А.А. Астахов

ТЕОРИЯ ЛОКОМОТИВНОЙ ТЯГИ

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ..... 8 Тема 1
СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ПОЕЗД, ОБРАЗОВАНИЕ СИЛЫ ТЯГИ 9
1.1. Характеристика сил, действующих на поезд 9
1.2. Образование силы тяги 10
1.3. Касательная сила тяги 11
1.4. Факторы, влияющие на реализацию сил сцепления колес с рельсами 13
1.5. Повышение использования тяговых свойств локомотивов 16
1.6. Расчетный коэффициент сцепления 17
Тема 2
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ТЯГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА 18
2.1. Электромеханические характеристики на валу тягового электродвигателя постоянного тока 18
2.2. Электромеханические характеристики тягового электродвигателя, отнесенные к ободам колес 23
2.3. Пересчет характеристик при изменении передаточного отношения редуктора и диаметров колесных пар 27
2.4. Сравнение характеристик при различных способах возбуждения тяговых электродвигателей 29
2.5. Выбор характеристик электродвигателей для тяги поездов ..... 31 2.6. Тяговые и удельные тяговые характеристики электроподвижного состава ..... 40 **Тема 3.**
РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА 43
3.1. Способы регулирования скорости движения 43
3.2. Характеристики при изменении напряжения на тяговых электродвигателях ... 45
3.3. Характеристики при регулировании возбуждения 47
3.4. Процесс изменения скорости движения при скачкообразном изменении напряжения и включении ступени ослабления возбуждения 52
3.5. Пуск и разгон электроподвижного состава 54
3.6. Расчет ступеней пускового реостата и построение пусковой диаграммы 56
3.7. Коэффициент пусковых потерь 61
3.8. Понятие об импульсном регулировании напряжения 64
3.9. Электромеханические и тяговые характеристики при различных уровнях напряжения и регулировании возбуждения 66
Тема 4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА 72
4.1. Особенности электрической тяги на переменном токе 72
4.2. Внешние характеристики преобразовательной установки 73
4.3. Характеристики тяговых электродвигателей с учетом внешней характеристики преобразовательной установки 78

4.4. Регулирование скорости движения при ступенчатом регулировании напряжения ……... 80
4.5. Плавное регулирование напряжения ……...… 84
4.6. Характеристики электроподвижного состава со статическими преобразователями ……..... 86
Тема 5 ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВОЗОВ ……..… 93
5.1. Особенности тяговых свойств ……..…… 93
5.2. Сила тяги тепловоза по дизелю ……..... 95
5.3. Сила тяги в зависимости от типа передачи ……..... 99
5.4. Внешние характеристики главных генераторов …… 102
5.5. Тяговые характеристики и их ограничения …….. 106
Тема 6
СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПОЕЗДА …….. 111
6.1. Силы основного сопротивления движению поезда ……... 111
6.2. Формулы для расчета сил основного удельного сопротивления движению… 116
6.3. Основное удельное сопротивление движению поезда …….. 119
6.4. Дополнительное сопротивление движению …….. 120
6.5. Общее сопротивление движению поезда ……... 125
6.6. Мероприятия по снижению сил сопротивления движению поезда …….. 125
Тема 7
ТОРМОЗНЫЕ СИЛЫ ПОЕЗДА …….. 126
7.1. Общие сведения …….. 126
7.2. Образование тормозной силы при механическом торможении поезда и её ограничение ……... 127
7.3. Расчет тормозных сил поезда …… 131 7.4. Действие тормозных сил в длинносоставных поездах повышенной массы … 138
7.5. Общие сведения об электрическом торможении …….. 139
7.6. Характеристики реостатного торможения …… 140
7.7. Характеристики рекуперативного торможения …… 148
Тема 5
УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА 196
8.1. Условия движения поезда 196
8.2. Уравнение движения поезда и его анализ 197
8.3. Общие принципы решения уравнения движения поезда 203
8.4. Спрямление и приведение профиля пути 205
8.5. Аналитический метод решения уравнения движения поезда 213
8.6. Графический метод решения уравнения движения поезда 217
8.7. Практические приемы построения кривых скорости и времени в функции пути 222
8.8. Определение времени хода методом установившихся скоростей 231
Тема 9

РАСЧЕТ МАССЫ ПОЕЗДА 191
9.1. Общие сведения 191
9.2. Методы расчета массы состава 193
9.3. Проверка массы поезда по условиям трогания поезда с места 196
9.4. Проверка массы состава по длине станционных путей 197
9.5. Принципы установления норм массы поездов 198
9.6. Особенности расчетов при работе поездов повышенной длин и массы 200
Тема 10
ТОРМОЖЕНИЕ ПОЕЗДОВ И ТОРМОЗНЫЕ ЗАДАЧИ 201
10.1. Принципы тормозных расчетов 201
10.2. Тормозные задачи и методы и решения 203
10.3. Тормозные расчеты с помощью номограмм ..... 208 **Тема 11**
ТОКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КРИВЫЕ ТОКА 212
11.1. Токовые характеристики электроподвижного состава постоянного тока 212
11.2. Токовые характеристики электроподвижного состава переменного тока 216
11.3. Построение кривых тока электроподвижного состава 223
11.4. Кривые тока тяговых электрических машин тепловозов ..... 225 **Тема 12**
НАГРЕВАНИЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ГЕНЕРАТОРОВ 228
12.1. Общие сведения 228
12.2. Аналитический метод расчета нагревания электрических машин 230
12.3. Другие методы расчета нагревания электрических машин 237
Тема 13
РАСХОД ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ТОПЛИВА 240
13.1. Факторы, влияющие на расход электрической энергии и топлива 240
13.2. Определение расхода электрической энергии на движение поезда графоаналитическим методом 242
13.3. Графический метод определения расхода электроэнергии 244
13.4. Аналитический метод определения расхода электрической энергии 246
13.5. Полный и удельный расход электрической энергии 248
13.6. Взаимодействие электроподвижного состава и системы электроснабжения 250
13.7. Определение расхода топлива тепловозами и дизель-поездами 252
13.8. Техническое нормирование расхода электрической энергии и топлива 255
13.9. Способы уменьшения электрической энергии и топлива ..... 257 **Тема 14**
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ 263
14.1. Общие сведения 263
14.2. Характеристики тягового подвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями 266
14.3. Характеристики электроподвижного состава с вентильными тяговыми двигателями 271

Тема 15 ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ 275
15.1. Общие сведения 275
15.2. Информация, необходимая для тяговых расчетов 276
15.3. Порядок расчета на ЭВМ 278

Тема 16
ОПЫТНЫЕ ПОЕЗДКИ И ИСПЫТАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ 281
16.1. Испытания тяговых электродвигателей и генераторов 281
16.2. Испытания локомотивов ..... 286 16.3. Опытные поездки при тягово-эксплуатационных испытаниях локомотивов 291

Тема 17
РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА 292
17.1. Условия эксплуатации подвижного состава 292
17.2. Испытания локомотивов 295
17.3. Тягово-экономические расчеты 301
17.4. Автоматизация управления подвижным составом 303

Приложение 1
ПРИМЕР ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПОСТОЯННОГО ТОКА 308

Приложение 2
ПРИМЕР ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА 322

Приложение 3
ПРИМЕР ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ТЕПЛОВОЗА 331
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 340

ВВЕДЕНИЕ

Теория тяги, наука о тяге поездов изучающая комплекс вопросов, связанных с теорией механического движения поезда, рационального использования локомотивов и экономичного расходования электрической энергии и топлива.

В нашей стране практически все перевозки на железнодорожном транспорте осуществляются в основном электроподвижным составом (электровозами и электропоездами), а также тепловозами и дизель-поездами.

Теория электрической и тепловозной тяги позволяет решать широкий круг практических вопросов эффективной эксплуатации железных дорог, рассчитывать основные параметры вновь проектируемых линий, участков, переводимых на новые виды тяги, намечать основные требования к вновь разрабатываемым локомотивам — электровозам и тепловозам, моторвагонному подвижному составу – электро- и дизель-поездам, а также к вагонам. С их помощью определяют силы, действующие на поезд, оценивают их влияние на характер движения, определяют оптимальную массу состава при выбранной серии локомотива. Теория тяги позволяет рассчитывать скорости движения в любой точке пути с учетом безопасности движения поездов и времена хода по каждому перегону и участку, определять расход электрической энергии или топлива и проверять использование мощности локомотива.

На основании перечисленных данных составляют график движения поездов, определяют пропускную и провозную способность дорог и рассчитывают эксплуатационные показатели локомотивного хозяйства.

На действующих линиях теория позволяет найти рациональные режимы вождения поездов на различных участках и наиболее экономичные условия эксплуатации локомотивов. При разработке проектов электрификации дорог определяют токи, потребляемые электроподвижным составом в различных точках пути, пользуясь теорией электрической тяги. На их основании рассчитывают систему энергоснабжения.

