):

$$\frac{J_v''}{J_v'} = \frac{P'' + Q''}{P' + Q'} \sqrt{\frac{L''}{L'}}. \quad (118)$$

Таким образом по формулам (107) и (118)

$$J'' = J' \frac{(P'' + Q'')}{(P' + Q')} \sqrt{\frac{L''}{L'}} \quad (119)$$

В частном случае, если веса поездов в обоих случаях одинаковы,

$$J'' = J' \sqrt{\frac{L''}{L'}}. \quad (120)$$

То же соотношение будет иметь место и для эквивалентных токов.

Из полученных формул мы можем сделать следующий вывод: если при переходе от диаграмм движения на перегоне длиной L' к диаграмме движения на перегоне длиной L'' удельная сила тяги f_v и отдача η_v остаются без изменения, то диаграмма $V = \varphi(t)$ для перегона L'' будет получена, если значения скоростей и времени на диа-

грамме для перегона L' будут умножены на $\sqrt{\frac{L''}{L'}}$. Часовые скорости

двигателей должны измениться в том же соотношении (формула 115). Удельный расход энергии при этом для обоих перегонов будет один и тот же (см. формулу 114). Если вес поезда для случая обоих перегонов один и тот же, то значения силы токов также множатся на

величину $\sqrt{\frac{L''}{L'}}$. Если вес поезда изменяется — новые токи находятся

согласно формуле (119).

Построение частных диаграмм движения на основании универсальных и сделанные по универсальным диаграммам выводы и расчеты, вообще говоря, сопряжены с большими или меньшими ошибками.

Как мы видели на стр. 69 и 72, универсальная диаграмма движения строится для постоянных m , m' , k и k' , т. е. для вполне определенного соотношения между сопротивлением движению и часовой силой тяги. Кроме того универсальная диаграмма строится для определенной перегрузки двигателя против часовой мощности при разгоне поезда. Если при построении частных диаграмм движения эти условия будут сохранены, то расчеты по универсальной диаграмме будут обладать той точностью, которую можно иметь, пользуясь универсальными характеристиками тяговых электродвигателей. К сожалению, эту точность не всегда можно сохранить.

Предположим, что мы применяем одну и ту же универсальную диаграмму движения к ряду частных случаев, в которых удельная часовая сила тяги f_v остается одной и той же, но скорости движения, в частности часовая скорость, будут различны. Так как сопротивле-

ние движению зависит от скорости, то, очевидно, что соотношение между часовой силой тяги и сопротивлением движению в этих диаграммах будут меняться. Пусть в одной из построенных частных диаграмм величины m , k , m' и k' (см. стр. 68 и 72) в точности равны значениям этих величин, принятым при построении универсальной диаграммы. Тогда в диаграммах, имеющих большую скорость, сопротивление движению будет преуменьшено. В диаграммах, имеющих меньшие скорости, оно будет преувеличено. Ошибку в величине сопротивления движению мы можем установить в каждом частном случае.

Допустим, что на основании одной и той же универсальной диаграммы движения мы построили ряд частных диаграмм, причем во всех этих диаграммах часовая скорость остается неизменною, а меняется лишь удельная часовая сила тяги f_v . При этом величины m , m' , k и k' также должны меняться. Оставляя их постоянными, мы делаем ошибку: при малых f_v мы преуменьшаем сопротивление движения, а при больших его преувеличиваем. Такого рода ошибка может войти в наши расчеты, если одну и ту же универсальную диаграмму движения мы будем применять к частным диаграммам, имеющим различное ускорение при взятии поезда с места.

Мы рассмотрели два крайних случая, когда при пользовании универсальными диаграммами мы оставляем постоянным либо f_v либо V_v . Вообще говоря, может иметь место изменение и того и другого. Тогда ошибки в расчете могут либо уменьшаться, либо дополнять одна другую.

Принимая определенную перегрузку двигателя против часовой мощности при разгоне, мы получаем определенную форму диаграммы движения под током. Если применять одну и ту же универсальную диаграмму движения к случаю различных перегрузок, мы получим новую ошибку благодаря искажению формы кривых $V = \varphi(t)$ и $V = \psi(s)$ в части хода по автоматической характеристике двигателя. Вообще говоря, при широком пользовании универсальными диаграммами желательно построить их для различных перегрузок двигателя при пуске.

Из изложенного мы видим, что расчет по универсальным диаграммам движения не лишен некоторых погрешностей. Если иметь в виду, что для дорог данного типа (пригородных, метрополитенов и трамваев) величины ускорений, скоростей и перегрузок двигателей при разгоне меняются сравнительно в узких пределах—можно построить универсальные диаграммы для некоторых средних условий, и тогда ошибка расчета при пользовании ими не будет значительной. При всем этом по универсальным диаграммам, вообще говоря, нельзя построить окончательные диаграммы движения для технического проекта дороги. Такие диаграммы нужно строить по действительным характеристикам принятого к постройке двигателя. Универсальные диаграммы весьма пригодны для предварительных проектов. При умелом пользовании ими они могут оказать огромную услугу для быстрого суждения о целесообразности того или другого мероприятия, например, изменения ускорения, изменения пусковой мощности, изменения времени хода, увеличения или уменьшения средней длины перегона и т. п.

Роль их в разрешении этого рода вопросов будет освещена в последующих главах. На ошибках, связанных с их применением, мы будем иметь случай остановиться в дальнейшем.

ГЛАВА IV

Выбор тягового электродвигателя для заданной скорости движения поездов

Предположим, что мы имеем моторвагонный поезд определенного состава и веса при заданном сцепном весе и числе тяговых электродвигателей. Задана техническая скорость движения поездов или время их хода. Требуется подобрать тяговый электродвигатель, пригодный для движения поездов по данной дороге и дающий при заданных скоростях движения наилучшие эксплуатационные результаты. В итоге выбора тягового двигателя должна быть найдена часовая его мощность, определена пусковая мощность, передаточное число зубчатого механизма и установлен порядок движения поездов, наиболее целесообразный с точки зрения расхода энергии и нагрева двигателя. Произведем выбор тягового электродвигателя по типовому перегону наиболее трудной зоны нашей линии.

Порядок движения поезда на заданном перегоне при заданном времени хода, расход энергии и нагрев двигателя зависят от часовой мощности двигателя, пусковой мощности, ускорения w_1 при разгоне и замедления w_2 при торможении.

Выше было доказано, что в случае, когда мы не имеем ограничения по мощности тягового электродвигателя, с точки зрения расхода энергии целесообразно применять наибольшее ускорение, допустимое по условиям сцепления колес с рельсами. Если при выборе тягового электродвигателя мы не ограничены мощностью, то, зная сцепной вес P_c нашего поезда, мы находим наибольшую возможную силу тяги. Она будет равна

$$F = 1600 P \psi, \quad (121)$$

где ψ — коэффициент сцепления.

Далее определяем наибольшее возможное ускорение. Оно получится равным¹

$$w_1 = \frac{dV}{dt} = \frac{(F - W) g}{1000 (P - Q) (1 + \gamma)}. \quad (122)$$

Для замедления торможения w_2 целесообразно принять величину, указанную в нормах на стр. 19. Таким образом мы устанавливаем

¹ Значения величины γ см. В. А. Шевалин, Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев, 1931, стр. 207 и 208.

потребуется для нас u_1 и u_2 и выбор тягового двигателя должен быть произведен при данном ускорении и замедлении. При этих условиях порядок движения поезда при данном времени хода будет зависеть от пусковой и часовой мощности двигателя. Доминирующую роль будет играть пусковая мощность, так как данная пусковая мощность может быть получена при разных часовых мощностях.

Легко видеть, что при заданном времени пробега перегона, при данном ускорении разгона и замедлении торможения пусковая мощность может лежать во вполне определенных пределах. Установим эти пределы.

1. Наименьшая пусковая мощность для заданного времени пробега при данном ускорении разгона и замедлении торможения

Наименьшей пусковой мощностью, при которой пробег данного перегона в течение заданного времени t_x возможен, является мощность,

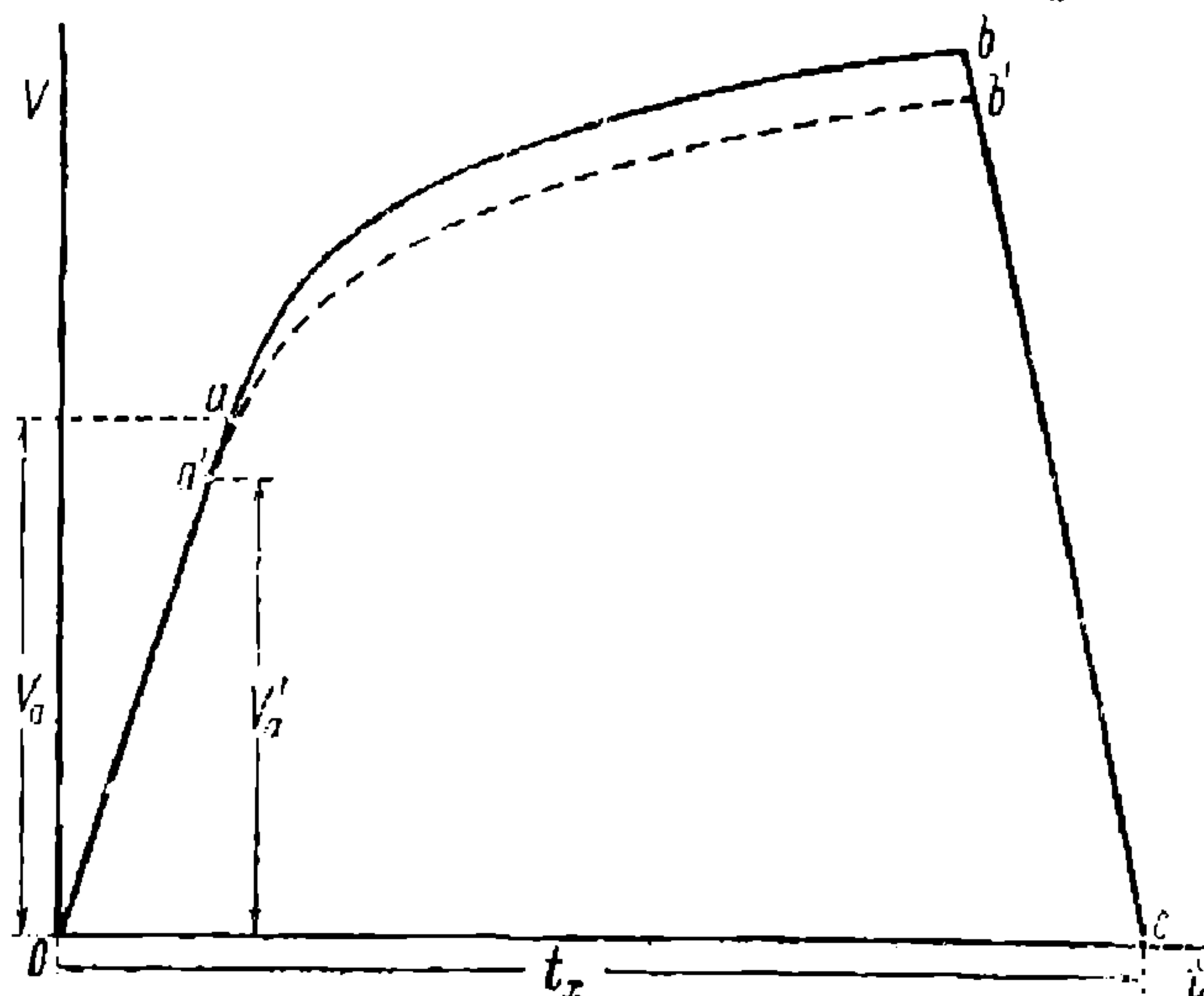


Рис. 55.

при которой движение поезда происходит без выбега (рис. 55). В этом легко убедиться. Из диаграммы рис. 55 видно, что понижение пусковой мощности не дает нам возможности пройти данный перегон в течение заданного времени t_x . Пусковая мощность на ободу колеса, как известно, равна $\frac{F_a V_a}{367}$

где F_a — сила тяги при разгоне под реостатами, а V_a — скорость в момент выхода на автоматическую характеристи-

ку. Понижение мощности при данном ускорении было бы связано с понижением скорости V_a . Пусть скорость понижена до величины V_a' . Разгон поезда при этом будет происходить по кривой $Oa'b'$. За тот же промежуток времени t_x при новой пусковой мощности поезд может пройти путь, изображаемый площадью $Oa'b'c$. Эта площадь будет меньше площади $Oa'bc$, соответствующей заданной длине перегона.¹

В случае пробега перегона при наименьшей пусковой мощности мы получаем полное использование двигателя в отношении времени его работы под током: двигатель работает максимум того времени, который при прохождении перегона возможен.

При уменьшении времени пробега t_x , т. е. при повышении средних ходовых скоростей и данном начальном ускорении наименьшая

¹ Мы предполагаем, что снижение мощности производится либо путем уменьшения нагрузки данного двигателя, либо путем перехода к другому двигателю, имеющему подобные характеристики. В этом последнем случае соотношение между пусковой и часовой мощностью двигателя остается неизменным.

возможная пусковая мощность для того же перегона повышается. Это легко видеть из диаграммы рис. 56. Если кривые $Oabc$ и $Oa'de$ относятся к пробегу одного и того же перегона, то площади их равны. Скорость V_a в момент выхода на автоматическую характеристику для кривой $Oabc$ должна быть выше той же скорости V_a' для кривой $Oa'de$. Отсюда следует, что пусковая мощность во втором случае должна быть ниже, чем в первом.

2. Наибольшая пусковая мощность для заданного времени пробега перегона при данном ускорении разгона и замедлении торможения

Мы установили выше, что пробег данного перегона при наименьшей пусковой мощности может быть получен при наибольшем использовании двигателя в отношении времени его работы. В противоположность этому, наибольшая пусковая мощность необходима при наименьшем использовании двигателя в том же отношении. Пробег перегона при наименьшей пусковой мощности, как мы видели, был возможен только при отсутствии выбега, наибольшая же пусковая мощность может быть реализована при наибольшем выбеге.

Диаграмма движения поезда при наибольшей пусковой мощности может иметь двойкий вид.

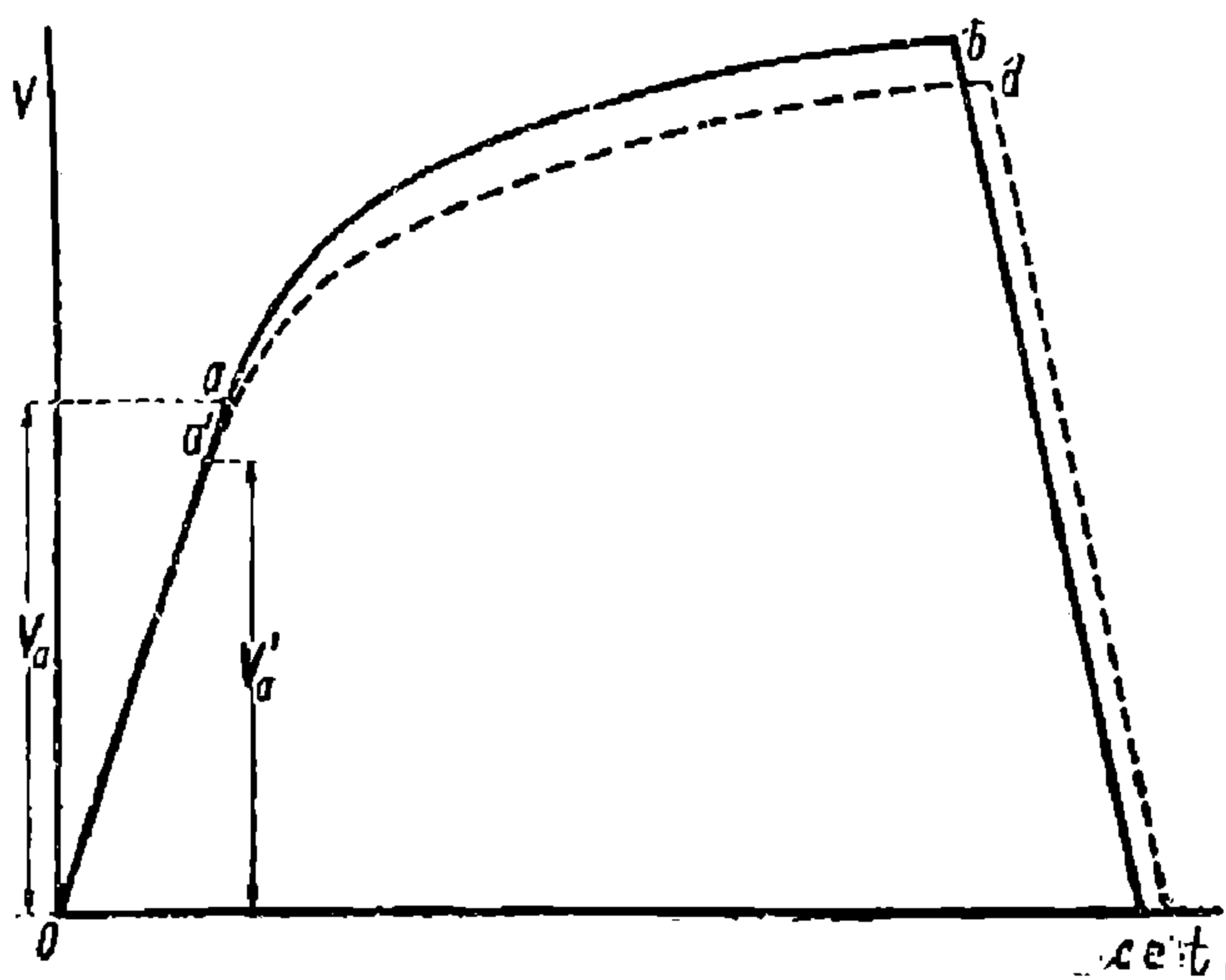


Рис. 56.