Теория тяги поездов позволяет найти скрытые резервы при электрификации линий, развитии провозной и пропускной способности действующих дорог, эффективнее использовать локомотивы на каждом участке, экономно расходуя электрическую энергию и топливо. На наиболее напряженных направлениях железных дорог используют электрическую тягу, обладающую более высокой пропускной и провозной способностью участков.

Теория тяги поездов начала развиваться еще в прошлом столетии. Профессором Н.П. Петровым в те времена были проведены исследования сопротивления движению подвижного состава, непрерывных тормозных систем и

разработана гидродинамическая теория трения, сохранившая свое значение до наших дней. Эти исследования он подтвердил опытной проверкой и показал пути уменьшения вредных сопротивлений движению на железнодорожном транспорте. В то же время другой русский ученый — профессор А.П. Бородин создал первую лабораторию для опытных исследований работы паровозов. В начале нашего века профессор Ю.В. Ломоносов начал разработку теории тяги поездов. В дальнейшем теоретические и экспериментальные исследования в тяге поездов проводили профессора В.Ф. Егорченко, А.М. Бабичков и другие ученые.

Профессора А.В. Вульф, А.Б. Лебедев, В.А. Шевалин и другие разработали основы теории электрической тяги, методы расчета узлов электроподвижного состава, системы энергоснабжения и ряд вопросов, связанных с электрификацией дорог.

В 1929 г. был электрифицирован первый в нашей стране участок Москва — Мытищи для пригородного движения на электропоездах, а в 1932 г. электрическая тяга начала применяться на наиболее тяжелых участках магистральных железных дорог. С пятидесятых годов перешли от электрификации отдельных участков до перевода на электрическую тягу целых направлений железных дорог.

Разработкой теории тепловозной тяги занимались профессора В.И. Гриневецкий, Я.М. Гаккель, А.И. Шелест и другие. В 1924 г. был построен первый магистральный тепловоз с электрической передачей конструкции профессора Я.М. Гаккеля.

В 1918 г. в нашей стране был создан Научно-экспериментальный институт путей сообщения (впоследствии его преобразовали во Всесоюзный научноисследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), ученые и специалисты которого занимаются исследованием вопросов тяги поездов, испытывают новые серии локомотивов, изучают сопротивление движению подвижного состава, совершенствуют тормозные средства поездов. Одновременно большие исследования по повышению эффективности новых видов тяги и созданию новых локомотивов проводят коллективы научно-исследовательских институтов, а также ВУЗы железнодорожного транспорта.

В конце 20 века на электрической тяге работали линии протяженностью около 40 тыс. км, что составляет 45 % от длины железных дорог РФ. На этих линиях выполнено более 75 % грузооборота железнодорожного транспорта. Остальные дороги работают на тепловозной тяге.

При выполнении расчетов, связанных с тягой поездов, пользуются Правилами тяговых расчетов для поездной работы (ПТР), являющимися основным официальным документом, утвержденным Министерством путей сообщения. В них приведены методы и порядок проведения расчетов, расчетные формулы и

нормативы, которыми руководствуются при выполнении расчетов. Эти расчеты требуют больших затрат времени.

Тема 1

1. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ПОЕЗД. ОБРАЗОВАНИЕ СИЛЫ ТЯГИ

1.1. Характеристика сил, действующих на поезд

В процессе движения поезда на него действуют различные внутренние и внешние силы. Как известно из механики, внутренние силы уравновешиваются внутри системы и не влияют на ее движение. На характер поступательного движения системы влияют только внешние силы или их составляющие, направленные по ходу движения или в противоположную сторону.

Такими внешними силами, действующими на механическую систему – поезд, являются сила тяги F_K, развиваемая локомотивом, тормозная сила $B_т$, возникающая при включении тормозов, и силы сопротивления движению W, к которым относят все остальные внешние силы.

Силу тяги и тормозные силы называют ***управляемыми,*** так как их может регулировать машинист. На силы сопротивления движению машинист воздействовать не может, поэтому их называют ***неуправляемыми.***

Сила тяги направлена по движению поезда, тормозная сила действует в противоположном направлении. Силы сопротивления, как правило, также действуют против движения. Исключение составляет случай движения по спуску, который будет более подробно рассмотрен в соответствующем разделе.

По законам механики несколько сил, действующих на точку или механическую систему, можно заменить одной равнодействующей силой, которую в теории тяги поездов называют ***ускоряющей силой*** F:

$$F_У = F_K – W – B_Т. \quad (1.1)$$

Одновременно три составляющие ускоряющей силы на поезд не действуют, так как обычно не имеет смысла тянуть локомотивом заторможенный поезд. В зависимости от того, какие силы действуют в данный момент на поезд, различают следующие режимы движения:

режим тяги, когда действуют сила тяги F_K и силы сопротивления движению W: $F' = F_K – W$; ***режим выбега*** при отсутствии сил тяги и торможения, когда на поезд дейст-

вуют только силы сопротивления движению: $F_У = – W$; ***режим торможения,*** когда к силам сопротивления движению прибавляется

тормозная сила $B_Т$: $F_У = – (W + B_Т)$.

Ускоряющую силу, имеющую отрицательное значение, называют ***замедляющей силой.***

Для упрощения расчетов удобнее использовать удельные значения сил, равные силам в ньютонах, отнесенным к весу поезда в килоньютонах. Вес поезда в международной системе единиц (СИ) определяют как произведение массы m, в тоннах, на ускорение под действием силы тяжести g = 9,81 м/с^2. Удельная сила тяги f_K, удельные силы сопротивления движению w, удельная тормозная сила b_T и удельная ускоряющая сила $\mathbf{f_У}$ (Н/кН) рассчитываются по следующим формулам: F^{K}; $w = W$; $b_T = B^{T}$; $f_У = F^{У}$.

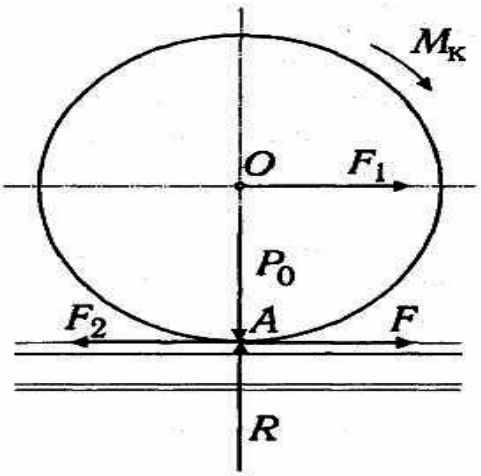


Рис. 1.1. Схема образования силы тяги

$$f_K = \frac{mg}{mg} = \frac{mg}{mg} \quad (1.2)$$

Разделив в уравнении (1.1) левую и правую части на вес поезда, получим: $f_У = f_K = w = b_T$. (1.3)

При изучении влияния действующих сил на движение поезда его представляют в виде материальной точки, в которой сосредоточена вся его масса. Такая замена упрощает решение задач, связанных с характером движения поезда, не вносит большую погрешность в расчеты. В том же случае, когда рассматривают силы поезда как механической системы, а не материальной точки, все перечисленные силы относят к ободам колесных пар и прикладывают в точке касания колес с рельсами.

1.2. Образование силы тяги

При прохождении тока по обмоткам тяговых электродвигателей на электроподвижном составе и тепловозах с электрической передачей возникает вращающий момент за счет взаимодействия тока в проводниках обмотки якоря с магнитным потоком, создаваемым катушками главных полюсов. Он передается на колесную пару через зубчатую передачу (редуктор). Однако одного вращающего момента недостаточно для создания силы тяги. Возникающие при этом силы являются внутренними относительно поезда и не могут вызвать его поступательного движения.

Так, если колесную пару приподнять над рельсами, то ее вращение не приведет к движению поезда. Для начала поступательного движения необходимо за счет действия внутренних сил вызвать внешние силы за счет сцепления колес с рельсами. На рис. 1.1 показано колесо, к которому приложен вращающий момент $M_к$, действующий по часовой стрелке. Оно прижато к рельсу с силой $P_о$.

Вращающий момент $M_к$ можно заменить парой сил F_1, F_2. Сила F_l приложена к центру колеса О, а сила F_2 – в точке **А** его касания с рельсом. Под действием сил

F_2 и P_o возникают равные им и противоположно направленные реакции со стороны рельса, обозначенные силами F и R, которые являются внешними относительно поезда. Сила R направлена перпендикулярно направлению движения и не влияет на его характер. Сила реакции рельса F, направленная по движению поезда и возникшая под действием вращающего момента и сцепления колеса с рельсом, является силой тяги. За счет сцепления колеса с рельсом возникает необходимый упор, отталкиваясь от которого колесо начинает движение. Поскольку в точке **А** колесо за счет сил сцепления не перемещается, под действием силы F_1 оно начинает поворачиваться относительно точки **А** — мгновенного центра вращения. Так как мгновенный центр вращения при этом перемещается по поверхности головки рельса слева направо, центр колеса (точка **О**) поступательно движется в этом же направлении.

1.3. Касательная сила тяги и ее ограничение

Рассмотренные процессы можно распространить на колесную пару. Сила $\mathbf{F_{КД}}$, действующая на оба колеса колесной пары, является ***касательной силой тяги движущей колесной пары.*** Сумму сил $F_{КД}$ всех движущихся колесных пар называют ***касательной силой тяги локомотива*** $F_К$ или просто ***силой тяги локомотива.***

При испытаниях локомотивов силу тяги измеряют на автосцепных приборах. Эта сила тяги F_a при постоянной скорости движения равна касательной силе тяги за вычетом силы сопротивления движению локомотива $W_К$. В случае увеличения скорости необходимо дополнительно вычесть часть силы тяги $F_{КЭ}$, затрачиваемую на увеличение запаса кинетической энергии локомотива, а при снижении скорости — прибавить такую силу. Следовательно, в общем случае:

$$F_a = F_К - W_К - F_{КЭ}. \qquad (1.4)$$

Эту формулу обычно используют для определения силы тяги на автосцепных приборах по известной касательной силе тяги при неизменной скорости движения ($F_{КЭ}$ = 0) и известном сопротивлении движению локомотива или при тех же условиях — для определения касательной силы тяги по измеренной силе тяги на автосцепке.

Чтобы увеличить касательную силу тяги F, нужно создать больший вращающий момент на колесной паре, а следовательно, и большую силу F_2 (см. рис. 1.1).

Однако силу F_2 можно увеличивать только до предельного значения силы сцепления:

$$F_2 = F = F_{СЦ}.$$

Если F_2 превысит $F_{СЦ}$, то колесо начнет проскальзывать относительно рельса — боксовать. Отношение наибольшей силы тяги или силы сцепления к нагрузке

от колесной пары на рельсы называют ***коэффициентом сцепления одной колесной пары (оси)*** ψ_0**:**

$$\psi_0 = \frac{F_{СЦ}}{1000 m_{Л0} g}, \quad (1.5)$$

где $F_{СЦ}$ – наибольшая сила тяги колесной пары или сила сцепления; $m_{Л0}g$ – нагрузка от колесной пары на рельсы, определяемая как произведение массы, приходящейся на одну колесную пару локомотива и ускорения свободного падения g = 9,81 м/с^2;

1000 – переводной коэффициент кН в Н.

При неизменной нагрузке от колесной пары на рельсы коэффициент сцепления ψ_0 характеризует силу сцепления, а следовательно, и наибольшую силу тяги. В случае возникновения боксования сила F снижается, так как сила трения колес о рельсы меньше силы сцепления, которую можно представить как силу трения покоя при скорости скольжения, равной нулю. Боксование колесной пары – вредное явление. Оно вызывает повышенный износ колес и рельсов. При значительном увеличении частоты вращения колесной пары возможно повреждение связанного с ней тягового электродвигателя.

Силу тяги всего локомотива, F_K реализуемую без боксования, определяют как сумму сил тяги, развиваемых каждой колесной парой. Однако обычно одна или несколько колесных пар находятся в наиболее неблагоприятных условиях по сцеплению и начинают боксовать раньше, чем будут реализованы наибольшие силы тяги остальными колесными парами локомотива. Это связано с перераспределением нагрузки от колесных пар на рельсы, расхождением характеристик тяговых электродвигателей, диаметров бандажей и т.д. В результате наибольшая сила тяги локомотива оказывается меньше суммы наибольших сил тяги, развиваемых каждой колесной парой, и ограничивается той из них, которая имеет пониженную силу сцепления.

Поэтому ***коэффициент сцепления локомотива*** ψ, равный отношению наибольшей силы тяги F_K к сцепному весу локомотива $m_Л g$, меньше коэффициента сцепления одной колесной пары ψ_0. ***Сцепным весом*** называют вес, приходящийся на сцепные колесные пары, т.е. колесные пары, связанные с тяговым электродвигателем.

Нужно отметить, что современные электровозы и тепловозы имеют только сцепные (движущие) колесные пары (бегунковых осей нет), поэтому их сцепной вес равен общему весу локомотива.

Чтобы колесные пары локомотива работали без боксования, должно быть выдержано условие:

$$F_K \leq 1000 m_Л g \varphi, \quad (1.6)$$

где F_K – касательная сила тяги локомотива;

$m_Л g$ – сцепной вес локомотива.

Из формулы (1.6) видно, что при постоянном весе $m_Л g$ коэффициент сцепления φ характеризует наибольшую силу тяги локомотива. Его используют для оценки наибольшей силы тяги локомотива по сцеплению. Зная коэффициент сцепления локомотива, можно определить его наибольшую силу тяги.

1.4. Факторы, влияющие на реализацию сил сцепления колес с рельсами

Разберем, от каких параметров зависит коэффициент сцепления и как можно его увеличить.

Состояние поверхностей колес и рельсов. При чистых и сухих поверхностях достигается наибольший коэффициент сцепления колесной пары и локомотива. Образование в месте контакта колеса и рельса масляных, глинистых, торфяных и им подобных пленок, а также загрязненных снега и льда приводит к резкому снижению коэффициента сцепления. Он имеет меньшее значение, если дождь только начался, при моросящем дожде или при росе, когда влага вместе с глинистой пылью, осевшей на рельсы, создает загрязненную пленку. Во время сильного дождя поверхности промываются, и коэффициент сцепления становится выше.

Для очистки поверхностей рельсов их пытались обмывать водой или растворителями, обрабатывать электроискровым методом и пламенем плазменной горелки. Однако эти методы на практике не нашли применения.

Самым эффективным средством увеличения сцепления колес с рельсами оказался сухой кварцевый песок, подаваемый в точку контакта колес и рельсов. Он разрушает пленки, и его твердые абразивные частицы внедряются в контактирующиеся поверхности, значительно увеличивая коэффициент сцепления.

Равномерность нагрузок от колесных пар на рельсы. Наибольшую силу тяги локомотива можно получить при равномерном распределении веса локомотива между движущими колесными парами, чтобы каждая из них развивала наибольшую силу тяги. В действительности достичь равномерных нагрузок от колесных пар на рельсы трудно. Если в статическом состоянии это можно сделать за счет регулирования рессорного подвешивания, то при реализации силы тяги возникает неизбежное перераспределение нагрузок.

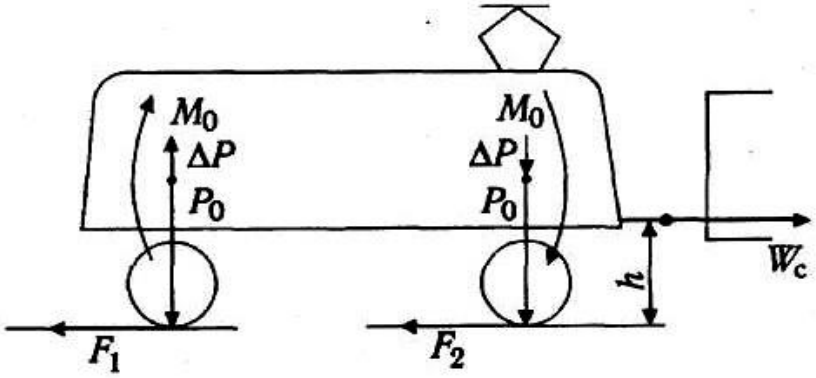


Рис. 1.2. Перераспределение нагрузок колесных пар на рельсы

Касательная сила тяги условного двухосного локомотива $F_K = F_1 + F_2$ (рис. 1.2) приложена на уровне головки рельса, а силы сопротивления движению состава W_c действуют на локомотив через автосцепные приборы. Эти силы, направленные в разные стороны, приложены на плече h, равном высоте оси автосцепки над уровнем головок рельсов, и образуют так называемый ***опрокидывающий момент*** M_o, который разгружает переднюю по ходу колесную пару на величину ΔP и перегружает заднюю колесную пару на ту же величину.

При уменьшенной нагрузке первая колёсная пара раньше других теряет сцепление с рельсами, и будет ограничивать силу тяги локомотива. Поэтому в эксплуатации первая по ходу движения колесная пара обычно имеет повышенную склонность к боксованию. Для уменьшения действия опрокидывающего момента на некоторых сериях локомотивов применяют противоразгрузочные устройства.

В действительности в статических нагрузках отдельных колесных пар на рельсы имеются отклонения в пределах допусков (± 2 %), что при неблагоприятных условиях также снижает коэффициент сцепления локомотива. Развеска локомотива изменяется и вследствие прогиба рельсов под нагрузкой от колес.

Колебания подрессоренной части локомотива. При колебаниях кузова и тележек локомотива каждая колесная пара то разгружается, то перегружается вследствие прогиба рессор и пружин рессорного подвешивания. В момент разгрузки колесная пара может потерять сцепление с рельсом, а при перегрузке — восстановить его. Наступает так называемое ***прерывистое боксование.*** В том случае, когда сцепление не восстанавливается, начинается разносное боксование со значительным увеличением частоты вращения колесной пары.