При малых временах пробега наибольший выбег может иметь место только при наличии торможения. Диаграмма движения поезда для этого случая изображена на рис. 57. Она характерна тем, что при изображенном на ней порядке ведения поезда двигатель работает только на участке прямолинейного ускорения, т. е. только под пусковыми реостатами. Выключение тока происходит в момент выключения реостатов и выхода на автоматическую характеристику.

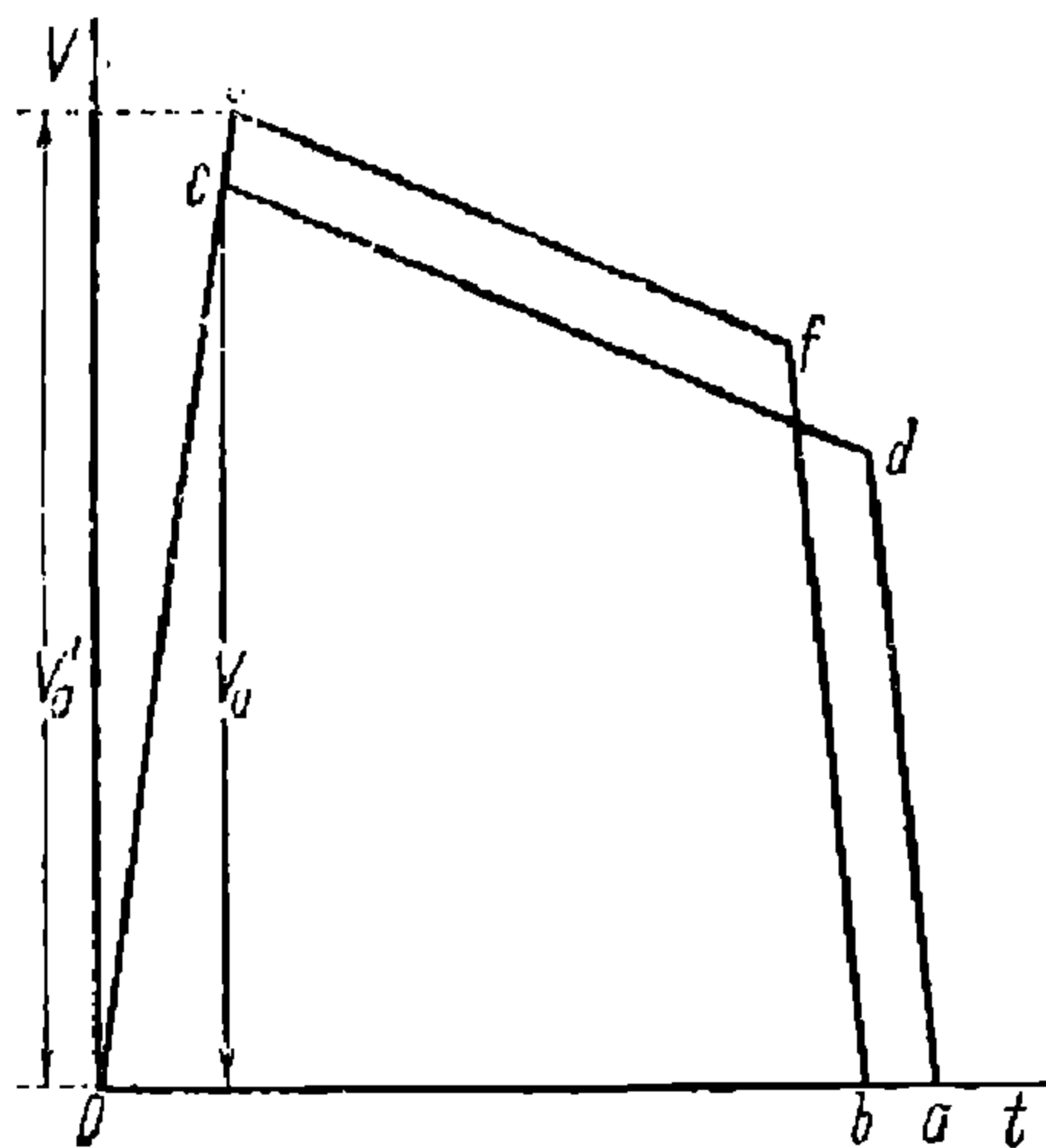
Легко убедиться в том, что пусковая мощность в этом случае для данного времени пробега перегона O_a при данном ускорении разгона и замедлении торможения будет наибольшей.

Повышение пусковой мощности при том же ускорении, очевидно, было бы возможно только путем повышения скорости в момент выхода на автоматическую характеристику. Предположим, что скорость эта повышается до величины $V_a' > V_a$.

Из рис. 57 ясно, что если при разгоне мы будем доводить скорость поезда до величины V_a' , мы получим время пробега перегона равное Ob^1 и меньшее Oa , т. е. нарушим основное условие нашей задачи.

¹ Для одного и того же перегона площади $Oscda$ и $Oefb$, как известно, должны быть равны.

Для того, чтобы получить заданное время пробега, мы, очевидно, должны и при повышении пусковой мощности двигателя выключить ток при скорости V_a . Таким образом, повышая пусковую мощность сверх установленной выше ее величины, мы выключаем ток двигателя, не выводя пускового реостата. Такой порядок разгона поезда давал бы нам не имеющее разумных обоснований увеличение пускового тока, повышение потерь в пусковых реостатах и ничем не оправдываемое неиспользование пусковой мощности двигателя. Таким образом пусковую мощность $\frac{P_a V_a}{367}$ при времени пробега перегона, равном Oa , действительно следует считать наибольшей.



Рис

При малых скоростях движения, т. е. при больших временах пробега перегона или на длинных перегонах, наибольший выбег имеет место при отсутствии торможения. Диаграмма движения поезда в этом случае изображена на рис. 58 сплошными линиями. При этом мы имеем также малое использование двигателя в отношении времени его работы.

Повышение пусковой мощности изменяет диаграмму движения, давая ей вид, изображенный на рис. 58 пунктирной линией. В соответствии с этим кривая движения поезда под током расположится выше кривой, полученной для пусковой скорости V_a . Отсюда следует, что при повышении пусковой мощности при отсут-

ствии торможения мы неминуемо получим уменьшение времени хода, следовательно, при данном времени хода Oa , пусковая мощность $\frac{P_a V_a}{367}$ будет наибольшей.

3. Определение максимума и минимума пусковых мощностей по принципу подобия диаграмм движения

Максимум и минимум пусковых мощностей тягового электродвигателя легко могут быть определены помощью универсальных диаграмм движения.

Предположим, что по величине сцепного веса мы можем принять для нашего поезда ускорение при разгоне, равное $a_1 = 0,5 \text{ м/сек}^2$. Допустим, что при пуске двигателя мы даем ему перегрузку на 50% против часового тока. На рис. 47 мы имеем универсальную диаграмму остаточной силы тяги, построенную для этих условий для движения по горизонтальному пути. Из диаграммы мы видим, что ускорение при разгоне $\frac{dv}{dt}$ в универсальных диаграммах, равное универсальной удельной остаточной силе тяги $(\phi_a - \kappa - mv_a^2)$ при разгоне под реостатами, будет равно 1,57.

Связь между действительным ускорением и ускорением по универсальным диаграммам выражается формулами (72) или (99). Поэтому для нашего случая будем иметь

$$u_1 = \frac{f_a}{\sigma} (\beta_a - \kappa - m v_a^2) = 1,57 \frac{f_a}{\sigma}$$

Отсюда следует, что для принятых нами условий максимальная и минимальная часовая мощность должны быть определены для постоянной удельной часовой силы тяги, равной

$$f_u = \frac{\sigma u_1}{\beta_a - \kappa - m v_a^2};$$

в нашем случае она будет равна

$$f_u = \frac{\sigma u_1}{1,57} = \frac{107 \cdot 0,5}{1,57} = 34.$$

Для принятой нами перегрузки двигателя при разгоне поезда пусковая удельная сила тяги двигателя находится в определенном

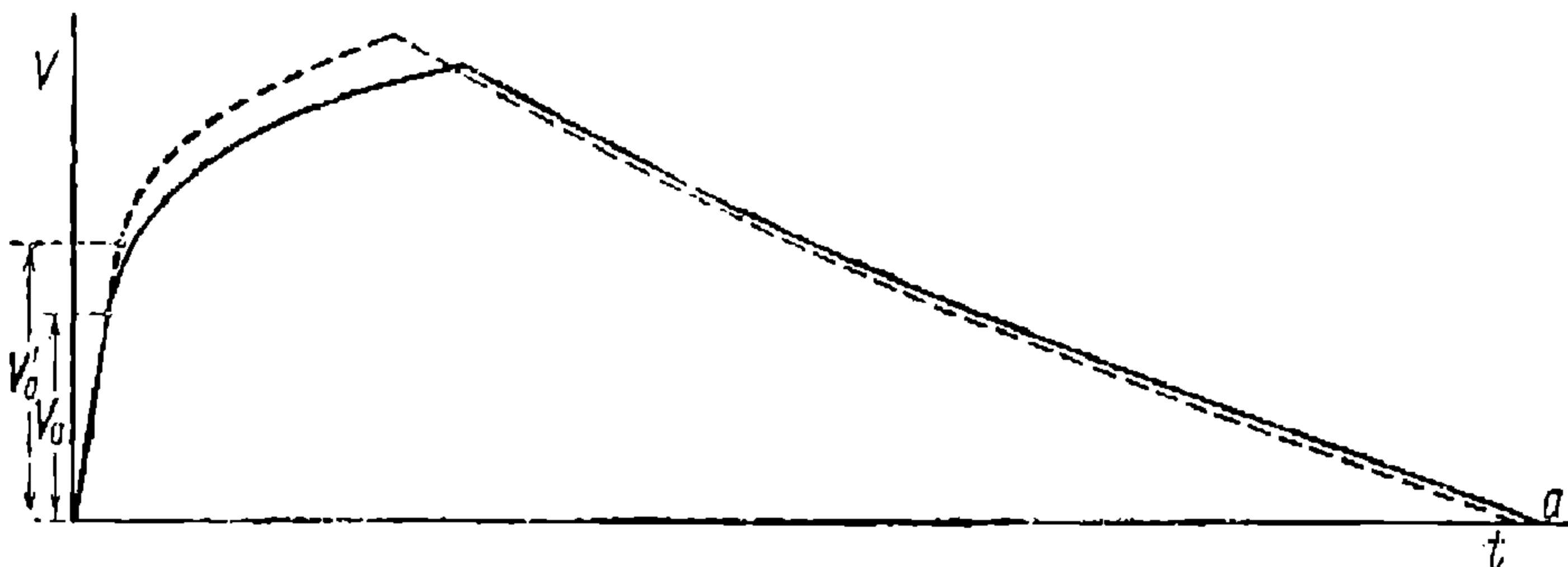


Рис. 58.

соотношении с удельной часовой силой тяги. Принимая $f_a = \delta f_u$, имеем пусковую удельную силу тяги

$$f_a = \frac{\sigma u_1 \delta}{\beta_a - \kappa - m v_a^2} \quad (123)$$

Для наших условий, согласно рис. 45, $\delta = 1,66$, следовательно

$$f_a = 1,66 \cdot 34 = 56,5 \text{ кг/т.} \quad (123')$$

Обратимся теперь к рис. 52 и извлечем из него диаграммы, относящиеся к условиям движения при минимальной пусковой мощности. Как указывалось выше, это будет движение без выбега. Таким образом мы получим кривые OEM OGP и т. д. для различных l .

Применим полученные кривые к одной и той же длине перегона L . Тогда согласно формуле (97) часовая скорость для данного режима движения будет равна

$$V_u = \sqrt{\frac{L}{l} \cdot \frac{f_u}{\sigma a}} \quad (124)$$

Пусковая скорость V_a при данной перегрузке двигателя во время разгона поезда находится в определенном соотношении с часовой скоростью. Полагая $V_a = \beta V_4$, получаем скорость в момент выхода на автоматическую характеристику, равной

$$V_a = \beta \sqrt{\frac{f_4 \cdot L}{\sigma a \cdot l}} \quad (125)$$

По диаграмме рис. 47 величина $\beta = 0,87$, а потому для принятых нами условий пуска

$$V_a = 0,87 \sqrt{\frac{34 \cdot 3,6}{30} \frac{L}{l}}$$

или

$$V_a = 1,76 \sqrt{\frac{L}{l}}$$

Получив удельную пусковую силу тяги f_a и скорость в момент выхода на автоматическую характеристику V_a , мы можем определить потребную минимальную удельную пусковую мощность:

$$kw_a = \frac{f_a V_a}{367} = \frac{w_1 \delta \beta}{367 (\phi_a - \kappa - m v_a^2)} \sqrt{\frac{f_4 \sigma}{a} \frac{L}{l}} \quad (126)$$

Для наших условий

$$kw_a = \frac{1,76 \cdot 56,5}{367} \cdot \sqrt{\frac{L}{l}} = 0,271 \sqrt{\frac{L}{l}} \quad (126a)$$

Таким образом для каждого режима движения минимум пусковой мощности нами определен. Нам остается определить время хода, которое мы при этой мощности получим. Согласно формуле (98)

$$t_x = \frac{\sigma}{f_4} \tau_x V_4.$$

Подставив значение V_4 из формулы (124), получим

$$t_x = \tau_x \sqrt{\frac{\sigma}{f_4 a} \frac{L}{l}} \quad (127)$$

Для условий пуска, которые мы приняли, имеем

$$t_x = \tau_x \sqrt{\frac{30 \cdot 3,6}{34} \frac{L}{l}} = 1,77 \tau_x \cdot \sqrt{\frac{L}{l}} \quad (127a)$$

Формулы (126a) и (127a) можно переписать следующим образом:

$$\frac{kw_a}{\sqrt{L}} = \frac{0,271}{\sqrt{l}} \quad (128a)$$

$$\frac{t_x}{\sqrt{L}} = 1,77 \frac{\tau_x}{\sqrt{l}} \quad (129a)$$

Если выразить L в километрах, то

$$\frac{kw_a}{\sqrt{L}} = \frac{8,56}{\sqrt{l}} \quad (128)$$

$$\frac{t_x}{\sqrt{L}} = 56 \frac{\tau_x}{\sqrt{l}} \quad (129)$$

Пользуясь формулами (128) и (129), легко построить универсальную диаграмму для определения минимальной удельной пусковой мощности для любого перегона и любого времени хода.

Обратимся к рис. 52 и найдем из него ряд значений l , соответствующих движению поезда без выбега. Подставляя найденные значения l в формулу (128), найдем соответствующие значения $\frac{kw_a}{\sqrt{L}}$ и от-

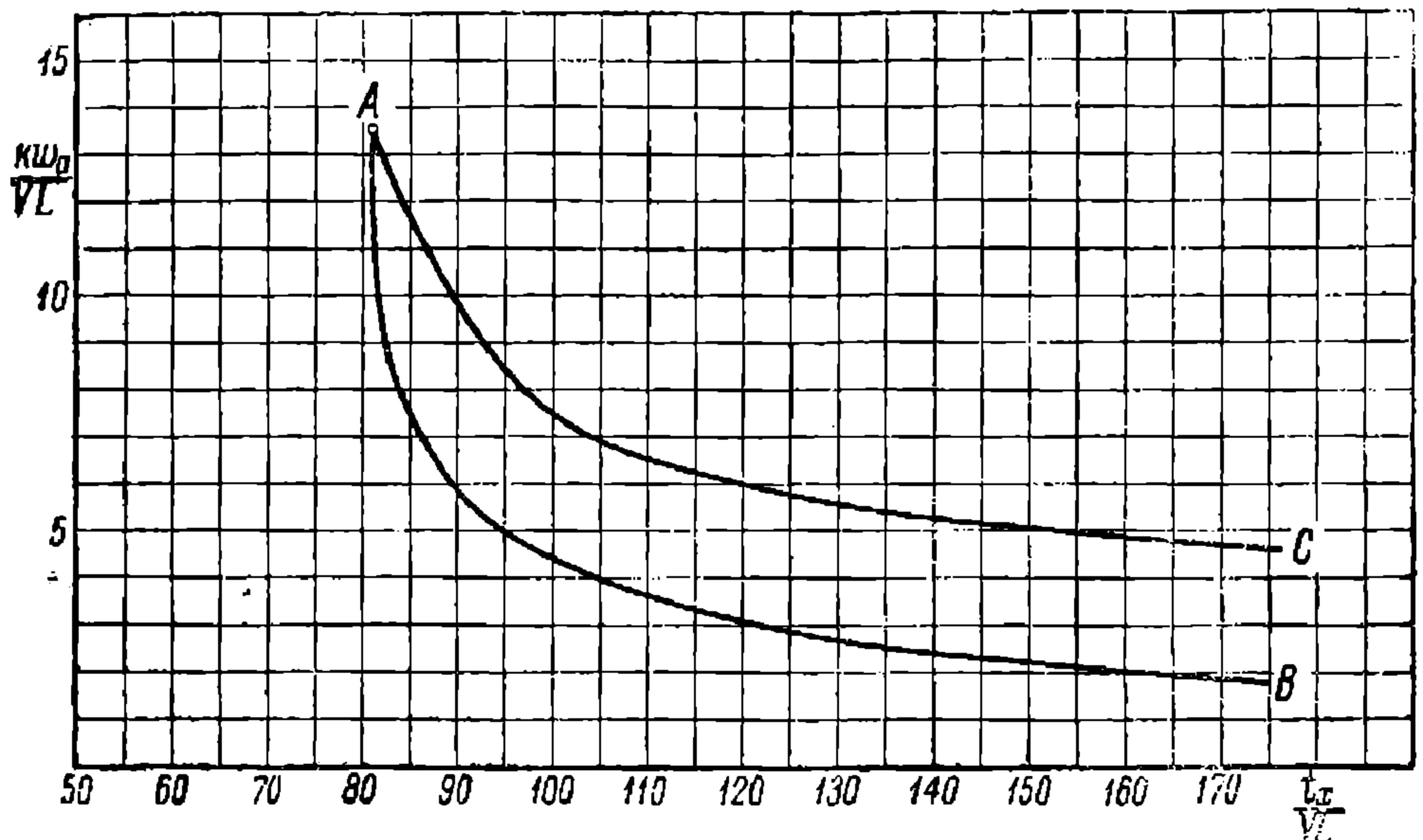


Рис. 59.

ложим их по ординатам диаграммы рис. 59. Найдем из того же рис. 52 значения τ_x , соответствующие ранее найденным l , и подставим их в формулу (129). Найденные таким образом величины $\frac{t_x}{\sqrt{L}}$ отложим по абсциссам диаграммы рис. 59. Таким образом на рис. 59 в виде линии AB мы получаем зависимость величины $\frac{kw_a}{\sqrt{L}}$ от величины $\frac{t_x}{\sqrt{L}}$. Это и есть искомая универсальная диаграмма, дающая нам возможность определить необходимую минимальную пусковую мощность. Покажем применение ее на примере.

Предположим, что нам требуется определить минимальную пусковую мощность, необходимую для пробега перегона длиной 2,5 км в течение времени $t_x = 165$ сек.

Находим величину $\frac{t_r}{\sqrt{L}} = 104,5$. Откладывая ее по абсциссам диаграммы рис. 59, находим по ординатам кривой величину $\frac{k\omega_a}{\sqrt{L}} = 3,98$.

Умножая ее на \sqrt{L} , получаем $k\omega_a = 3,98 \cdot 1,58 = 6,29$. Зная вес

поезда $(P + Q)$, находим полную минимальную пусковую мощность $(P + Q) k\omega_a = kW_a$.

По тем же формулам (128) и (129) может быть построена также кривая потребной максимальной удельной пусковой мощности. Для этого на рис. 60 мы строим универсальные диаграммы движения при выключении тока в момент выхода на автоматическую характеристику. По ним, пользуясь формулами (128) и (129), как и ранее, находим кривую AC на рис. 59, дающую нам возможность подсчитать максимальную мощность для случая, когда выключение тока происходит в момент выключения пусковых реостатов. Точно таким же образом можно подсчитать максимальные мощности для случая, когда движение поезда происходит с остановками без применения тормозов. Для этого из диаграммы рис. 52 нужно извлечь те кривые движения, в которых поезд не имеет торможения, например, кривые OAQ , OBV и т. п. Беря соответственные l и τ_r , мы подставляем их в формулы (128) и (129) и строим зависимость $\frac{k\omega_a}{\sqrt{L}}$ от $\frac{t_r}{\sqrt{L}}$.

На рис. 59 эти кривые не построены, так как для коротких перегонов они не имеют большого практического интереса.

Порядок пользования кривой максимальных мощностей, очевидно, аналогичен порядку пользования кривой минимальной мощности.

4. Предварительный выбор целесообразной пусковой мощности

На основании соображений, которые изложены нами в предыдущих параграфах настоящей главы, мы можем установить пределы, в которых может лежать пусковая мощность двигателя при заданном времени хода. Пусть эти пределы будут kW_{min} и kW_{max} .

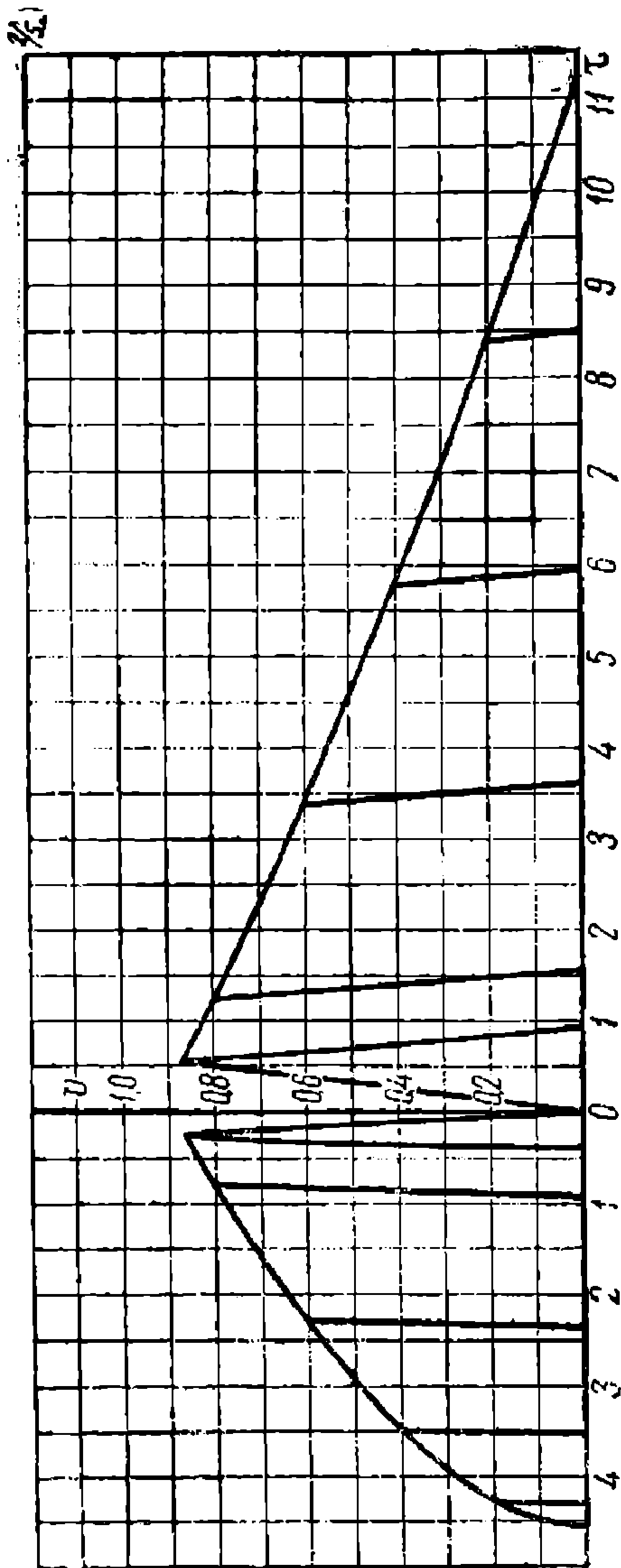


Рис. 60.

Установим теперь, на какой пусковой мощности следует остановиться, как наиболее целесообразной. Для разрешения этой задачи зададимся рядом пусковых мощностей, лежащих в пределах от мощности, kW_{min} до kW_{max} , и по универсальной характеристике двигателя построим для каждой из этих мощностей диаграмму движения $V = \varphi(t)$ для нашего перегона при заданном времени хода. Мы получим диаграммы, аналогичные диаграммам, построенным нами ранее на рис. 34. Определим удельный расход энергии на движение поезда. Он может быть найден либо по кривым тока, аналогичным кривым диаграммы рис. 34, либо по формуле (11). В этом последнем случае коэффициент полезного действия двигателя для всех вариантов приближенно может быть принят одним и тем же.

Отложим удельный расход энергии в функции пусковой мощности на диаграмме рис. 61. Мы видим, что при наименьшей мощности мы имеем больший расход энергии. Это объясняется большими потерями в тормозах. При увеличении пусковой мощности величина a падает, при некоторой скорости мы можем иметь ее минимум, а при дальнейшем росте пусковой мощности может начаться возрастание удельного расхода энергии. Это возрастание вызывается ростом потерь в пусковых реостатах при незначительном уже снижении потерь в тормозах.

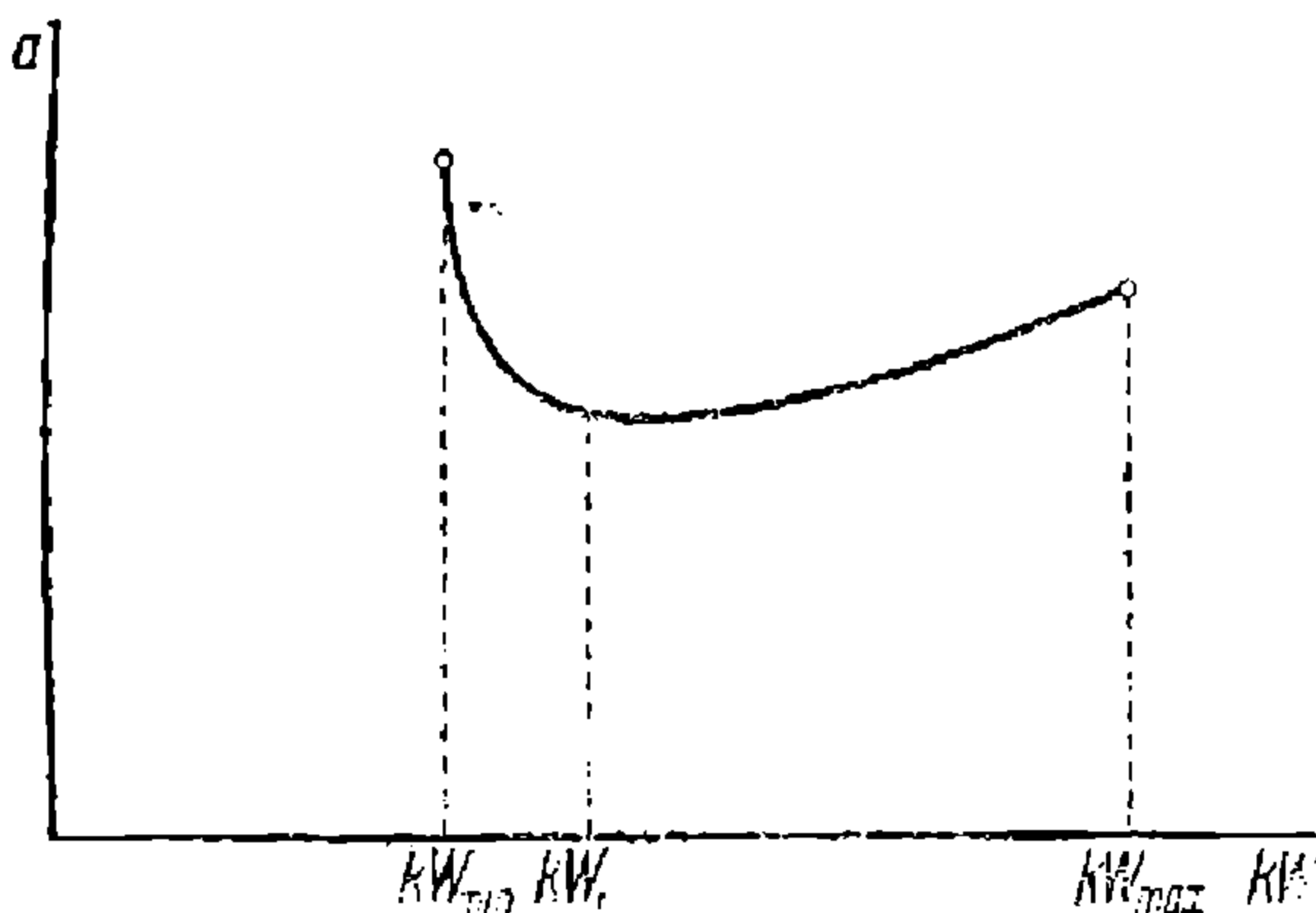


Рис. 61.

Анализируя диаграмму рис. 61, мы видим, что с точки зрения расхода энергии наиболее целесообразной в нашем случае является пусковая мощность порядка kW_1 . Она дает сильное снижение расхода энергии по сравнению с пусковой мощностью kW_{min} . Повышение мощности сверх kW_1 нерационально, так как оно дает сначала малое снижение a , а в дальнейшем даже его возрастание. Таким образом повышение пусковой мощности сверх kW_1 не влечет за собой никакой выгоды, бесполезно повышая нагрузку, а может быть, и мощность двигателя, сечение проводов контактной линии и мощность подстанций.

5. Предварительный выбор тягового электродвигателя по наивыгоднейшей пусковой мощности

Если выполнена работа по определению наивыгоднейшей пусковой мощности, изложенная в предыдущем параграфе, то выбор тягового электродвигателя может быть сделан следующим образом.

Зная диаграмму движения поезда при данной пусковой мощности, мы можем приближенно определить потери в тяговом электродвигателе как при нормальном заданном времени хода, так и при пробеге перегона без выбега. В соответствии с формулой (12) мы можем написать, что удельный расход энергии на покрытие потерь в двигателях и

движущем механизме, выраженный в ваттчасах на тоннокилометр, будет равен

$$a_d = \left(\frac{100}{\eta_c} - 1 \right) \left\{ 2,725 (w_{oc} + i_c) + \frac{V_b^2}{L} \left[0,0107 (1 + \gamma) - 0,000105 \frac{(w_{oc} + i_c)}{u_2} \right] \right\}. \quad (130)$$

Расход энергии на покрытие потерь в одном двигателе и его зубчатой передаче, отнесенный к одному километру пробега и выраженный в киловаттчасах, будет

$$A_d' = \left(\frac{100}{\eta_c} - 1 \right) \left\{ 2,725 (w_{oc} + i_c) + \frac{V_b^2}{L} \left[0,0107 (1 + \gamma) - 0,000105 \frac{w_{oc} + i_c}{u_2} \right] \right\} \frac{P + Q}{10^3 m} \quad (131)$$

Средние потери в двигателе будут:

$$W' = \left(\frac{100}{\eta_c} - 1 \right) \left\{ 2,725 (w_{oc} + i_c) + \frac{V_b^2}{L} \left[0,0107 (1 + \gamma) - 0,000105 \frac{w_{oc} + i_c}{u_2} \right] \right\} \frac{P + Q}{10^3 m t}, \quad (132)$$

где t — среднее время пробега 1 км пути с учетом времени столкновений на остановках.

Так как $\frac{1}{t}$ есть эксплуатационная скорость V_a , то

$$W' = \left(\frac{100}{\eta_c} - 1 \right) \left\{ 2,725 (w_{oc} + i_c) + \frac{V_b^2}{L} \left[0,0107 (1 + \gamma) - 0,000105 \frac{w_{oc} + i_c}{u_2} \right] \right\} \frac{(P + Q) V_a}{10^3 m}. \quad (133)$$

Подставляя в эту последнюю формулу значения V_b и V_a для случая нормального движения поезда, а также для случая движения без выбега, найдем два значения W' , а именно W'_{min} и W'_{max} . Величина W'_{min} представляет собою те средние потери в двигателе и зубчатой передаче, которые будут иметь место при строгом соблюдении машинистом предписанного диаграммой порядка движения поезда; W'_{max} получается при нагоне опоздания и движении с максимальной скоростью, возможной при данном двигателе.

Зная средние потери в двигателе и зубчатой передаче и имея коэффициент полезного действия этой последней, мы можем найти средние потери в самом двигателе. Пусть для рассматриваемых нами двух режимов движения поезда эти потери будут W_{min} и W_{max} .

Для того чтобы двигатель не получил перегрева при движении по нормальному графику, необходимо чтобы его теплоотдача A при предельном допустимом нагреве обмоток была не ниже величины W_{max} . Так как в действительности мы весьма часто будем наблюдать отступление от нормального порядка движения поезда, в частности при нагоне опозданий, необходимо иметь некоторый запас в мощности двигателя. Этот запас нужен также и потому, что двигатели неравно-

мерно распределяют между собою нагрузку и отдельные машины могут получить несколько повышенный нагрев. Кроме того запас мощности нужен и потому, что зачастую на отдельных рейсах поезд получает ненормальную перегрузку пассажирами, при которой удлиняется период разгона под реостатами и благодаря малой теплоемкости двигателей эти последние получают перегрев. Если график построен не с очень большим выбегом, можно для запаса требовать, чтобы указанная выше теплоотдача двигателя была равна W_{max} . При больших выбегах она может быть несколько меньше W_{max} , а при выбегах по отношению к длине перегона очень малых (большое время хода при малой пусковой мощности или длинные перегоны) теплоотдачу иногда приходится брать выше W_{max} . Таким образом мы устанавливаем некоторую теплоотдачу, которую должен иметь двигатель. Пусть в общем случае она будет равна A_p . В двигателях с самовентиляцией эта теплоотдача должна относиться к той эксплуатационной скорости, которую двигатель будет иметь при порядке ведения поезда, соответствующем потерям $W = A_p$. Если для ряда двигателей мы имеем диаграммы теплоотдачи в функции скорости,¹ мы можем предварительно подобрать подходящий для нас двигатель, учтя механические потери. Если данных характеристик теплоотдачи двигателя не имеется, можно определить продолжительную и часовую его мощность приблизительно.