Колебания локомотива, а следовательно, и степень разгрузки колесных пар зависят от конструкции его экипажной части, жесткости рессорного подвешивания и характеристик гасителей колебаний, жесткости пути и наличия на нем неровностей (стыков), а также от скорости движения.

С увеличением скорости движения локомотива возрастает амплитуда колебаний, вызывающих снижение коэффициента сцепления.

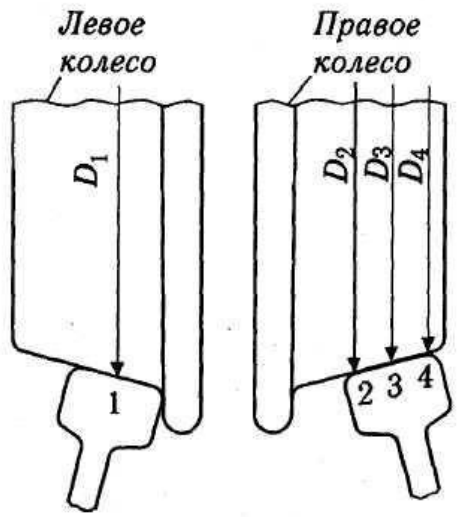


Рис. 1.3. Влияние коничности бандажей и положения колесной пары в рельсовой колее на проскальзывание колес

Расхождение характеристик тяговых электродвигателей и диаметров колесных пар. За счет этих расхождений различные движущие колесные пары развивают разные силы тяги. При прочих равных условиях колесная пара, которая развивает большую силу тяги, раньше потеряет сцепление с рельсами и начнет боксовать. Коэффициент сцепления локомотива в этом случае окажется ниже, чем при совпадении характеристик и диаметров колесных пар.

Жесткость характеристик тяговых электродвигателей и схемы включения двигателей. Здесь отметим только, что при жестких характеристиках и параллельном включении тяговых электродвигателей коэффициент сцепления локомотива будет больше.

Проскальзывание колес. Как уже отмечалось, реализуемая сила тяги при этом снижается. Проскальзывания колесных пар возникают вследствие конусности бандажей и при разности диаметров колес одной колесной пары. На рис. 1.3 показаны колеса, имеющие коническую форму рабочей поверхности, и рельсы, установленные с уклоном внутрь колеи (уклон равен 1/20). За счет коничности каждое колесо по ширине имеет разные диаметры, например D_2, D_3, D_4 (точки **2, 3** и **4**). При качении по рельсу его части с разными диаметрами стремятся пройти разные расстояния. Так как на самом деле они проходят один какой-то средний путь, то неизбежно проскальзывание точек **2** и **4** колеса.

Скольжение возрастает при разных диаметрах колес одной колесной пары. Даже в случае одинаковых диаметров колес смещение колесной пары в колее, например, до упора гребня левого колеса в рельс, приводит к качению левого колеса по большему диаметру D_1 (точка **1**), а правого – по меньшему D_3. В результате левое колесо проходит больший путь и стремится забежать вперед, поворачивая колесную пару вокруг вертикальной оси. Однако такому повороту препятствуют буксовые направляющие или поводки букс, и колеса вынуждены проскальзывать.

Наибольшие проскальзывания возникают при качении колесной пары в кривых участках пути, когда по внешнему рельсу она должна пройти больший путь, чем по внутреннему. Здесь коничность бандажа в какой-то мере компенсирует разницу в длине проходимого пути вследствие прижатия колесной пары к внешнему рельсу и качения по нему колеса большим диаметром.

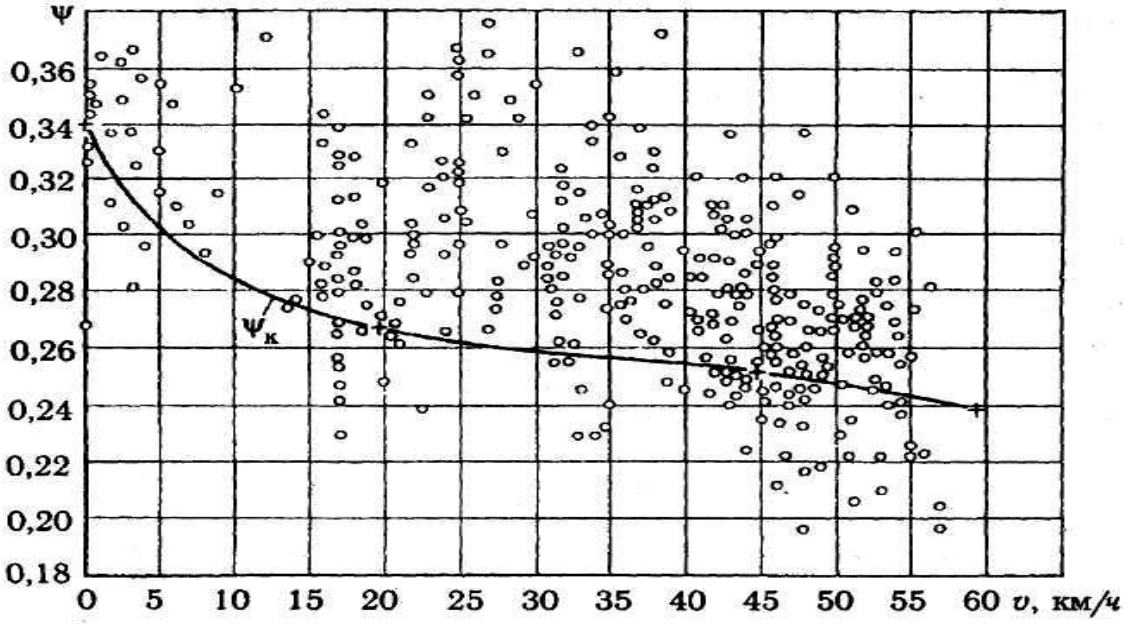


Рис. 1.4. Результаты экспериментального определения коэффициента сцепления

Проскальзывание колес в кривой возрастает с уменьшением ее радиуса и приводит к снижению коэффициента сцепления. Коэффициент снижается также при большом прокате колесных пар и износе рельсов.

В связи с тем, что коэффициент сцепления зависит от большого числа случайных факторов, его определяют экспериментально при испытаниях локомотивов. Обычно такие испытания проводят в разное время суток и различные сезоны, применяя песок. Опытный машинист при выбранных скоростях движения увеличивает силу тяги локомотива до срыва сцепления. Достигнутую силу тяги делят на вес локомотива и находят коэффициент сцепления. Чтобы получить объективные результаты, необходимо получить как можно больше точек (обычно несколько сотен). Их наносят на график в зависимости от скорости (рис. 1.4). Большой разброс замеров объясняется различными состояниями поверхности рельсов, жесткости пути, атмосферных условий.

Полученные данные (см. рис. 1.4) обрабатывают методами математической статистики и определяют значения ***расчетного коэффициента сцепления локомотива*** $\psi_к$.

1.5. Повышение использования тяговых свойств локомотивов

Для получения большего коэффициента сцепления локомотива в его конструкцию закладывают возможно меньшие разгрузки отдельных колесных пар. Это достигается за счет рационального размещения тяговых электродвигателей в раме тележки при опорно-осевом подвешивании; применения бесшкворневых тележек, связанных с кузовом через наклонные тяги (электровозы ВЛ65 и ВЛ85), использования бесчелюстных букс, устраняющих трение при вертикальном

перемещении рамы тележки относительно колесных пар за счет прогиба элементов рессорного подвешивания.

С той же целью применяют ***противоразгрузочные устройства,*** увеличивающие вертикальные нагрузки на передние (разгружающиеся) колесные пары и снижающие нагрузки на задние. Подобная система, состоящая из воздушных цилиндров, установленных под кузовом, и через поршни, штоки и рычаги передающая силу сжатого воздуха на тележки, использована на восьмиосных электровозах ВЛ10, ВЛ11 и ВЛ80 всех индексов. Эти силы воздействуют на переднюю часть первой по ходу тележки каждой секции и через рессорное подвешивание — на первую колесную пару. Причем давление воздуха в цилиндрах, а следовательно, и сила нажатия на переднюю часть тележки иногда регулируются с помощью специального реле в зависимости от силы тяги электровоза.

Разницу диаметров колесных пар и расхождений частот вращения тяговых электродвигателей (в пределах норм) компенсируют соответствующим их подбором. Разность диаметров колесных пар, подкатываемых под локомотив при выпуске из текущего ремонта ТР-3, не должна превышать 8 мм. Допустимые отклонения частот вращения якорей новых двигателей в соответствии с ГОСТ 2582 – 81 – ± 3 %; при выпуске из ремонта (в соответствии с Правилами ремонта) – ± 4%.