Установленная нами выше потребляемая теплоотдача двигателя должна иметь место при средней эксплуатационной скорости. При продолжительной мощности, соответствующей полному напряжению на зажимах двигателя, скорость, а следовательно, и теплоотдача будут иными. Таким образом теплоотдача при продолжительной мощности может быть положена равной

$$A_{\infty} = \frac{A_p}{k}, \quad (134)$$

где k — коэффициент, вообще говоря, для коротких перегонов меньший единицы. Он имеет значение порядка 0,8 — 0,9.

Найдя A_{∞} , определяем продолжительную мощность при полном напряжении. Она будет

$$kW_{\infty} = \frac{A_{\infty}}{1 - \frac{\eta_{\infty}}{100}}, \quad (135)$$

если A_{∞} выражено в kV и η_{∞} — отдача двигателя при продолжительной мощности.

Часовая мощность двигателя будет

$$kW_u = \frac{kW_{\infty}}{u}, \quad (136)$$

если u — соотношение между продолжительной и часовой мощностью при полном напряжении. Как мы знаем, оно зависит от рода вентиляции.²

¹ См. В. А. Ш е в а л и н. Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев, 1931, рис. 38, стр. 91.

² То же, стр. 99.

С несколько меньшей точностью потребная часовая мощность может быть определена по эквивалентному нагревающему току. Для этого обращаемся к построенной нами диаграмме рис. 34 и берем из нее ту кривую движения, которая соответствует выбранной нами пусковой мощности. Далее строим кривую квадратов силы тока, проходящего через один двигатель, для нормального хода и для движения при нагоне опоздавший. Находим эквивалентный нагревающий ток, учитывая, что отступления от нормального хода поезда неизбежны.¹ Принимаем найденный эквивалентный ток за продолжительный. Зная соотношение между продолжительным и часовым током,² определяем ток часовой. Имея часовой ток, находим часовую мощность.

Таким образом одним из указанных выше приемов мы приближенно определяем потребную для нас часовую мощность двигателей. При составлении окончательного проекта выбранную мощность надлежит проверить, так как фактические характеристики двигателя могут не совпасть с принятыми нами обобщенными характеристиками, кроме того перегрузка двигателя против часовой мощности при разгоне может быть не та, которую мы принимали в расчете. В связи с этим выбранная нами пусковая мощность может также несколько отличаться от действительной наиболее выгодной. Метод, помощью которого можно произвести окончательный выбор двигателя, дан в следующих параграфах.

6. Метод окончательного выбора тягового электродвигателя при заданном времени хода

Наше рассуждение, изложенные в предыдущих параграфах, дают лишь приближенное решение задачи. Мы проанализировали влияние пусковой мощности двигателя на расход энергии на движение поездов и показали, что повышение пусковой мощности сверх некоторого предела не дает экономии в расходе энергии, но может даже вызвать повышение этого расхода. В этом анализе не было выявлено влияние часовой мощности на расход энергии, т. е. не было выяснено, какое изменение в расходе энергии будет наблюдаться, если одну и ту же пусковую мощность мы будем получать, беря двигатели различных часовых мощностей. Не было также показано влияние формы кривой отдачи тягового электродвигателя, а также изменения этой отдачи при переходе от одного двигателя к другому. Благодаря всем этим обстоятельствам при окончательном выборе двигателя мы будем иметь картину, несколько отличающуюся от той, которая нами нарисована в предыдущих параграфах.

Для выбора двигателя обратимся к шкале нормальных мощностей двигателей, которые могут быть нами получены на заводе, и выберем из них три двигателя, смежных по мощности.

Каждый из намеченных нами двигателей может работать при различных пусковых мощностях. Зададимся рядом пусковых мощностей kW_1, kW_2, kW_3 , измеренных на обода сцепных колес, и заставим каждый из трех двигателей производить разгон поезда при этих мощностях.

¹ См. стр. 48.

² См. В. А. Шевалин, Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев 1931, стр. 99.

Пусковая сила тяги во всех случаях будет равна наибольшей, допустимой по сцеплению. Тогда для наших двигателей мы будем иметь ряд кривых остаточной силы тяги, изображенных на рис. 62.

Для каждой пусковой мощности кривые остаточной силы тяги трех двигателей будут сходиться в одной точке, соответствующей моменту выхода на автоматическую характеристику.

Пусковые мощности нужно выбрать так, чтобы они лежали в пределах между kW_{max} и kW_{min} , установленными в предыдущих параграфах для заданного времени хода. Теперь для каждого двигателя мы можем определить ту пусковую мощность, которая даст нам наименьший расход энергии. Чтобы найти ее, нужно для каждого двигателя и для каждой пусковой мощности построить диаграммы движения поезда при заданном времени хода и найти удельный расход энергии. Порядок разрешения этой задачи для данного двигателя был подробно рассмотрен нами в главе II (на стр. 46).

Для каждого двигателя строим зависимость удельного расхода энергии от пусковой мощности. Мы получаем три кривых, изображенных на рис. 63. Из этих кривых мы находим минимум расхода энергии для каждого двигателя. Строим кривую

зависимости минимального расхода энергии в функции часовой мощности двигателя. Мы получим кривую рис. 64. По этой кривой мы устанавливаем тот двигатель и ту пусковую мощность, которые в отношении расхода энергии будут наиболее выгодными. Если кривая рис. 64 имеет непрерывный наклон в одну сторону и минимум минимумом расхода энергии по ней не определяется, то, очевидно, что взятые нами три двигателя были намечены неправильно и для определения наименьшего a нужно рассмотреть дополнительные варианты. Для этих вариантов следует изменить мощность двигателя в ту сторону, в которую наблюдается снижение a_{min} .

Проверка двигателя на нагревание и выбор часовой мощности

Таким образом мы определили тот двигатель и ту пусковую мощность, при которых имеет место минимум минимум расхода энергии. Далее проверим этот двигатель при выбранной пусковой мощности на нагревание. При этом, как обычно, учтем, что в действительной работе может быть неправильное ведение поезда, нагон опозданий и неравномерное распределение между двигателями нагрузки. В результате проверки на нагревание

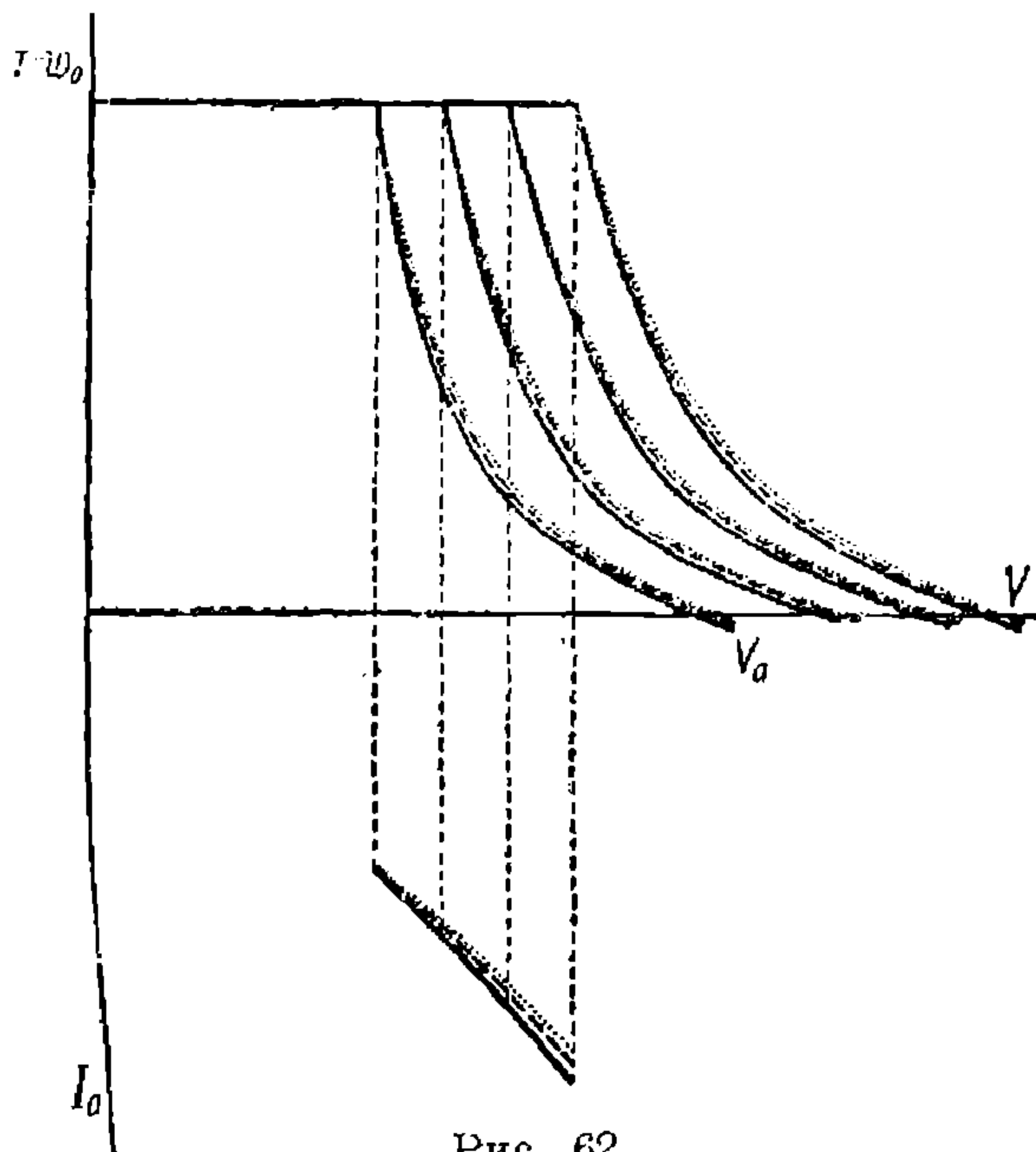


Рис. 62.

мы можем встретиться с тремя случаями: перегревом двигателя, полным использованием его в отношении нагрева и, наконец, случаем, когда двигатель не достигает допустимого предела температуры.

Случай, когда намеченный двигатель дает перегрев

В случае, когда намеченный двигатель дает перегрев, приходится при данном двигателе отказаться от режима движения и пуска, дающих наименьший расход энергии и для данного двигателя принять тот режим работы, который допустим по условиям нагрева. Таким образом мощность двигателя является недостаточной,

чтобы организовать движение поездов при благоприятных с точки зрения расхода энергии условиях. Снизим пусковую мощность двигателя и найдем тот режим работы, при котором он не даст перегрева. Установим удельный расход энергии при этом допустимом перегреве. Если этот расход энергии будет все же ниже расхода энергии при других двигателях, останавливаемся на выбранном двигателе. Если расход энергии при двигателе большей мощности заметно ниже, про-

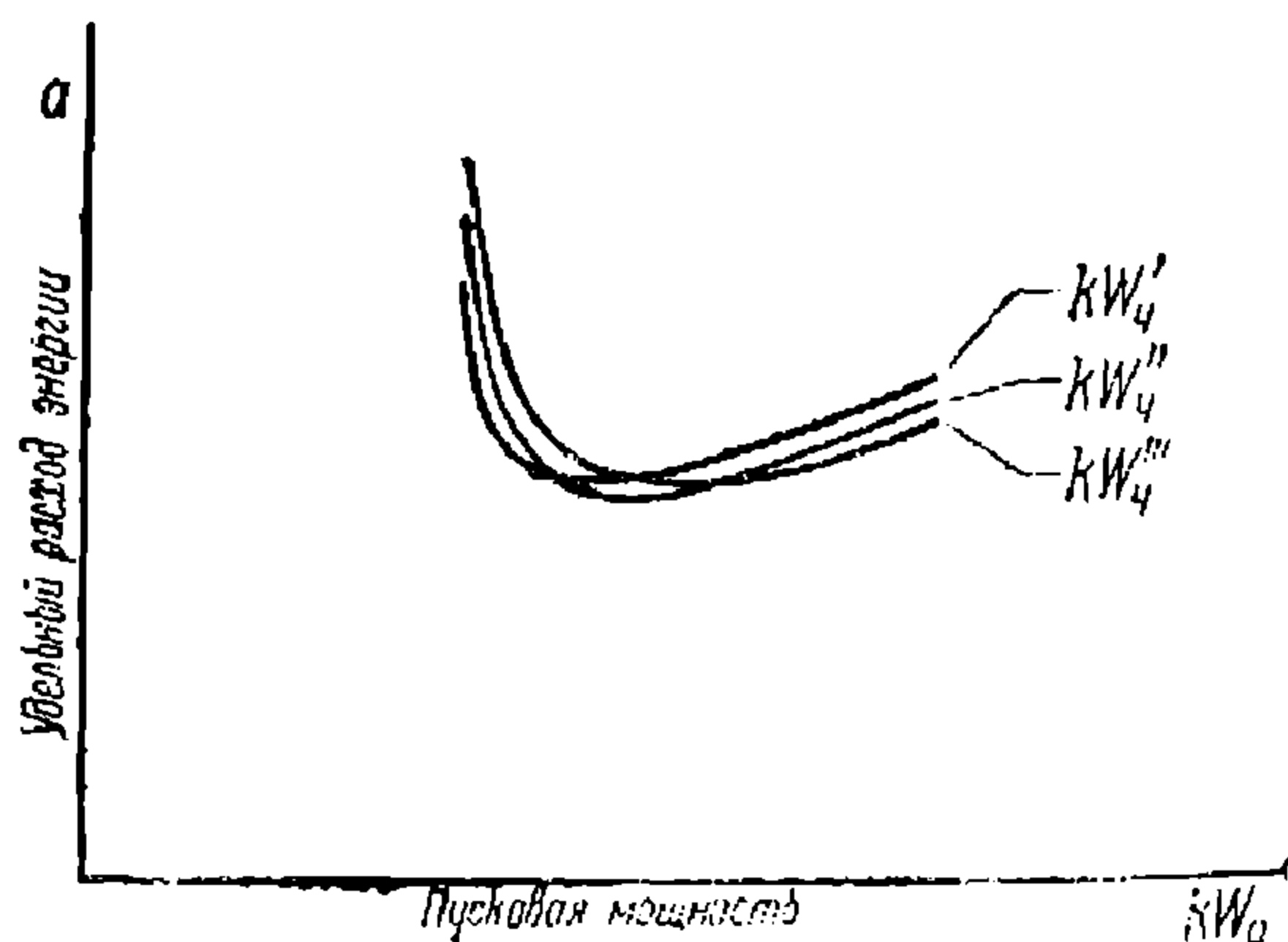


Рис. 63.

анализируем, оправдывает ли экономия в затратах на энергию перерасход на приобретение и эксплуатацию более мощного электродвигателя.

Случай, когда намеченный двигатель нагревается до предельной допустимой температуры

Если намеченный двигатель при нагоне опоздания нагревается до предельной допустимой температуры, он может нести работу по выбранному для него режиму движения поезда. Для окончательного решения вопроса о его выборе нужно посмотреть, какой расход энергии дает двигатель меньшей мощности при том режиме движения, который для него может быть допущен. Если повышение расхода энергии при меньшем двигателе незначительно, можно принять двигатель меньшей мощности. При этом нужно иметь небольшой запас мощности на неравномерное распределение нагрузки между двигателями.

Случай, когда намеченный двигатель не использован в отношении нагрева

Если намеченный двигатель дает минимум расхода энергии, но является неиспользованным по нагреву, следует установить, какой наименьший расход энергии даст двигатель меньшей мощности. После этого надлежит сопоставить экономию по оплате электрической энергии при более мощном двигателе с добавочными капиталовложениями на его приобретение, а также с увеличением прямых и косвенных эксплуатационных расходов в связи с его применением. В результате рассмотрения этих факторов можно уста-

Анализ пригодности двигателя по кривым остаточной силы тяги

Мы изложим тот метод, помощью которого может быть подобран для данных условий работы наиболее выгодный двигатель. Может получиться впечатление, что этот метод включает в себе большое количество расчетов и требует построения большого количества диаграмм. Следует однако отметить, что при практическом проведении метода значительное количество расчетов отпадет и объем работы по выбору двигателя становится не столь обременительным. В действительности при данной пусковой мощности не для всех трех двигателей придется строить диаграммы движения и находить расход энергии. Сплошь и рядом путем анализа диаграмм остаточной силы тяги можно предварительно установить, какой из трех двигателей при данной пусковой мощности будет иметь преимущество и только для этого двигателя при этой пусковой мощности построить диаграмму движения и найти расход энергии. Укажем путь, по которому этот анализ должен быть проведен.

Возьмем, как и ранее, три двигателя и зададимся рядом пусковых мощностей на ободу колеса. Построим для каждого двигателя и для каждой пусковой мощности кривую остаточной силы тяги. Мы получим кривые, аналогичные кривым рис. 62. Дополним эти диаграммы кривой пускового тока каждого двигателя, построенной в функции скорости поезда V_a в момент выхода на автоматическую характеристику. Кривые пусковых токов изображены в четвертом координатном угле рис. 62.

По полученным кривым мы можем дать сравнительную оценку двигателей в отношении расхода энергии при данном времени хода. Для того, чтобы ознакомиться с методом этой оценки, будем сравнивать между собою два двигателя. Пусть диаграммы двигателя большей мощности изобразятся пунктирными линиями.

Если диаграммы остаточной силы тяги и пускового тока имеют вид, изображенный на рис. 65, то двигатель большей мощности в отношении расхода энергии даст лучшие результаты.

Действительно, пусковой ток двигателя большей мощности при тех же пусковых мощностях на ободу будет ниже. Вследствие этого двигатель большей мощности даст меньшие потери в пусковых реостатах. Так как двигатель большей мощности в нашем случае имеет меньший пусковой ток, отдача этого двигателя после выхода на автоматическую характеристику при работе на некотором участке кривой разгона будет выше, а следовательно, расход энергии на покрытие потерь в двигателе на коротких перегонах будет меньше. Наконец, кривые остаточных сил тяги в двигателе большей мощности лежат выше. Благодаря этому кривая разгона поезда для этого двигателя при той же пусковой мощности расположится выше, чем у двигателя меньшей часовой мощности. В связи с этим двигатель большей мощности



Рис. 64.

даст меньшие потери в тормозах при том же времени хода. В общем итоге в отношении расхода энергии двигатель большей мощности имеет преимущество и нужно сопоставить те выгоды, которые он может дать с теми дополнительными первоначальными затратами и расходами по его ремонту, которые придется нести, приняв его для оборудования вагона.

Изложенные рассуждения справедливы для коротких перегонов. Выводы могут изменяться в случае длинных перегонов, если при больших скоростях двигатель большей мощности имеет меньший коэффициент полезного действия, чем двигатель малой мощности.

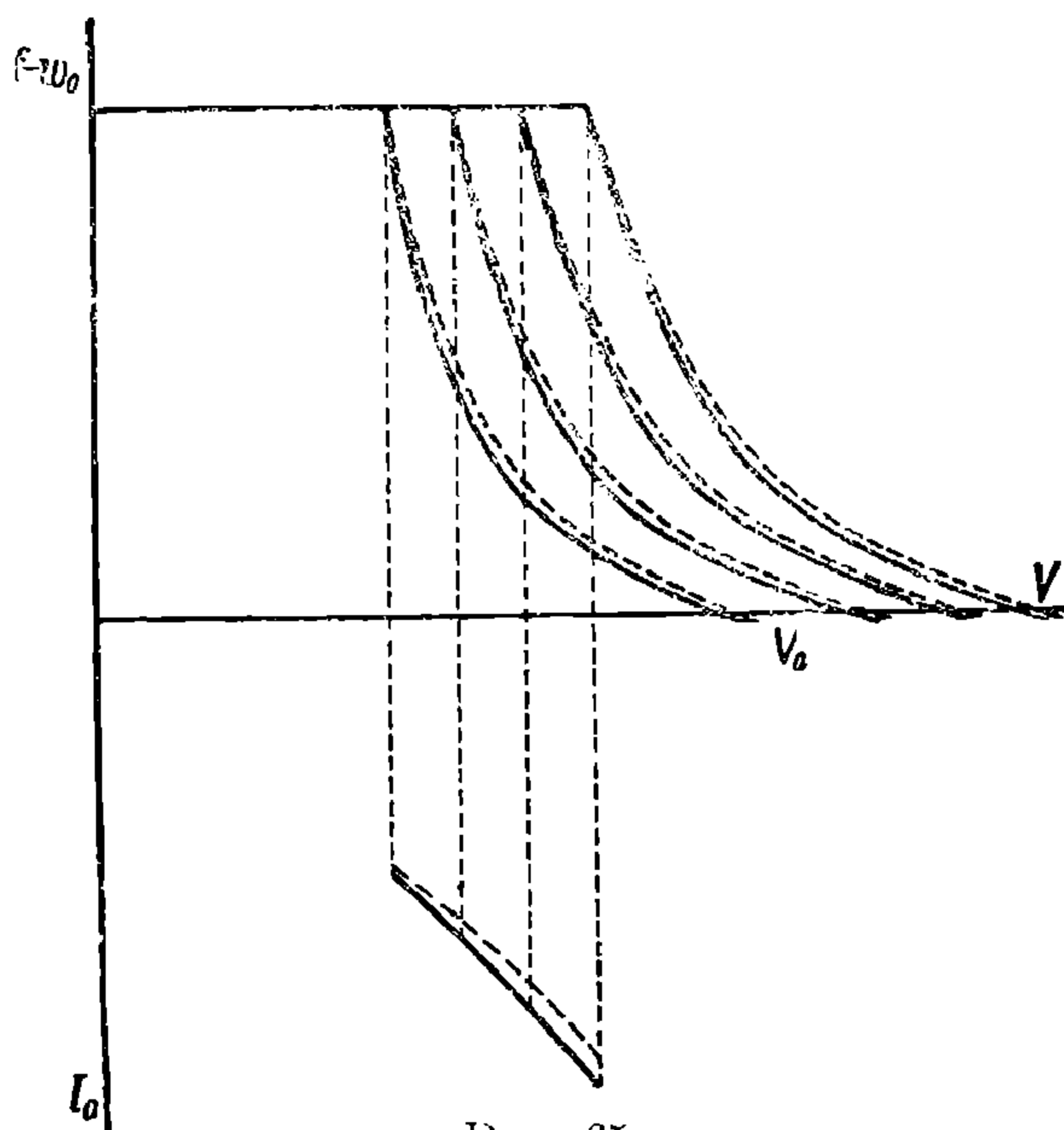


Рис. 65.

Если бы кривые остаточных сил тяги и пускового тока имели вид, изображенный на рис. 66, то, рассуждая так же, мы пришли бы к заключению, что потери в пусковых реостатах и потери в самом двигателе при двигателе большей мощности будут выше, а потери в тормозах меньше, чем при пробеге перегона с двигателем меньшей мощности. Указать, какой из двигателей даст в итоге меньший расход энергии, можно только построением диаграмм движения, но большей частью существенной разницы между двумя двигателями в таких случаях не наблюдается.

На диаграммах рис. 65 и 66 все кривые остаточной силы тяги для двигателя большей часовой мощности лежат выше. В действительности часто может быть, что при одних пусковых мощностях они лежат выше, при других ниже. Диаграммы пусковых токов также могут давать пересечения. Анализ влияния мощности двигателя на расход энергии в этих случаях может идти тем же путем, который мы изложили выше.

Таким образом по диаграммам остаточной силы тяги мы можем установить, какой двигатель при данной пусковой мощности даст минимум расхода энергии. Очевидно, что двигатели, не дающие преимуществ при данном режиме пуска, могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения, и число вариантов, подлежащее проработке в диаграммах движения, может быть уменьшено.

Во всех предыдущих рассуждениях касательно выбора двигателя при данном времени хода мы предполагали применение шкалы мощностей двигателей, строящихся данным заводом. Если идет речь о выработке нового типа двигателя, предназначенного для данных условий движения, то для предварительного определения

потребной его часовой мощности можно пользоваться универсальной характеристикой тяговых электродвигателей, приняв для нее по возможности ту форму кривой отдачи, которую предполагается иметь в новом двигателе.

Какие варианты двигателей должны быть рассмотрены

Изложенный нами метод выбора двигателя основан на рассмотрении двигателей трех мощностей. Какие же варианты мощностей должны быть подвергнуты сравнению?

На стр. 103 мы указали, что пусковые мощности, при которых мы заставим работать двигатели, должны лежать в пределах между максимальной и минимальной мощностью, необходимых для пробега перегона в заданное время. Перегрузка двигателей при этом против часовой мощности не должна превосходить допустимых пределов (обычно не выше чем на 75% от часового тока).

Кроме того для выбора сравниваемых часовых мощностей может быть взят и другой критерий.

В случае моторвагонной тяги на дорогах с короткими перегонами наибольшая нагрузка двигателя имеет место при разгоне поезда.

Выше было указано, что в случае, когда мы не имеем ограничения по мощности тягового электродвигателя, то с точки зрения расхода энергии целесообразно применять наибольшее ускорение, допустимое по условиям сцепления. Таким образом, если при выборе тягового двигателя мы не ограничены мощностью, следует при разгоне поезда пользоваться наибольшей допустимой по сцеплению силой тяги F_{max} . Тогда, очевидно, пусковая мощность двигателя будет равна

$$kW_a = \frac{F_{max} \cdot V_a}{367 m}, \quad (137)$$

где:

m — число электродвигателей,

V_a — скорость в момент выхода на автоматическую характеристику при полном возбуждении двигателя.

Скорость V_a находится в некотором соотношении с заданной технической скоростью движения поездов. Приблизительно можно считать, что V_a лежит в пределах от 0,65 V_x до 1,1 V_x . Верхний предел относится к коротким, а нижний — к длинным перегонам.

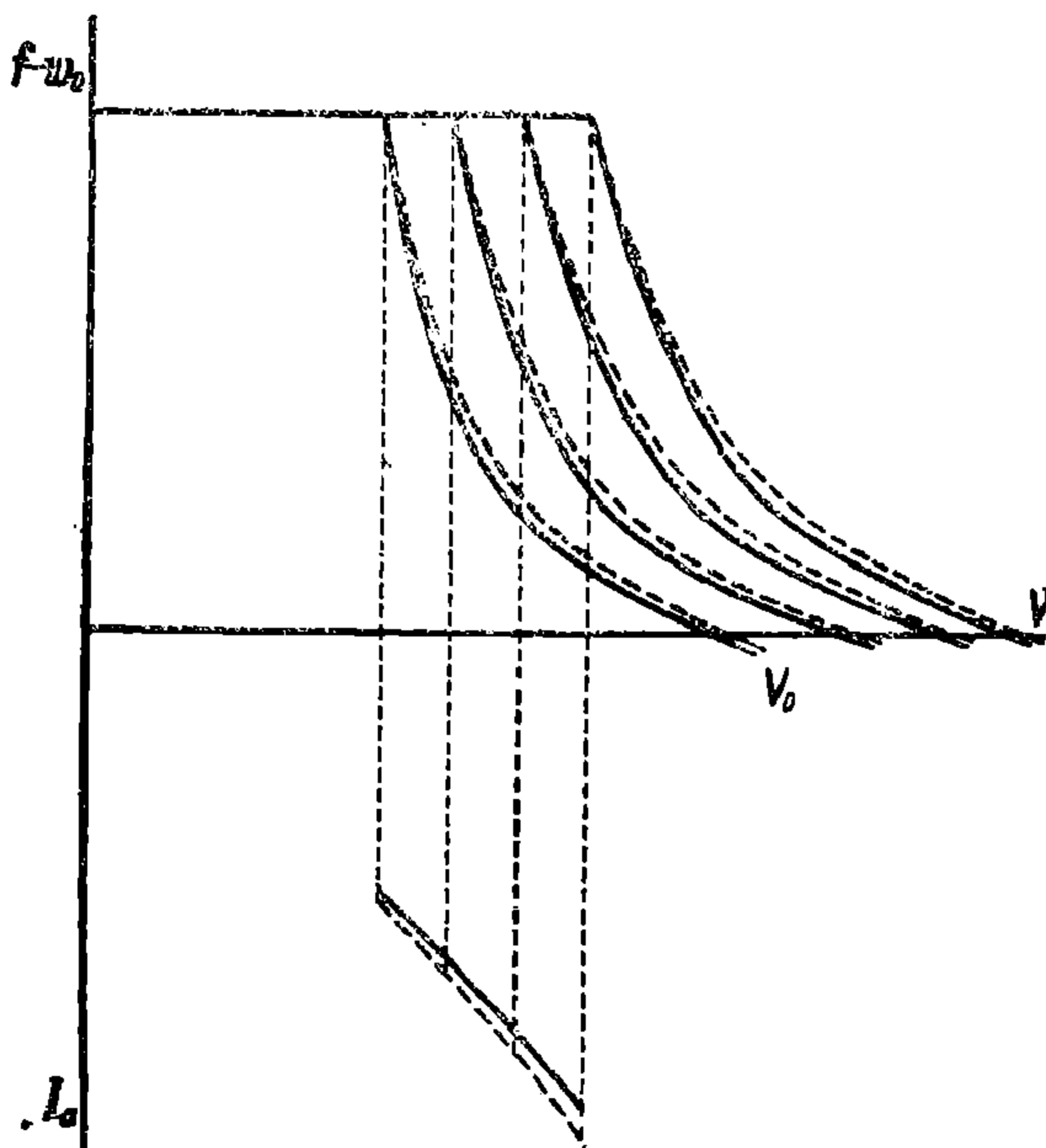


Рис. 66.

УДМУТ
(ДИП)

Таким образом, задавшись предварительно величиною V_a , мы находим приближенно пусковую мощность kW_a . Зная пусковую мощность, можно приближенно наметить потребную часовую мощность двигателя. При разгоне поезда двигатель может работать при перегрузке. Перегрузка может быть тем больше, чем длиннее перегон, т. е. чем реже разгоны поезда. При длинных перегонах все же не следует идти на большие перегрузки, так как при большой длине перегона режим разгона мало отражается на расходе энергии, а перегрузка бесполезно перегревает двигатель. При очень коротких перегонах перегрузку приходится снижать из-за большого нагрева машины. На стр. 35 мы указывали, что пределом нагрузки двигателя в регулярной работе следует считать нагрузку, при которой пусковой ток на 75% превосходит часовой ток. Нужно, однако, отметить, что такой перегрузки двигателя при движении по обычному графику лучше избегать. Благодаря малой теплоемкости меди, при сильных колебаниях нагрузки обмотка испытывает сильные колебания температуры. Ввиду различных температурных коэффициентов расширения меди и железа происходит относительное перемещение их и при частых разгонах поездов наблюдается быстрая порча изоляции. Таким образом мы можем приближенно наметить перегрузку двигателя, принимаемую нами при разгоне поезда. Пусть эта перегрузка будет $100k\%$ против часовой мощности. Тогда потребная часовая мощность приближенно будет равна

$$kW^ч = \frac{F_{max}V_a}{367 m(1+k)} \quad (138)$$

Обращаемся к шкале мощностей тяговых двигателей, изготовляемых заводами, и выбираем двигатель ближайший по мощности. Далее, выбираем по шкале смежный двигатель большей мощности, а также смежный двигатель меньшей мощности. Намеченные три двигателя должны быть подвергнуты тому сравнению, которое было нами изложено выше.

Если мы определяем потребную часовую мощность двигателя, который еще не строится промышленностью, а должен быть запроектирован, то для сравнения вариантов берем мощность среднего двигателя равной с округлением мощности, определенной по формуле (138). Двигатели смежные могут иметь мощность приблизительно на 10% выше и ниже мощности среднего двигателя.

7. Особенности выбора тягового электродвигателя для электровозной тяги

Если электровозная тяга находит себе применение на дорогах с длинными перегонами, как обычно это имеет место на междугородных железнодорожных линиях, то мощность тягового электродвигателя диктуется не условиями разгона, а профилем пути и скоростями движения. Особенностью дорог этого типа является то, что на них поезда имеют малый процент сцепного веса и малую удельную силу тяги. В связи с этим профиль пути оказывает большое влияние на нагрузку тягового электродвигателя.

При выборе электровоза требуется определить два основных его параметра—сцепной вес и мощность. Выбор этих параметров нужно

произвести таким образом, чтобы сцепной вес и тяговые электродвигатели имели по возможности наилучшее использование. Использование сцепного веса характеризуется коэффициентом сцепления, использование электродвигателей—их нагревом, а также соотношением между наибольшей их нагрузкой и часовой мощностью. Характерной величиной является коэффициент сцепления при часовой мощности ψ .

При выборе электровоза могут быть два случая постановки вопроса: а) выбор электровоза для данной линии, б) выбор электровоза для сети электрифицируемых железных дорог.

Мы предполагаем, что в обоих случаях вес поезда задан грузооборотом.

Остановимся сначала на выборе мощности электровоза для данной железнодорожной линии.

Если вес поезда нам задан, то прежде всего мы должны определить потребный сцепной вес электровоза. Как известно, сцепной вес определяется по условиям движения поезда на руководящем подъеме, а на линиях с малыми предельными подъемами—условиями взятия поезда с места. В первом случае сцепной вес P_c может быть определен по формуле¹

$$P_c = \frac{P_\delta(w_0' + i_0) + Q(w_0'' + i_0)}{1000\psi - w_0' - i_0}, \quad (139)$$

где:

- P_δ — вес электровоза, передаваемый через поддерживающие оси;
- w_0' — удельное сопротивление движению электровоза;
- w_0'' — удельное сопротивление движению состава;
- i_0 — руководящий подъем в тысячных.

Если вес электровоза диктуется условиями взятия поезда с места, то для определения P_c может служить формула¹

$$1000 P_c \psi = (P_c + P_\delta)(w_0' + i_c) + Q(w_0'' + i_c) + \frac{1000}{g} \cdot \frac{dV}{dt} [(P_c + P_\delta)(1 + \gamma') + Q(1 + \gamma'')], \quad (140)$$

где:

- i_c — наибольший подъем, имеющийся на главных станционных путях;
- γ' — коэффициент, учитывающий инертность вращающихся частей электровоза;
- γ'' — тот же коэффициент для вагонов.

В обеих формулах под ψ нужно понимать эксплуатационный коэффициент сцепления. Он, как известно, зависит от скорости. Величина его может быть установлена по данным, имеющимся в руководствах по тяговым расчетам для электрических железных дорог.² При выборе величины ψ нужно иметь в виду род движущего механизма электровоза, а также систему сопряжения его рессор, как

¹ См. В. А. Шевалин. „Тяговые расчеты электрических жел. дорог и трамваев“, 1931, стр. 327.