Если быстроходный тяговый двигатель будет установлен на колесную пару с наибольшим диаметром колес, то на ее ободах будет развиваться наибольшая сила тяги по сравнению с остальными, и она первой будет терять сцепление. Неравномерность в реализуемых силах тяги разными колесными парами уменьшится, если на колесную пару с меньшим диаметром бандажей (например, D_1) устанавливать быстроходные тяговые электродвигатели (с частотой вращения n_1), а на колесные пары с большим диаметром (D_3) – электродвигатели, имеющие меньшие частоты вращения (n_3). При этом добиваются примерного равенства произведений:

$$D_1n_1 \approx D_2n_2 \approx D_3n_3 \approx \dots \ .$$

Наилучшие условия сцепления создаются при подаче под колеса определенного количества песка. Завышенная подача не повышает коэффициент сцепления, но увеличивает сопротивление движению, приводит к излишнему расходу песка и усиленному загрязнению щебеночного балласта пути. Так, при испытаниях было установлено, что под каждое колесо электровоза нужно подавать песок в среднем по 400…700 г/мин в летнее и 900…1500 г/мин в зимнее время года, причем под первую колесную пару больше, чем под каждую последующую. При испытании тепловоза ТЭ3 установлено, что увеличение подачи песка под колесо от 300 до 450 г/мин приводило к улучшению условий

сцепления, дальнейшее увеличение подачи эффекта не давало. В эксплуатации перед каждой поездкой проверяют надежность действия песочниц, особенно в зимнее время, когда трубы забиваются снегом. Чтобы повысить эффективность использования песка, его нужно подавать перед возможным срывом сцепления, при движении по переездам и местам с грязными рельсами.

В настоящее время локомотивы имеют реле боксования, которые помогают машинисту обнаружить начавшееся боксование колесных пар, сигнализируют ему об этом, автоматически подают песок под колеса или снижают силу тяги.

Все существующие системы реле боксования обнаруживают уже начавшееся проскальзывание колесных пар. Для возможно более раннего его обнаружения они должны обладать достаточно высокой чувствительностью. Однако такая чувствительность не должна вызывать ложные срабатывания реле.

Склонность колесных пар к боксованию возрастает с увеличением проката колес или бандажей свыше 4 мм и износа рельсов вследствие изменения формы и размеров площадки, по которой соприкасаются колесо и рельс. Поэтому обычно не допускают прокат бандажей или колес более 5 мм.

1.6. Расчетный коэффициент сцепления

В Правилах тяговых расчетов для поездной работы приведены эмпирические (экспериментальные) формулы, по которым определяют расчетные коэффициенты сцепления, полученные по результатам обработки опытных данных для различных типов локомотивов в зависимости от скорости движения **v.** Эти формулы имеют следующий вид:

для электровозов постоянного тока ВЛ10, ВЛ10У, ВЛ11 и электровозов на два рода тока ВЛ82 и ВЛ82М (при работе на постоянном и переменном токе) —

$$\psi_к = 0{,}28 + \frac{3}{50 + 20v} + 0{,}0007v; \quad (1.7)$$

для электровозов переменного тока ВЛ80 (К,Т,С) и ВЛ60К –

$$\psi_к = 0{,}28 + \frac{4}{50 + 6v} + 0{,}0006v; \quad (1.8)$$

для электровозов переменного тока ВЛ85, ВЛ65 (ЭП1), ВЛ80Р –

$$\psi_к = 0{,}30 + \frac{4{,}3}{50 + 20v} + 0{,}0007v; \quad (1.9)$$

в кривых малого радиуса R (менее 500 м) для электровозов всех серий –

$$250 - 1{,}55R$$

$$\varphi_{к.кр} \le \varphi_к \quad \frac{}{(1.10)\ 500 - 1{,}1R};$$

для тепловозов 2ТЭ10(Л, В, М) и ТЭ10 –

$$\varphi_к \le 0{,}118 + \frac{4}{22 + v}; \qquad (1.11)$$

для тепловозов остальных серий –

$$\varphi_к \le 0{,}118 + \frac{5}{27{,}5 + v}; \qquad (1.12)$$

в кривых малого радиуса R (менее 800 м) для тепловозов всех серий –

$$\varphi_{к.кр} \le \varphi_к \quad \frac{3{,}5R}{400 - 3R}. \qquad (1.13)$$

Расчетный коэффициент сцепления в тоннелях разрешается снижать в исключительных случаях до значения, определяемого опытным путем.

В зимний период в исключительных случаях, при особо неудовлетворительных условиях сцепления (гололед, бураны) расчетный коэффициент может быть снижен до значения, определяемого при испытаниях локомотивов, но не более чем на 15 % от значений, приведенных в эмпирических формулах. При расчетах силу тяги по сцеплению определяют по формуле:

$$F_{к.сц} = 1000 m_л g \psi_к. \qquad (1.14)$$

На практике используют также термин «коэффициент тяги», определяемый в отличии от коэффициента сцепления как отношение реализуемой силы тяги к сцепному весу локомотива. Следовательно, коэффициент сцепления является предельным значением коэффициента тяги.

Тема 2

2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ТЯГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРО-ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Электромеханические характеристики на валу тягового электро-двигателя постоянного тока

Электрические машины постоянного тока могут иметь различные способы возбуждения: последовательное, параллельное, смешанное или независимое (рис. 2.1). В зависимости от способа возбуждения машины обладают разными электромеханическими характеристиками.

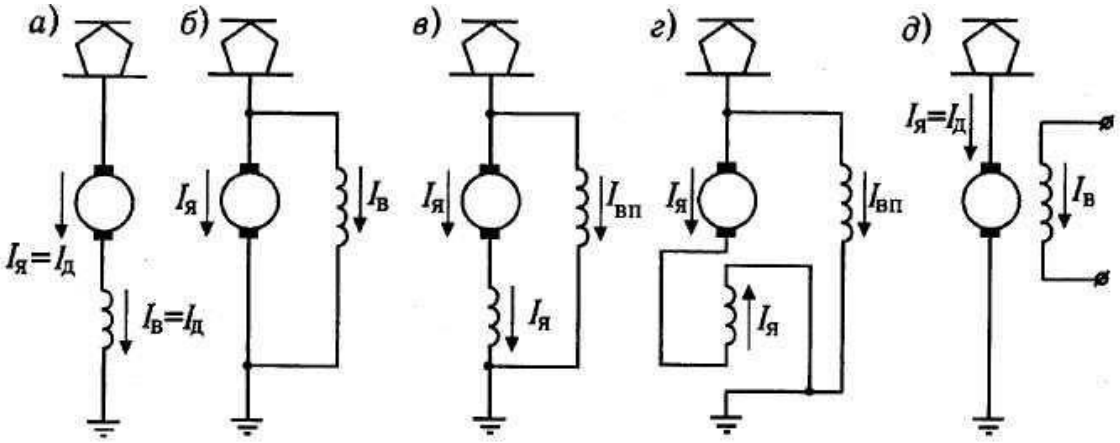


Рис. 2.1. Схемы электродвигателей с различным включением обмоток возбуждения:
а — последовательным; б — параллельным; в и г — смешанным соответственно с согласным и встречным включением параллельной и последовательной обмоток возбуждения; д — независимым

Электромеханическими характеристиками на валу тягового электродвигателя называют зависимость частоты вращения якоря, вращающего момента и коэффициента полезного действия от потребляемого тока при неизменном напряжении и постоянной температуре обмоток 115°С (по ГОСТ 2582-81). Характеристики тяговых электродвигателей электроподвижного состава переменного тока и тепловозов приводят при изменяющемся напряжении в соответствии с внешней характеристикой преобразователя или тягового генератора.

Электромеханические характеристики получают при стендовых испытаниях тяговых электродвигателей на заводе-изготовителе и приводят в виде графиков или таблиц. Усредненные характеристики по испытаниям первых 10 двигателей называют ***типовыми характеристиками.***

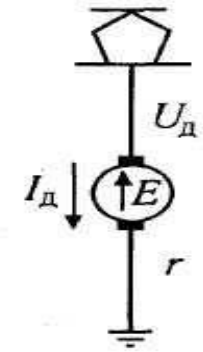


Рис. 2.2. Схема включения тягового электродвигателя

Чтобы определить зависимость частоты вращения якоря от тока, рассмотрим электрическую цепь тягового электродвигателя. При установившемся режиме работы подведенное к нему напряжение (рис.2.2) уравновешивается электродвижущей силой (ЭДС), наводимой в обмотке якоря, и падением напряжения в обмотках:

$$U_д = E + I_д r, \quad (2.1)$$

где: $U_д$ – напряжение на тяговом двигателе; E – ЭДС; $I_д$ – ток тягового электродвигателя; r – сопротивление обмоток тягового электродвигателя.