² То же, стр. 109.

факторы, влияющие на разгрузку осей электровоза при реализации силы тяги. Величина разгрузки сцепных осей, очевидно, отражается на величине коэффициента сцепления ψ .

Установив потребный вес электровоза, можно перейти к вопросу об определении мощности его тяговых электродвигателей. При решении этой задачи мы можем встретиться с двумя крайними случаями: 1) случаем равнинной железнодорожной линии с малыми руководящими подъемами, 2) случаем железнодорожной линии с большими руководящими подъемами малого протяжения.

В первом случае вес электровоза мал по сравнению с весом состава. Колебания нагрузки тяговых электродвигателей будут невелики, так как благодаря большому весу состава для данного электровоза нагрузка его даже на площадке будет велика. В связи с этим мощность, которую двигатели электровоза будут реализовать на руководящем подъеме, по условиям нагрева должна быть, вообще говоря, ниже часовой мощности и близка к мощности продолжительной. В нормальных условиях на данной линии электровоз никогда не должен работать при часовой мощности. Благодаря этому расчетный коэффициент сцепления электровоза $\psi_{\text{ч}}$ при часовой мощности должен быть выше эксплуатационного коэффициента сцепления, т. е.

$$\psi_{\text{ч}} = \psi (1 + k_1), \quad (141)$$

где k_1 при двигателях с принудительной вентиляцией может достигать значений $k_1 = 0,25—0,3$.

Часовая скорость электровоза должна быть несколько ниже той скорости, которую поезд должен иметь на руководящем подъеме.

В случае линии с большими руководящими подъемами вес электровоза составляет большой процент от веса поезда, иными словами, данный электровоз будет везти состав малого веса. В связи с этим нагрузка двигателей электровоза на площадке и малых подъемах будет мала. Двигатели электровоза, нагреваясь на больших подъемах, будут охлаждаться при пробеге площадок и малых подъемов. Ввиду этого, если руководящие подъемы не затяжные, тяговым двигателям можно дать на этих подъемах значительную перегрузку. Перегрузка эта может даже превосходить часовую мощность. Таким образом, если электровоз не имеет избытка мощности (не «перемоторен») для данной линии, то коэффициент сцепления его при часовой мощности может быть ниже эксплуатационного коэффициента сцепления, т. е. в этом случае

$$\psi_{\text{ч}} = \frac{\psi}{1 + k_2} \quad (142)$$

Часовая скорость электровоза может быть выше скорости, развиваемой поездом на руководящем подъеме.

Если дорога с большими руководящими подъемами имеет подъемы затяжного характера, то в зависимости от их протяжения $\psi_{\text{ч}}$ приходится повышать. В пределе при очень затяжных подъемах эксплуатационный коэффициент сцепления может быть равен коэффициенту сцепления при продолжительной мощности.

Мы рассмотрели крайние случаи. Если линия по характеру своего профиля лежит в промежутках между этими крайними случаями, ана-

логичным образом можно установить соотношение между ψ_c и эксплуатационным коэффициентом сцепления ψ , а также соотношение между часовой скоростью V^c и скоростью на руководящем подъеме. Имея ψ_c и V^c , мы ориентировочно находим потребную часовую мощность электровоза

$$kW_c = \frac{1000\psi_c P_c V_c}{367}. \quad (143)$$

Далее, разделив эту мощность на число двигателей электровоза, мы находим предварительно мощность отдельного двигателя. Взяв характеристики, производим на основе тягового расчета и общеизвестных методов проверку двигателей на нагревание и устанавливаем ту окончательную мощность, которая электровозу должна быть дана. Если нагрев двигателя будет при этом достигать предельных допустимых нагревов, то двигатели электровоза будут полностью использованы, и электровоз не будет иметь запаса мощности. При сырых рельсах будет также полное использование сцепного веса.

Мы неоднократно указывали, что выбор тягового двигателя без запаса мощности недопустим ввиду некоторой неравномерности распределения нагрузок между двигателями электровоза, а также в силу отступлений от нормальных нагрузок, неизбежных в эксплуатации. Благодаря этому целесообразно дать электровозу некоторый запас мощности, т. е. несколько «перемоторить» его. Это следует сделать за счет повышения величины ψ_c . При этом сократится число повреждений изоляции тяговых двигателей и понизятся расходы по их ремонту.

Если мы имеем электровоз с некоторым запасом мощности, можно получить хорошее использование его сцепного веса не только при сырых, но и при сухих рельсах. Такой электровоз позволит увеличивать составы поездов в сезоны, имеющие установившуюся сухую погоду, без риска получить опасные перегревы тяговых электродвигателей.

Все наши рассуждения до сих пор касались выбора мощности электровоза, предназначенного для работы на данной железнодорожной линии. Если электровоз проектируется для сети электрифицируемых жел. дорог, то при данном сцепном весе мощность его надлежит устанавливать применительно к наиболее трудной линии. Из предыдущего следует, что таковой линией является линия с наименьшими руководящими подъемами. На ней составы поездов и нагрузки двигателей будут наибольшими, а расчетный коэффициент ψ_c при часовой мощности получит наивысшее значение.

Если электровоз применяется на путях с короткими перегонами (например в промышленном транспорте), режим разгона поезда может иметь доминирующее влияние на определение потребной мощности. В этом случае методика выбора тягового электродвигателя в основе своей не будет отличаться от той же методики в случае моторных вагонов.

НБ
УДУНТ
(ДУНТ)

Г Л А В А V

Выбор тягового электродвигателя в связи с выбором рациональных технических скоростей движения поезда

Весьма часто проектирующему приходится не только выбирать тяговый электродвигатель для данного поезда, но и устанавливать целесообразную скорость движения поездов.

Предположим, что нам дан типовой перегон данной дороги, имеющий длину L . Требуется подобрать тяговый электродвигатель для моторвагонного поезда весом $(P + Q)$ и назначить техническую скорость движения поездов по типовому перегону. Предполагается, что число тяговых электродвигателей в моторном вагоне установлено предварительно по соображениям сцепного веса. Так как большое ускорение при разгоне и большое замедление при торможении являются благоприятными факторами, примем для движения поезда наибольшее ускорение, допустимое по сцеплению, а замедление при торможении установим в соответствии с нормами стр. 19.

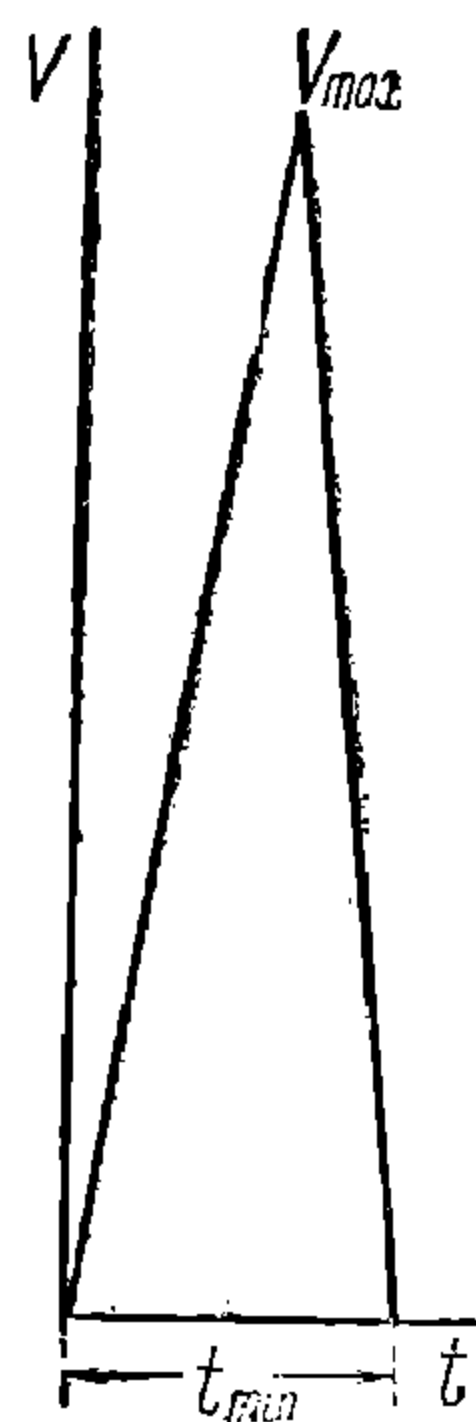


Рис. 67.

Физический минимум времени хода на данном перегоне

Время пробега перегона при данном ускорении разгона и данном замедлении торможения может колебаться в весьма широких пределах.

Легко однако найти физический минимум этого времени. Этот минимум мы получим, если движение поезда будет происходить по диаграмме, изображенной на рис. 67.

При минимальном физически возможном времени пробега мы должны иметь разгон поезда под реостатами при постоянном ускорении вплоть до скорости V_{max} . Торможение поезда с заданным замедлением должно начинаться от той же скорости V_{max} с момента выключения тока. Работа двигателя по автоматической характеристике не должна иметь места.

Связь между временем хода и потребной пусковой мощностью

Если мы будем увеличивать время хода сверх минимального t_{min} , то диаграмма движения поезда будет зависеть от пусковой мощности двигателя.

Крайние случаи диаграмм движения мы получим, если будем применять наибольшие и наименьшие пусковые мощности для данного времени хода (см. стр. 92 и 93).

В случае применения наибольших пусковых мощностей мы будем иметь для разных времен хода по данному перегону диаграммы движения, изображенные на рис. 68. Они построены с применением наибольшего возможного выбега и торможения. Мы видим, что для времен

хода $\leq t_n$ двигатели поезда не работают по автоматической характеристике и движение под током происходит только под реостатами. Для времен хода, больших t_n , поезд проходит перегон без торможения, делая остановку только путем выбега.

При применении минимальных пусковых мощностей для каждого времени хода диаграммы движения поезда получают вид, изображенный на рис. 69. В них не должно быть выбега (см. стр. 92).



Рис. 68.

Как мы разъяснили в предыдущей главе, наиболее целесообразные диаграммы движения занимают некоторое среднее положение между диаграммами рис. 68 и 69.

Сопоставляя диаграммы рис. 68 и 69, мы видим, что при минимальном физически возможном времени хода t_{min} диаграммы движения для максимальной и минимальной пусковой мощности совпадают. Таким образом минимальному времени хода соответствует единственная возможная пусковая мощность.

Из диаграмм рис. 68 и 69 явствует, что пробег перегона при малых временах хода сопряжен с движением с большими скоростями. Для каждого подвижного состава и пути, как мы знаем, существует некоторая

предельная допустимая (конструктивная) скорость движения V_p .¹ Отметим ее на диаграммах рис. 68 и 69. Мы видим, что эта ходовая скорость устраняет возможность получения времен хода, меньших t_p .

Имея диаграммы рис. 68 и 69, мы можем найти пределы возможных пусковых мощностей двигателя в зависимости от времени хода. Эти пределы определяются по диаграмме рис. 59. Линия AC дает нам кривую максимальных возможных пусковых мощностей, а линия AB кривую минимальных.

Анализируя диаграмму рис. 69, мы видим, что при больших временах хода небольшое повышение пусковой мощности значительно сокращает время пробега перегона. При малых временах хода для небольшого сокращения затраты времени на пробег перегона нужно сильно повысить пусковую мощность. Кривые рис. 69 построены для движения по площадке. Аналогичные универсальные диаграммы могут быть построены для любого подъема.

Имея для каждого времени хода возможный минимум и максимум пусковой мощности, мы можем для каждого времени хода найти ту пусковую мощность, которая дает минимум расхода энергии.

Эта задача может быть разрешена тем порядком, который подробно описан в предыдущей главе. Ту же задачу приближенно можно разрешить на основе подобия диаграмм движения.

¹ В трамваях эта скорость определяется безопасностью уличного движения.

Обратимся к универсальным диаграммам движения, изображенным на рис. 52, и применим их к случаю одного и того же перегона длиной в 1 км. Пусть ускорение разгона во всех случаях будет одно и то же. Отдельные диаграммы движения будут отличаться только пусковой мощностью и временем хода.

Примем ускорение при разгоне равным $0,5 \text{ м/сек}^2$. Тогда согласно формуле (123') мы можем найти удельную пусковую силу тяги равной

$$f_u = 56,5 \text{ кг/т.}$$

Удельная часовая сила тяги будет равна (см. стр. 95)

$$f_u = 34 \text{ кг/т.}$$

Согласно формуле (124) скорости универсальной диаграммы движения должны быть умножены на величину

$$V_u = V \sqrt{\frac{L \cdot f_u}{l \cdot \sigma a}} = V \sqrt{\frac{34 \cdot 3,6 \cdot 1000}{30 \cdot l}} = \frac{63,9}{\sqrt{l}} \quad (144)$$

Времена хода универсальной диаграммы рис. 52 на основании формулы (127) должны быть умножены на величину:

$$V \sqrt{\frac{\sigma \cdot L}{f_u a \cdot l}} = V \sqrt{\frac{30 \cdot 3,6 \cdot 1000}{34 \cdot l}} = \frac{50}{\sqrt{l}} \quad (145)$$

Таким образом, беря из рис. 52 величину l , соответствующую различным формам диаграммы движения, мы находим те коэффициенты, на которые должна быть помножена скорость и время хода данной универсальной диаграммы для того чтобы применить ее к длине перегона в 1 км. Таким образом мы получаем ряд кривых, изображенных на рис. 70.

Кривые рис. 70 очень выпукло указывают те неточности, которые связаны с применением принципа подобия к тяговым расчетам. Мы знаем, что диаграммы $V = \varphi(t)$ для выбега должны быть параллельны друг к другу в направлении оси абсцисс и отнюдь не могут пересекаться.

В диаграммах рис. 70 кривые выбега несколько отклоняются от параллельности и дают пересечения. Таким образом в отдельных диаграммах, построенных по принципу подобия для одного и того же перегона, как бы принимается различное сопротивление движению поезда при данной скорости.

Теперь, воспользовавшись диаграммой рис. 53, мы можем определить расход энергии на движение поезда при разных пусковых мощностях и различных режимах пробега перегона. Выразим удельный

расход энергии в функции времени хода. Для этого абсциссы диаграммы рис. 53 умножим на величину

$$V \frac{\sigma}{f_{ca}} \cdot \frac{L}{l} = \frac{56}{V l}$$

и ординаты на величину

$$\frac{f_{ca}}{0,367 \eta_{ca}} = \frac{34}{0,367 \cdot 0,9} = 102,8.$$

Мы получаем диаграмму рис. 71. На этой диаграмме рассмотрено значительно большее число случаев, чем на диаграмме рис. 53, причем

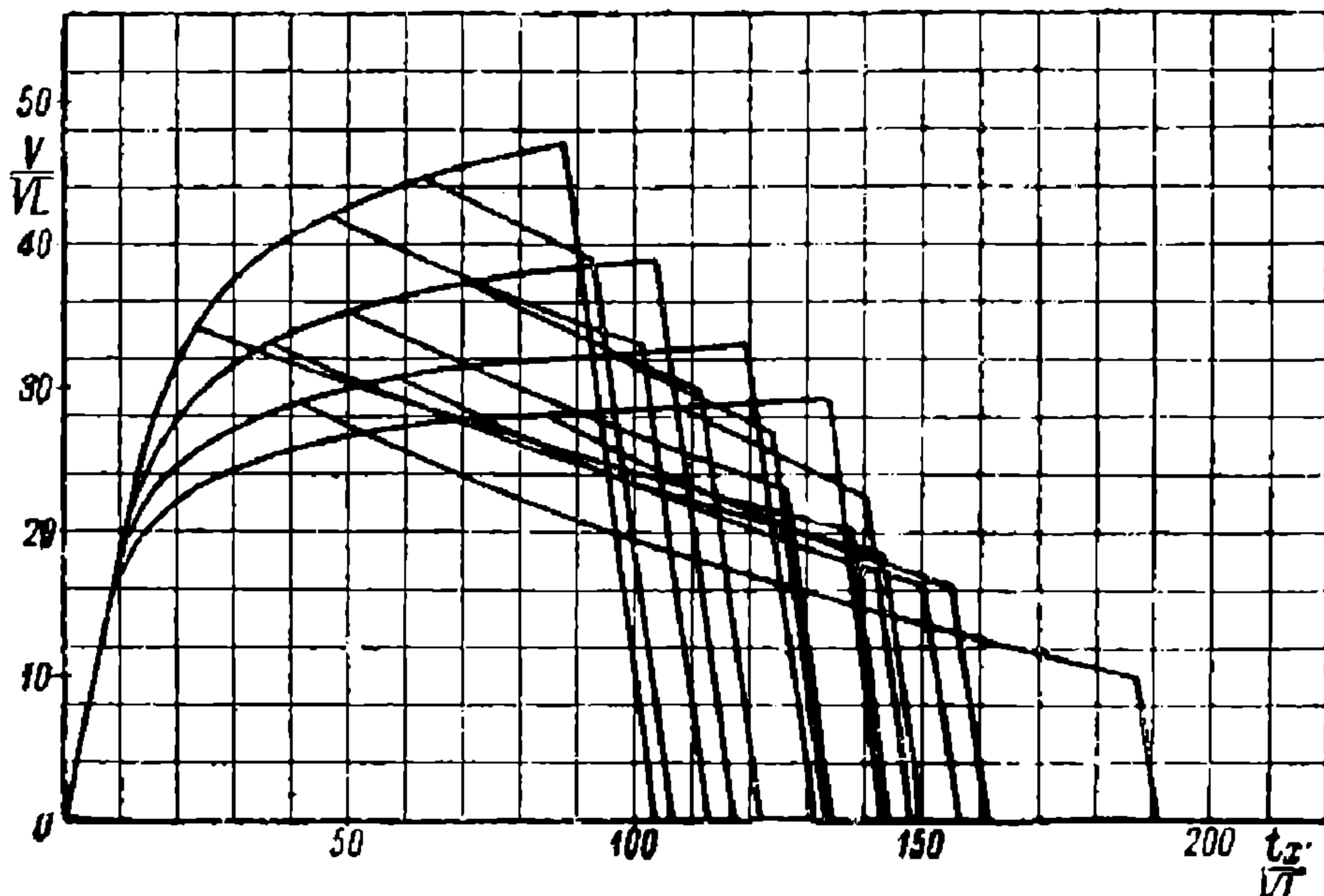


Рис 70

на каждой кривой указана удельная пусковая мощность, к которой кривая относится. Эта пусковая мощность, как и ранее, определялась по формуле (128).