ЭДС тягового электродвигателя наводится за счет перемещения проводников обмотки якоря в магнитном поле. Она пропорциональна магнитному потоку и частоте вращения якоря, а также зависит от конструктивных особенностей тягового электродвигателя:

$$E = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} \cdot \Phi,$$

где: p – число пар полюсов; n – частота вращения якоря; N – число активных проводников обмотки якоря; Ф – магнитный поток главного полюса; a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря. pn

Величину $\frac{pN}{60a} = C_1$ называют ***конструктивной постоянной тягового электродвигателя***. Тогда ЭДС, можно определить так:

$$E = C_1 \cdot n \cdot \Phi. \qquad (2.2)$$

Подставив значение E в уравнение (2.1), получим:

$$U_д = C_1 \cdot n \cdot \Phi + I_д \cdot r, \qquad (2.3)$$

откуда

$$n = \frac{U^д - I^д \cdot r}{C_1 \cdot \Phi} \qquad (2.4)$$

Таким образом, частота вращения тягового электродвигателя при постоянных значениях подведенного напряжения $U_д$, сопротивления обмоток **r** и конструктивной постоянной $\mathbf{C_1}$ зависит от тока $I_д$ и магнитного потока Ф. Магнитный поток тягового электродвигателя, не имеющего компенсационной обмотки, зависит от тока возбуждения $I_в$, тока якоря $I_я$, конструкции двигателя и материалов магнитопровода.

Зависимость магнитного потока от тока возбуждения называют ***магнитной характеристикой*** тягового электродвигателя. На практике вместо магнитного потока используют пропорциональные ему величины $C_1Ф$ или E/n в зависимости от тока возбуждения $I_в$.

Если тяговый электродвигатель не имеет компенсационной обмотки, то ток якоря под действием реакции якоря вызывает снижение магнитного потока. Поэтому зависимость $C_1Ф$ от тока возбуждения $I_в$ при разных токах якоря $I_я$ представляет собой семейство кривых (рис. 2.3). При большем токе якоря $I_я$ кривые $C_1Ф(I_в)$ располагаются ниже. Эти кривые называют ***магнитными характеристиками при нагрузке, или нагрузочными характеристиками.*** В зоне малых токов $I_в$ кривые прямолинейны и магнитный поток возрастает пропорционально току. Затем из-за насыщения магнитной системы темп роста магнитного потока замедляется.

На рис. 2.3 показана штриховая линия $C_1Ф(I_в)$ при последовательном возбуждении машины, когда $I_в = I_я$. В тяговом электродвигателе компенсационная обмотка почти полностью компенсирует реакцию якоря, магнитный поток практически не зависит от тока якоря и определяется только током возбуждения. Его магнитная характеристика при полной компенсации потока якоря представляет одну кривую при токе
$I_я = 0$.

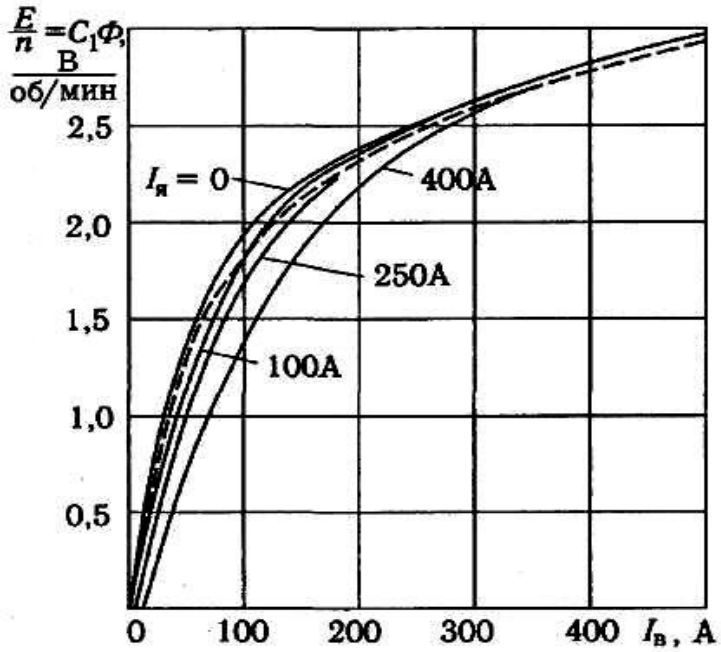


Рис. 2.3. Нагрузочные характеристики тягового электродвигателя

Нагрузочные характеристики можно использовать для расчета и построения электромеханических характеристик на валу тягового электродвигателя $□(I_д)$ по формуле (2.4), а также вращающего момента $M(I_д)$. Зависимость вращающего момента (Нм) от тока тягового электродвигателя $I_д$ и магнитного потока Ф выражается формулой:

$$M = 9{,}55C_1ФI_д – ΔM, \qquad (2.5)$$

где ΔM – момент, возникающий вследствие механических и магнитных потерь в электродвигателе:

$$□M □ 9{,}55\frac{□ □P_{мех} □□P_{магн}}{n}, \qquad (2.6)$$

здесь: $□P_{мех}$ и $□P_{магн}$ — соответственно мощность механических и магнитных потерь; n – частота вращения.

Вращающий момент без учета магнитных и механических потерь называют ***электромагнитным вращающим моментом:***

$$M_{эм} = 9{,}55 C_1 Ф I_Д. \quad (2.7)$$

Формулы (2.4)...(2.6) используют для расчета и построения кривых $n(I_д)$ и $M(I_л)$ при проектировании тяговых электродвигателей. Используя формулу (2.4), определяют частоту вращения при заданном напряжении $U_д$ и известных значениях конструктивной постоянной электродвигателя и сопротивления его обмоток для каждого тока $I_д$ и соответствующего ему тока возбуждения $I_в$. Затем по формуле (2.6) и известным значениям механических и магнитных потерь вычисляют ΔM для каждой скорости и тока $I_д$ и вращающий момент M при каждом токе $I_д$. Обычно определяют 8...10 точек и наносят на графики. На рис. 2.4 приведены для примера электромеханические характеристики на валу тягового электродвигателя последовательного возбуждения.

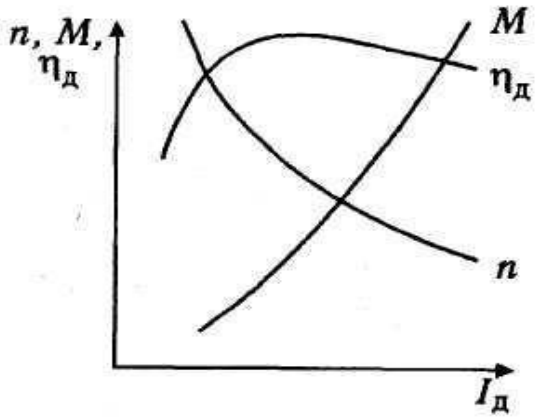


Рис. 2.4.Электромеханические характеристики тягового электродвигателя последовательного возбуждения

В тяговом электродвигателе происходит преобразование подведенной к нему электрической энергии в механическую, расходуемую на движение поезда. При этом часть энергии теряется. Общая мощность потерь ΔP_1 складывается из отдельных составляющих:

$$\Delta P_1 = \Delta P_М + \Delta P_Щ + \Delta P_{мех} + \Delta P_{магн} + \Delta P_{доб}, \quad (2.8)$$

где $\Delta P_М$ – мощность потерь в меди обмоток; $\Delta P_Щ$ – переходные потери в месте контакта щеток; $\Delta P_{мех}$ – механические потери; $\Delta P_{магн}$ – магнитные потери при холостом ходе; $\Delta P_{доб}$ – добавочные потери при нагрузке.

Потери в меди обмоток $\Delta P_М$ вызываются тепловым действием тока при его прохождении по проводникам обмоток якоря, главных и дополнительных полюсов и компенсационной обмотке:

$$\Delta P_М = \sum I^2 r_i,$$

где I – ток, проходящий по обмотке; r_i – сопротивление i-й обмотки.

Переходные потери в щеточном контакте $\Delta P_Щ$ возникают в местах контакта щеток. По ГОСТ 2582 – 81 эти потери определяют из расчета падения напряжения $\Delta U_щ$, равного 3 В для щеток положительной и отрицательной полярности, в том случае, когда у них нет гибких шунтов, и равного 2 В при использовании щеток с шунтами:

$$\Delta P_{Щ} = \Delta U_{щ} I.$$

За счет потерь в меди и местах контакта щеток, которые называют электрическими потерями, уменьшается числитель в формуле (2.4), и снижается частота вращения тягового электродвигателя. На значение вращающего момента эти потери не влияют.

Механические потери $\Delta P_{мех}$ возникают из-за трения вала в моторноякорных подшипниках, щеток о коллектор, якоря о воздух. У двигателей с самовентиляцией добавляются потери из-за вращения лопастей встроенного в машину вентилятора, прогоняющего охлаждающий воздух через электродвигатель. Эти потери возрастают с увеличением частоты вращения, а от нагрузки электродвигателя зависят незначительно.

Магнитные потери при холостом ходе $\Delta P_{магн}$ складываются из потерь на гистерезис и потерь от вихревых токов в сердечнике и зубцах якоря тягового электродвигателя. Они возрастают с увеличением магнитного потока и частоты вращения якоря, т.е. частоты перемагничивания стали.