По диаграмме рис. 71 мы можем построить кривую искомого минимума расхода энергии в зависимости от времени хода. Такая кривая изображена на рис. 72. Мы должны особо подчеркнуть, что эта кривая отнюдь не может считаться точной кривой минимальных удельных расходов энергии. Она определяет лишь порядок величины и решает задачу только с той точностью, которая свойственна всем выводам, построенным на принципе подобия диаграмм движения.

Кривые рис. 70, 71 и 72, построенные для перегона длиной в 1 км, легко могут быть приспособлены для определения времен хода, скоростей движения и расходов энергии для перегонов любой длины при

одном и том же начальном ускорении разгона. Применяя формулы (116) и (117) к этому случаю и полагая в них $L' = 1$ км, будем иметь

$$V'' = V' \sqrt{L''}, \quad (146)$$

$$t'' = t' \sqrt{L''} \quad (147)$$

Таким образом для перехода от диаграмм рис. 70, 71 и 72, построенных для длины перегона в 1 км, к любой длине перегона L'' , мы должны помножить скорости и времена хода в перечисленных трех диаграммах на величину $\sqrt{L''}$.

Удельный расход электрической энергии при том же ускорении разгона остается без изменения.

Из изложенного следует, что диаграммы рис. 70, 71 и 72 представляют собою универсальные диаграммы движения, если считать, что вместо скорости по ординатам диаграмм рис. 70 отложена величина $\frac{V}{\sqrt{L}}$, а в качестве абсцисс на всех трех диаграммах принята величина $t_x \sqrt{L}$. Удельная пусковая мощность для любой длины перегона

при данном режиме движения также может быть найдена, если считать, что величины, указанные на рис. 71, представляют собою $\frac{kW_a}{\sqrt{L}}$.

Диаграмма рис. 72 указывает, что уменьшение времени хода или, иначе говоря, повышение скорости сообщения при данной длине перегона может быть достигнуто только путем повышения расхода электрической энергии. Если время хода велико, то уменьшение его может быть сделано без большого повышения затрат на электрическую энергию (см. ветвь BC кривой рис. 72). Если время хода мало, т. е. ско-

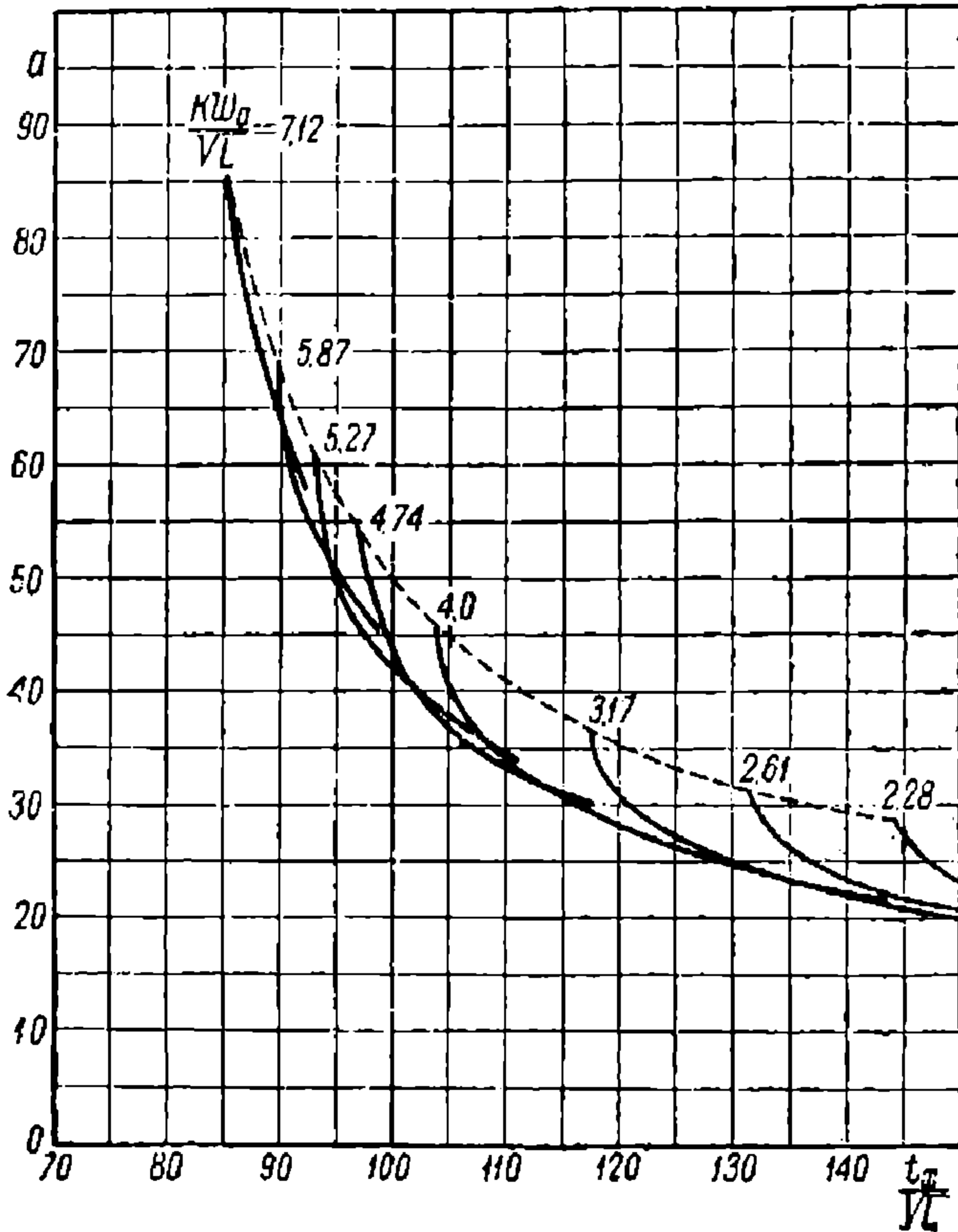


Рис. 71.

ростъ сообщения большая, то дальнейшее ее повышение или дальнейшее снижение времени хода связано с сильным ростом затрат на электрическую энергию (ветвь АВ).

Связь между временем хода и потребной мощностью тягового электродвигателя

Устаповим теперь, какое влияние имеет время хода на потребную мощность тягового электродвигателя. Этот вопрос также приблизительно может быть решен на основе подобия диаграмм движения.

Можно воспользоваться диаграммой рис. 54 эквивалентного нагревающего тока и перестроить ее применительно к перегону длиной в 1 км.

Для того, чтобы тяговый электродвигатель при работе на линии не перегревался, но был хорошо использован, необходимо, чтобы эквивалентный нагревающий ток его был равен продолжительному току. Если приблизительно предположить, что отдача при продолжительном токе для всех двигателей будет всегда одна и та же, то можно считать, что эквивалентный ток будет пропорционален продолжительной мощности. Так как эквивалентный нагревающий ток на диаграмме рис. 54 выражен в процентах от часового тока, то та же кривая рис. 54 даст нам продолжительную мощность в процентах от часовой мощности, если приблизительно принять, что коэффициенты полезного действия двигателей при этих мощностях будут равны.

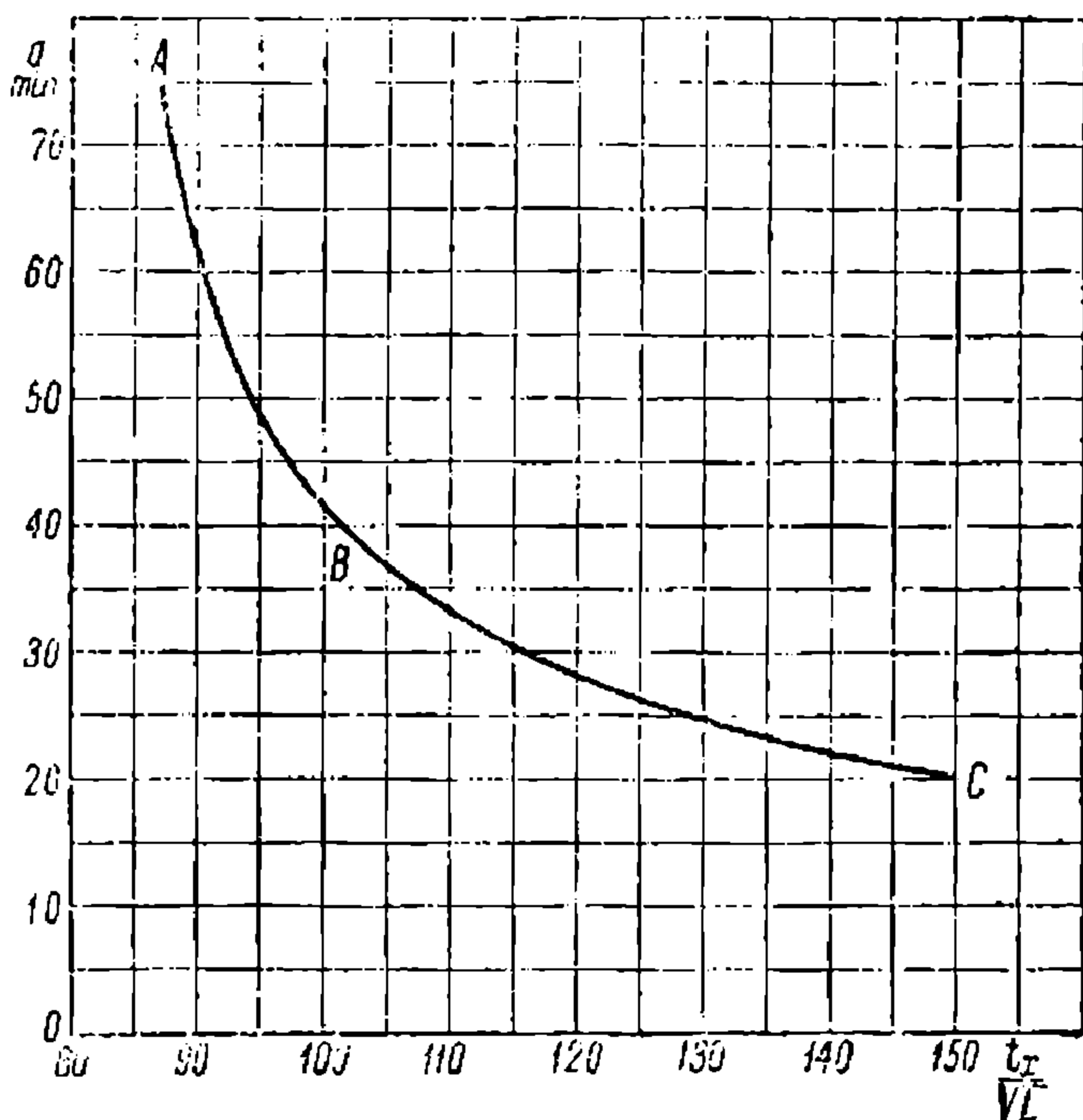


Рис. 72.

Таким образом, перестраивая диаграмму рис. 54 применительно к перегону в 1 км, мы для этого перегона находим зависимость между потребной продолжительной мощностью и временем хода при различных пусковых мощностях. Продолжительная мощность будет выражена в процентах от принятой нами часовой мощности.

Из построенной таким образом диаграммы можно извлечь те режимы движения, которые дают минимум расхода энергии при данном времени хода, и построить зависимость продолжительной мощности, соответствующей этому минимуму, в функции времени пробега перегона. Такая зависимость дана в виде кривой ab на рис. 73.

Абсциссы диаграммы рис. 73 получены из абсцисс диаграммы рис. 54 путем умножения их на величину

$$V \sqrt{\frac{\sigma}{f_{чa}} \frac{L}{l}} = \frac{56}{\sqrt{l}}$$

Для нахождения ординат кривой ab на рис. 73 из диаграммы рис. 54, на основании диаграммы рис. 72, для каждого данного времени хода взяты те j_9 , которые соответствуют режиму движения поезда, дающему минимум расхода энергии. Пусковые удельные мощности, при которых

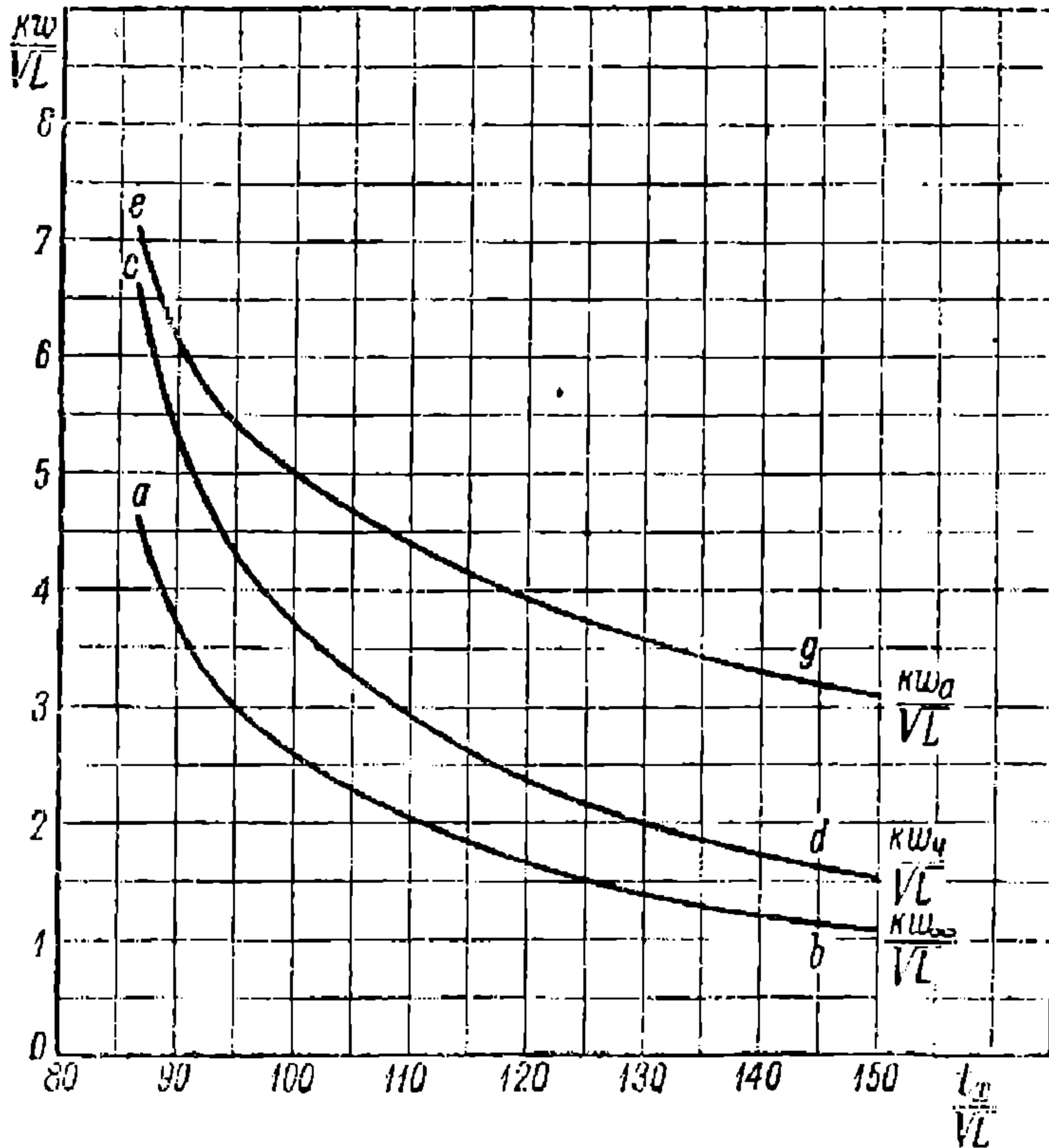


Рис. 73.

этот минимум может быть достигнут, приближенно могут быть выражены кривой eg на рис. 73. Кривая eg построена по данным кривых рис. 71 и 72.

При полном использовании двигателей продолжительная их мощность должна быть равна

$$kW_{\infty} = \frac{EJ_9 \eta}{1000} = \frac{EJ_ч \eta j_9}{1000} \cong j_9 \quad kW_ч. \quad (148)$$

Удельная часовая мощность в свою очередь равна

$$kW_ч = \frac{f_ч V_ч}{367}. \quad (149)$$

Согласно формуле (144) имеем

$$kw_u = \frac{34 \cdot 63,8}{367 \cdot \sqrt{l}} = \frac{5,92}{\sqrt{l}},$$

а следовательно,

$$kw_\infty = \frac{5,92}{\sqrt{l}} \cdot j_3. \quad (150)$$

Таким образом, беря из диаграммы рис. 54 те j_3 , которые соответствуют минимуму расхода энергии, и умножая их на величину $\frac{5,92}{\sqrt{l}}$, мы получаем ординаты кривой ab (рис. 73).