Добавочные потери при нагрузке $\Delta P_{доб}$ добавляются к основным магнитным потерям. Они возникают вследствие искажения основного магнитного потока, наведения вихревых токов в полюсных наконечниках, неравномерного распределения токов по сечениям шин и щеток, возникновения токов в уравнительных соединениях. Эти потери возрастают с увеличением нагрузки электродвигателя. ГОСТ 2582–81 рекомендует добавочные потери определять в зависимости от тока нагрузки по табл. 2.1.

Таблица 2.1

Ток нагрузки в процентах от номинального	20	60	80	100	130	160	200
Добавочные потери в процентах от магнитных потерь при холостом ходе	22	23	26	30	38	48	65

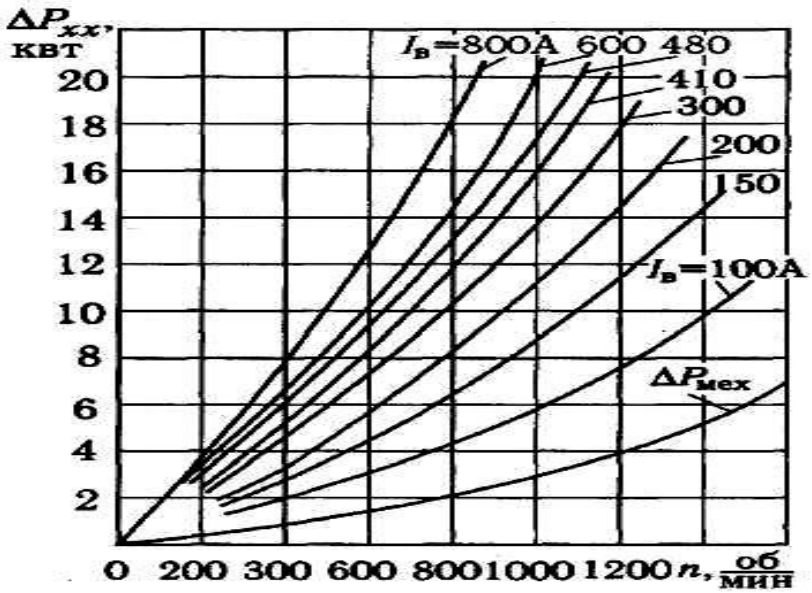


Рис. 2.5. Потери холостого хода тягового электродвигателя

Сумму механических, магнитных и добавочных потерь называют ***потерями холостого хода*** ΔP_{XX} и приводят в виде графиков в зависимости от частоты вращения **n**

(рис. 2.5). Нижняя кривая показывает механические потери, последующие – сумму механических, магнитных и добавочных потерь при разных токах возбуждения $I_в$.

Коэффициент полезного действия тягового электродвигателя $\eta_д$ определяют как отношение отдаваемой мощности P_2 к подведенной мощности P_1.

$$\eta_д = P_2/P_1. \qquad (2.9)$$

При известных потерях ΣP_1 отдаваемая мощность:

$$P_2 = P_1 - \Sigma P_1,$$

Откуда

$$\eta_д = \frac{P_1 - \Sigma P_1}{P_1}. \qquad (2.10)$$

В тяговом электродвигателе постоянного тока подводимая мощность равна $U_д I_д$, следовательно:

$$\eta_д = \frac{P_2}{U_д I_д} \qquad (2.11) \quad \text{или} \quad \eta_д = \frac{U_д I_д - \Sigma P_1}{U_д I_д}. \qquad (2.12)$$

КПД тягового электродвигателя можно определить, если известны подведенная мощность и потери мощности в двигателе. Потери в двигателях определяют расчетным путем или экспериментально при испытаниях на стенде.

Характерная кривая зависимости КПД от тока двигателя приведена на рис. 2.4. В зоне малых нагрузок КПД низок, в зоне номинальных нагрузок имеет наибольшее значение, а затем при увеличении нагрузки снижается. Низкий КПД при малых нагрузках объясняется большим влиянием механических потерь, а снижение КПД в зоне больших нагрузок – увеличением электрических потерь.

2.2. Электромеханические характеристики тягового электродвигателя, отнесенные к ободам колес

На электроподвижном составе постоянного тока зависимость скорости движения **v,** силы тяги на ободах колесной пары $F_{КД}$ и КПД от тока электродвигателя $I_д$ при неизменном напряжении и постоянной температуре обмоток электродвигателей называют ***электромеханическими характеристиками, отнесенными к ободам колес.*** Их приводят при тех же температурах обмоток, что и характеристики на валу электродвигателя (115 °С).

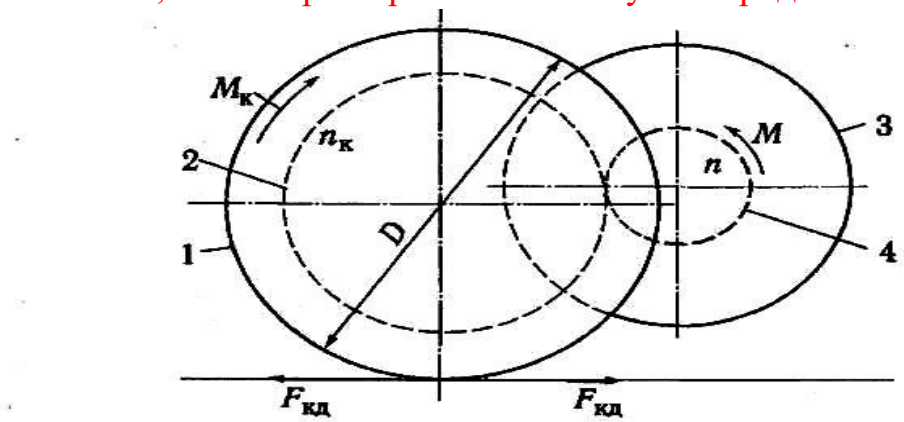


Рис. 2.6. Схема передачи вращающего момента от тягового электродвигателя на колесную пару

Электромеханические характеристики, отнесенные к ободам колес, можно получить пересчетом характеристик на валах тяговых электродвигателей. Вал якоря связан с колесной парой (рис. 2.6) через зубчатую передачу (редуктор), причем шестерня **4,** соединенная с валом якоря тягового электродвигателя **3,** имеет обычно меньшее число зубьев, чем зубчатое колесо **2,** насаженное на ось колесной пары или на удлиненную ступицу колесного центра **1.** Отношение числа зубьев зубчатого колеса к числу зубьев шестерни называют ***передаточным отношением*** редуктора.

Найдем зависимость между частотой вращения вала тягового электродвигателя и скоростью движения локомотива.

Линейная скорость на ободах колесных пар, в м/с:

$$v = \pi D n_K / 60, \qquad (2.13)$$

где D – диаметр колес колесной пары; $n_к$ – частота вращения колесной пары.

Частота вращения колесной пары $n_к$ меньше частоты вращения вала тягового электродвигателя в раз:

$$n_к = n/.$$

В практике работы железнодорожного транспорта скорость измеряют в км/ч. В тяге поездов также пользуются этой размерностью. Поэтому в формулу (2.13) введем переводной коэффициент. Так как 1 м = 1/1000 км и 1 с = 1/3600 ч, то 1 м/с = (1/1000) / (1/3600) = 3,6 км/ч. . Тогда скорость, в км/ч:

$$v = 3,6Dn/(60), \quad \text{или } v = 0,188Dn/. \qquad (2.14)$$

Формула (2.14) показывает, что при одной и той же частоте вращения якоря скорость движения больше при большем диаметре колес и меньшем передаточном отношении зубчатой передачи.

Чтобы найти связь между скоростью движения и током $\mathbf{I_д}$, подставим в формулу (2.14**)** значение частоты вращения из формулы (2.4):

$$v = 0,188 \frac{D}{} \cdot \frac{U^д - I^д r}{C_1 Ф}$$

Обозначив постоянные для данного локомотива параметры через C = $=C_1\mu/(0,188D)$, получим:

$$v = \frac{U^д - I^д r}{CФ} \qquad (2.15)$$

Зависимость скорости движения от тока тягового электродвигателя $v(I_д)$ называют ***скоростной характеристикой.*** Ее можно построить, проведя расчеты по формуле (2.15).

Разность между напряжением на тяговом электродвигателе и падением напряжения в его обмотках есть ЭДС (E):

$$E = CФv. \qquad (2.16)$$

Выражение (2.15) можно также получить из рис. 2.2 с учетом того, что напряжение, подводимое к тяговому электродвигателю, уравновешивается электродвижущей силой и падением напряжения в его обмотках, т.е.:

$$U_д = CФv + I_д r, \qquad (2.17)$$

откуда и выводится формула (2.15).

Если электродвигатель получает питание от преобразовательной установки или от тягового генератора, то его скоростные характеристики приводят не при постоянном напряжении, а при напряжении, определяемом характеристиками преобразователя или генератора.