Удельные продолжительные мощности двигателей, даваемые кривой ab рис. 73, могли бы быть приняты только в том случае, если бы машинист точно придерживался предписанной ему нормальной диаграммы движения, а также если бы все двигатели поезда имели равную нагрузку. Так как то и другое обычно не всегда соблюдается, при выборе двигателя необходимо иметь некоторый запас. Он необходим также для возможности пагона опозданий. Следует также помнить, что кривые рис. 70, 72 и 73 построены для поезда пригородной жел. дороги, идущего по прямому горизонтальному пути.

Мы знаем, что между продолжительной и часовой мощностью двигателя существует определенное соотношение. Если считать, что для моторвагонной тяги мы будем применять двигатели с самовентиляцией, можно принять, что $\frac{kW_\infty}{kW_u} = 0,7$. Взяв это соотношение, мы можем при-

ближенно подсчитать потребную для нас часовую мощность двигателей. Деля ординаты кривой ab на 0,7, мы получаем кривую cd на рис. 73. Эта кривая также дает нам мощность двигателя без всякого запаса. Кривые ab и cd построены без учета времени простоя на промежуточных и конечных станциях. Удельные часовые и продолжительные мощности, рассчитанные с учетом этих остановок, согласно формуле (96) будут равны

$$kw' = kw \sqrt{\frac{t_x}{t_3}}, \quad (151)$$

где:

kw' — мощность, подсчитанная для времени t_3 (время хода плюс время стоянки);

kw — мощность, определенная для чистого времени хода t_x .

Сопоставляя полученные нами часовые мощности с принятыми нами пусковыми мощностями, изображенными на диаграмме рис. 73 в виде линии eg , мы приближенно определяем ту перегрузку, которую двигатель должен иметь при разгоде поезда.

Мы видим, что при уменьшении времени хода перегрузка должна быть снижена во избежание перегрева машины. Так как перегрузку двигателя по току не рекомендуется брать выше 75% от часового тока, то для времени хода порядка 130 сек и выше необходимо повысить

часовую мощность двигателя, если мы хотим сохранить минимум расхода энергии. Таким образом, для этих скоростей движения двигатель в отношении нагрева будет не использован. На длинных перегонах не имеет смысла добиваться минимума расхода энергии, так как при этом мы имеем незначительную экономию.

Диаграмма рис. 73, построенная для перегона в 1 км, может служить универсальной диаграммой для движения по площадке, если считать, что по абсциссам ее отложены величины $\frac{t_x}{\sqrt{L}}$, а по ординатам $\frac{kw}{\sqrt{L}}$. Это последнее обстоятельство очевидно из формулы (126) и

прочих формул для определения мощности.

Следует помнить, что полученным нами диаграммам присуща ошибка, свойственная всем выводам, построенным на принципе подобия в тяговых расчетах. Кроме того полученные нами диаграммы дают приближенное решение задачи также потому, что при построении их было предположено, что перегрузки двигателя при пуске составляют 50% от часового тока. Там, где это по условию нагрева или расхода энергии невозможно соблюсти, диаграммы надлежит уточнить, приняв правильную перегрузку.

Аналогичным образом диаграммы могут быть построены для любого среднего подъема и для других ускорений при разгоне.

Выводы Из полученных нами диаграмм следует, что повышение коммерческих скоростей движения (скоростей сообщения) повышает расход электрической энергии на движение поездов и влечет за собою рост мощности тяговых электродвигателей. До известного предела увеличение скоростей не будет сопровождаться возрастанием капиталовложений, так как с увеличением скорости уменьшается потребный инвентарный вагонный парк. Стоимость отдельной поездной единицы может возрасти благодаря увеличению мощности двигателя. До известного предела повышение скорости не будет вызывать также рост эксплуатационных расходов, так как повышение скорости, вызывая увеличение затрат на электрическую энергию, уменьшает затраты на ремонт и содержание подвижного состава и на оплату поездного персонала (см. стр. 14).

Таким образом при данном пассажиропотоке при некоторой коммерческой скорости будет иметь место минимум эксплуатационных расходов. При этой скорости мы можем иметь минимум тарифа на перевозку пассажиров. При некоторой скорости мы получим минимум капиталовложений. В каждом частном случае эти скорости (или времена хода) могут быть найдены.

Нужно иметь в виду, что небольшое увеличение скорости против тех значений, которые дают эти минимумы, в большинстве случаев мало повышает как капиталовложения, так и эксплуатационные расходы. С этим обстоятельством нужно считаться и принимать те скорости, которые не будут обременительны для дороги. Повышение скорости может создать новые кадры пассажиров, вызывая заселение обслуживаемых дорогой или трамваем районов благодаря лучшей связи их с местом работы населения.

При очень больших скоростях рост расхода энергии и мощности двигателей становится чрезмерным, как это мы видим из диаграммы. Если все же потребность в таких скоростях имеется, следует искать решения вопроса либо в повышении ускорений (путем перехода на двухвагонные или одновагонные поездные единицы), либо путем введения зонных поездов или поездов-скорыходов, не останавливающихся на всех станциях и имеющих большую длину перегона.

Таким образом в каждом частном случае на основе предварительных соображений вопрос о выборе целесообразного времени хода по типовому перегону может быть решен. Установив время хода, можно окончательно выбрать тяговый двигатель так, как это изложено в предыдущей главе.

НЕ
УДУНТ
(ДИТ)

Л и т е р а т у р а

1. Б. Б. Г а р т е и ш т е й н. Нормальные типы моторов для русских трамваев. Труды Постоянного бюро всероссийских трамвайных съездов. Выпуск I. 1923.
 2. А. Б. Лебедев. Расчеты элементов электрич. жел. дорог. Ленинград. 1930.
 3. Д. К. М и н о в. Расчет нагревания тягового электродвигателя. Электрификация жел. дор. транспорта. 1932, № 5 - 6.
 4. М. Д. Н а х о д к и н. Выбор тягового электродвигателя. Изд. Московского электромеханического института инженеров транспорта 1932.
 5. B e t h g e. Der Zeitrückhalt bei städtischen Schnell- und strassenbahnen, seine Bedeutung für den Betrieb sowie für den Stromverbrauch usw. Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen. 1918, H. 5.
-

ПРИНЯТЫЕ В КНИГЕ ГЛАВНЕЙШИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Латинский алфавит

- A — полный расход энергии на движение поезда.
 Δ — коэффициент теплоотдачи двигателя.
 a — удельный расход энергии на движение поезда в ваттчасах на тоннокилометр.
 b — удельная тормозная сила.
 C — теплоемкость.
 $D_{\text{к}}$ — диаметр колеса.
 E — напряжение в вольтах.
 F — полная сила тяги двигателя или поезда.
 $F_{\text{г}}$ — сила тяги поезда, реализуемая при разгоне под реостатами.
 f — удельная сила тяги в кг/т.
 $f_{\text{г}}$ — удельная сила тяги при разгоне под реостатами.
 $f_{\text{ч}}$ — часовая удельная сила тяги.
 J — сила тока поезда.
 $J_{\text{ч}}$ — часовая сила тока поезда.
 J_{∞} — продолжительная сила тока поезда.
 $J_{\text{р}}$ — сила тока поезда, эквивалентная по нагреву двигателям.
 I — сила тока двигателя.
 i — подъем в тысячных.
 i_0 — руководящий подъем.
 $i_{\text{с}}$ — продольный подъем на станционных площадках.
 i — сила тока в универсальных диаграммах.
 L — длина перегона или участка пути.
 l — длина перегона в универсальных диаграммах движения.
 M — вращающий момент на валу двигателя.
 m — число двигателей в моторном вагоне или электровозе.
 n — число оборотов ротора двигателя в минуту.
 n — число остановочных пунктов на 1 км пути.
 P — полный вес электровоза или моторного вагона.
 $P_{\text{с}}$ — средний вес электровоза.
 $P_{\text{д}}$ — часть веса электровоза, передаваемая через поддерживающие оси.
 Q — вес прицепной части поезда.
 q — вес одного вагона брутто.
 s — длина пути.
 T — постоянная времени в уравнении нагрева.
 t — время.
 $t_{\text{х}}$ — время хода.
 $t_{\text{с}}$ — время поевдки.
 t_0 — время стоянки на станции.
 u_1 — ускорение при разгоне поезда под реостатами.
 u_2 — замедление при торможении.
 V — скорость движения поезда.
 $V_{\text{т}}$ — техническая скорость.
 $V_{\text{к}}$ — коммерческая скорость (скорость сообщения).
 $V_{\text{а}}$ — скорость в момент выхода на автоматическую характеристику.
 $V_{\text{б}}$ — скорость в момент начала торможения.
 $V_{\text{ч}}$ — скорость поезда при часовой мощности двигателя.

ПРИНЯТЫЕ В КНИГЕ ГЛАВНЕЙШИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Латинский алфавит

- A — полный расход энергии на движение поезда.
 A — коэффициент теплоотдачи двигателя.
 a — удельный расход энергии на движение поезда в ваттчасах на тонпокилометр.
 b — удельная тормозная сила.
 C — теплоемкость.
 D_w — диаметр колеса.
 E — напряжение в вольтах.
 F — полная сила тяги двигателя или поезда.
 F_a — сила тяги поезда, реализуемая при разгоне под реостатами.
 f — удельная сила тяги в кг/т.
 f_a — удельная сила тяги при разгоне под реостатами,
 $f_{\text{ч}}$ — часовая удельная сила тяги.
 J — сила тока поезда.
 $J_{\text{ч}}$ — часовая сила тока поезда.
 J_{∞} — продолжительная сила тока поезда.
 J_p — сила тока поезда, эквивалентная по нагреву двигателям.
 I — сила тока двигателя.
 i — подъем в тысячных.
 i_0 — руководящий подъем.
 i_c — предельный подъем на станционных площадках.
 j — сила тока в универсальных диаграммах.
 L — длина перегона или участка пути.
 l — длина перегона в универсальных диаграммах движения.
 M — вращающий момент на валу двигателя.
 m — число двигателей в моторном вагоне или электровозе.
 n — число оборотов ротора двигателя в минуту.
 n — число остановочных пунктов на 1 км пути.
 P — полный вес электровоза или моторного вагона,
 P_c — сцепной вес электровоза.
 P_p — часть веса электровоза, передаваемая через поддерживающие оси.
 Q — вес прицепной части поезда.
 q — вес одного вагона брутто.
 s — длина пути.
 T — постоянная времени в уравнении нагрева.
 t — время.
 t_x — время хода.
 t_k — время поездки.
 t_0 — время стоянки на станции.
 u_1 — ускорение при разгоне поезда под реостатами.
 u_2 — замедление при торможении.
 V — скорость движения поезда.
 V_x — техническая скорость.
 V_k — коммерческая скорость (скорость сообщения).
 V_a — скорость в момент выхода на автоматическую характеристику.
 V_b — скорость в момент начала торможения.
 $V_{\text{ч}}$ — скорость поезда при часовой мощности двигателя.

- v — скорость в универсальных диаграммах движения.
 W_a — потери в активных частях двигателя.
 W — полное сопротивление движению поезда.
 w_0' — основное удельное сопротивление движению электровоза или моторного вагона.
 w_0'' — основное удельное сопротивление движению прицепной части поезда.
 w_m — удельное сопротивление движению машины.

Греческий алфавит

- α — коэффициент, согласующий размерности в уравнении $\frac{ds}{dt} = \alpha V$
 γ — коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся масс поезда,
 η — коэффициент полезного действия двигателя на ободу сцепных колес.
 η_c — среднее значение коэффициента полезного действия двигателя для тех пределов нагрузки, которым он подвергается на линии.
 η_n — коэффициент полезного действия передачи от вала двигателя сцепным осям.
 λ — длина пути в универсальных диаграммах движения.
 μ — передаточное число зубчатого механизма.
 τ — превышение температуры (сверхтемпература) обмоток двигателя.
 τ — время в универсальных диаграммах движения.
 ν — коэффициент сцепления.

Русский алфавит

- Π — давление оси на рельс.
 ϕ — сила тяги в универсальных характеристиках.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Стр.

Предисловие

3

Г л а в а I

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ПЪЕЗДА ПРИ ЗАДАННОМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ЕГО ОБОРУДОВАНИИ

1. Выбор скорости движения поезда при данном замедлении торможения	7
Влияние скорости движения на расход электрической энергии	8
Влияние скорости движения на нагрев тягового электродвигателя	13
Влияние скорости движения на капитальные вложения и эксплуатационные расходы	14
Значение скорости движения для пассажиров	15
2. Выбор замедления при торможении поезда у остановочного пункта	17
3. Влияние шунтировки обмотки возбуждения	19
Шунтировка для ослабления магнитного потока	19
Усиление потока двигателя при разгоне	22
Влияние ослабления поля на нагрев тягового электродвигателя	25

Г л а в а II

ВЫБОР ПУСКОВОГО ТОКА И ПЕРЕДАТОЧНОГО ЧИСЛА ЗУБЧАТОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ ДАННОГО ДВИГАТЕЛЯ

1. Выбор пускового тока при заданной зубчатой передаче	32
2. Выбор передаточного числа зубчатого механизма при данной пусковой мощности двигателя	37
3. Выбор пусковой мощности при данном начальном ускорении разгона поезда	46
4. Совместный выбор передачи и пускового тока для данного двигателя	49
5. Выбор передачи и пускового тока для длинных перегонов	53

Г л а в а III

ПРИНЦИП ПОДОБИЯ В ТЯГОВЫХ РАСЧЕТАХ

Практическое значение принципа подобия для тяговых расчетов	66
Универсальная тяговая характеристика моторного вагона	67
Диаграмма универсальной удельной ускоряющей силы тяги	68
Единица ускорения в универсальных диаграммах движения	70
Зависимость скорости от времени в универсальных диаграммах	70

125

НБ
УДУНТ
(ДИТ)

	Стр.
Универсальная диаграмма скорости в функции пути .	73
Универсальная диаграмма силы тока в функции времени .	74
Подсчет расхода тока по универсальным диаграммам движения	74
Определение расхода энергии по универсальным диаграммам движения	75
Проверка двигателей на нагревание по универсальным диаграммам	76
Итоги выводов о подобии диаграмм движения	78
Применение универсальных диаграмм движения для выбора целесообразного режима движения поезда	79
Построение универсальных диаграмм движения для различных соотношений $\frac{V_{max}}{V_a}$	80
Примеры практического применения универсальных диаграмм движения	80
Применение диаграмм движения, построенных ранее	86
Точность выводов на основании универсальных диаграмм движения	89

Г л а в а IV

ВЫБОР ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЗАДАННОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

1. Наименьшая пусковая мощность для заданного времени пробега при данном ускорении разгона и замедлении торможения	92
2. Наибольшая пусковая мощность для заданного времени пробега перегона при данном ускорении разгона и замедлении торможения	93
3. Определение максимума и минимума пусковых мощностей по принципу подобия диаграмм движения	94
4. Предварительный выбор целесообразной пусковой мощности	98
5. Предварительный выбор тягового электродвигателя по наимыгоднейшей пусковой мощности	99
6. Метод окончательного выбора тягового электродвигателя при заданном времени хода	102
Выбор пусковой мощности с точки зрения расхода энергии	102
Проверка двигателя на нагревание и выбор часовой мощности	103
Случай, когда намеченный двигатель дает перегрев	104
Случай, когда намеченный двигатель нагревается до предельной допустимой температуры	104
Случай, когда намеченный двигатель не использован в отношении нагрева	104
Анализ пригодности двигателя по кривым остаточной силы тяги	105
Какие варианты двигателей должны быть рассмотрены	107
7. Особенности выбора тягового электродвигателя для электровозной тяги	108

Г л а в а V

ВЫБОР ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В СВЯЗИ С ВЫБОРОМ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА

Физический минимум времени хода на данном перегоне	112
Связь между временем хода и потребной пусковой мощностью	112
Связь между временем хода и расходом электрической энергии	114
Связь между временем хода и потребной мощностью тягового электродвигателя	117
Выводы	120
Литература	122
Принятые в книге главные обозначения	123

НБ
УДУНТ
(ДПТ)

Рецензент проф. С. И. КУРБАТОВ, Редактор А. ФОМИН, Техредактор В. ЧЕРНЯКОВА.
Уполн. главлита ц 80217 ЖДИЗ 736 ж Зак. 9399 Тираж 5180 Разм. бум. 62×94¹/₄, 8 л. л. 51408
вн. в п. л. Сдано в набор 27/III—34 г. Подписано к печати 10/VI—34 г.

5-я типография «Пролетарское слово» Трансжелдорпята, Москва, Каланчевский тупик, д. 3/5.

НБ
УДУНТ
(ДИТ)

Цена 2 руб.
переплет 50 коп.

И з д а н и я
Трансжелдориздата
продаются в магазинах
Книгообъединения
ОГИЗа
Единичные экземпляры
высылают наложенным
платежом
„Книга-почтой“
Москва, 54.

Сканировала Брюховецкая Е.А.

НБ
УДУНТ
(ДИПТ)