Коэффициент полезного действия тягового электродвигателя, отнесенный к ободам, колесных пар, учитывает не только потери в тяговом двигателе $\Delta P_Д$, но и потери в передаче $\Delta P_П$:

$$\Delta P = \Delta P_Д + \Delta P_П. \quad (2.18)$$

КПД тягового электродвигателя, отнесенный к ободам колес, меньше КПД тягового электродвигателя и с учетом равенств (2.12) и (2.18):

$$\frac{U^д I^д}{U_д I_д} P. \quad (2.19)$$

Потери в передаче включают в себя потери на трение в зубчатой передаче и моторно-осевых подшипниках при опорно-осевой подвеске тягового электродвигателя или в зубчатой передаче и подшипниках редуктора при опорнорамном подвешивании. Потери в передаче зависят от скорости движения и реализуемой колесной парой силы тяги. Для расчета потерь в одноступенчатой цилиндрической зубчатой передаче и в моторно-осевых подшипниках тягового электродвигателя используют опытные данные, приведенные в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Подведенная мощность в процентах от номинальной мощности тягового двигателя	200	150	125	100	75	60	50	40	30	25
Потери $p_п$ в зубчатой передаче и моторноосевых подшипниках в процентах от подведенной мощности	3,5	3,0	2,7	2,5	2,5	2,7	3,2	4,4	6,7	8,5

Как видно из таблицы, при номинальном режиме в передаче теряется $\Delta p_п$= =2,5 % от подведенной мощности. Потери в передаче в процентах от подведенной мощности определяют из уравнения

$$p_п P_п 100/(U_д I_д). \quad (2.20)$$

КПД передачи $_п$ по известной величине $p_п$, взятой из табл. 2.2, определяют как отношение мощности на ободе колеса $P_к$ к мощности на валу тягового электродвигателя P_2. Так как $P_к = P_2 – \Delta P_П$, получим:

$$_п 1 P/P_2. \quad (2.21)$$

Но из формулы (2.11) следует, что $P_2 U_д I_д _д$, а из формулы (2.20):

$P_п p_п U_д I_д /100$. Подставив

эти значения в формулу (2.21), получим:

□p U I

□п □1□ ————п д д, или □п □1□ □pп /□100□п□.
(2.22) 100UдIд

Значения Δpп берут из табл. 2.2 или по кривой рис. 2.7, построенной в соответствии с данными таблица 2.2. Если были рассчитаны КПД □д (см. раздел 2.1) и □п по формуле (2.22), то можно определить КПД □.

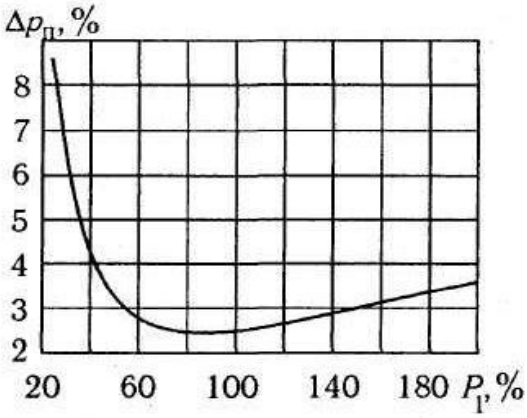


Рис. 2.7. Зависимость Δpп от подводимой мощности

При преобразовании в тяговом электродвигателе электрической энергии в механическую теряется часть энергии, которую можно определить, зная КПД □д. Затем при передаче механической энергии с вала электродвигателя на колесную пару теряется энергия в передаче, которую определяют исходя из КПД □п. При таком последовательном преобразовании энергии общий КПД равен произведению КПД каждого преобразования, т. е. □ □ □д□п, или с учетом выражения (2.22):

□ □ □д□ □pп /100. (2.23)

Этот КПД □, отнесенный к ободам колес, одновременно является и КПД электроподвижного состава постоянного тока без учета энергии, расходуемой вспомогательными цепями. Для получения аналогичного КПД электроподвижного состава переменного тока необходимо умножить □ на КПД преобразовательной установки. КПД тепловоза с электрической передачей можно получить умножением □ на КПД дизеля и генератора.

Касательную силу тяги или просто силу тяги движущей колесной пары определяют по заданному вращающему моменту Mк, приложенному к колесной паре (см. рис. 2.6), по формуле:

$$F_{кд} = 2\,M_K / D. \qquad (2.24)$$

В свою очередь вращающий момент Mк образуется за счет вращающего момента на валу тягового электродвигателя М. Причем сила, передаваемая от зубьев шестерни на зубья зубчатого колеса, создает на колесной паре вращающий момент Mк в □ раз больше момента **М.** Потери в передаче несколько снижают момент Mк. Их характеризует КПД передачи □п. Следовательно, Mк □ М□□п. Подставив это значение Mк в формулу (2.24), получим:

$$F_{кд} = 2M\eta_{п}/D. \quad (2.25)$$

Таким образом, при одинаковом вращающем моменте на валу тягового электродвигателя сила тяги будет больше при большем передаточном отношении γ и меньших диаметрах колес.

Зависимость силы тяги на ободах колес колесной пары от тока тягового электродвигателя $F_{кд} = I_{д}$ называют ***электротяговой характеристикой.*** По аналогии с электромагнитным вращающим моментом силу тяги на ободах колесной пары без учета магнитных и механических потерь в тяговом электродвигателе и потерь в передаче называют ***электромагнитной силой тяги*** $F_{кд\ эм}$:

$$F_{кд\ эм} = 2M_{эм}\gamma/D.$$

Подставив значение $M_{эм}$ из формулы (2.7), получим в Н:

$$F_{кд\ эм} = 2\eta 9{,}55C_1\Phi I_{д}\gamma/D.$$

Так как $C_1 = \gamma/0{,}188D\eta$ С, то

$$F_{кд\ эм} = 3{,}6C\Phi\gamma I_{д}. \quad (2.26)$$

Таким образом, электромагнитная сила тяги пропорциональна произведению тока и магнитного потока в веберах (Вб). Она характеризует физическую картину возникновения вращающего момента и силы тяги как результата взаимодействия проводника, по которому протекает ток, с магнитным полем.

Если обозначить силы, вызванные механическими и магнитными потерями и потерями в передаче, через ΔF, то сила тяги на ободах колесной пары будет меньше электромагнитной силы на эту величину:

$$F_{кд} = F_{кд\ эм} - \Delta F, \text{ или } F_{кд} = 3{,}6\eta C\Phi\gamma I_{д} - \Delta F. \quad (2.27)$$

Силу, ΔF, затрачиваемую на преодоление перечисленных потерь, можно выразить так:

$$\Delta F = 3{,}6(\Delta Р_{магн} + \Delta Р_{мех} + \Delta Р_{П}) / v.$$

При известных потерях сила тяги будет равна:

$$F_{кд} = 3{,}6C\Phi I_{Д} - 3{,}6(\Delta Р_{мат} + \Delta Р_{Мех} + \Delta Р_{П}) / v. \quad (2.28)$$

В связи со сравнительно небольшим значением силы ΔF при оценке качественной стороны процесса реализации силы тяги и при ориентировочных расчетах можно принимать $F_{кд} = F_{кд\ эм}$ или $F_{кд} = 3{,}6C\Phi\gamma I_{д}$.

Силу тяги на ободах колесной пары можно получить, используя скоростную характеристику и кривые КПД. Для этого мощность на ободах колес $Р_{к}$ определяют из формулы (2.11) через подведенную к тяговому электродвигателю электрическую мощность:

$$P_к = U_д I_д \eta. \quad (2.29)$$

Эту же мощность можно выразить через механическую мощность, расходуемую на движение поезда. Она равна произведению скорости движения и силы тяги: $P_к = vF_{кд}$

Чтобы получить мощность $\mathbf{P_к}$ в ваттах, необходимо скорость перевести в метр в секунду (1 Н·м/с = 1 Вт), тогда

$$P_к = vF_{кд}/3{,}6 \quad (2.30)$$

Приравнивая левые части уравнений (2.29) и (2.30), получают выражение для силы тяги, Н:

$$F_к = 3{,}6 U_д I_д \eta / v. \quad (2.31)$$

Выведенные в этом разделе формулы дают возможность рассчитать электромеханические характеристики на ободах колес колесной пары по заданным характеристикам на валу тягового электродвигателя. Для этого задаются каким-либо током $I_{д1}$ и для него по электромеханическим характеристикам определяют частоту вращения **n,** вращающий момент **M** и КПД $\eta_д$**.** Затем по формуле (2.22) рассчитывают $\eta_п$**,** предварительно найдя мощность, потребляемую тяговым электродвигателем при токе $I_{д1}$**,** и $\Delta p_п$ из табл. 2.2 или из рис. 2.7.

По формулам (2.14) и (2.25) вычисляют скорость движения v и силу тяги $F_{кд}$ при заданных передаточном отношении редуктора и диаметрах колес колесной пары. КПД η определяют как произведение $\eta_д \eta_п$**.** Далее проводят аналогичные расчеты при других токах $I_{д2}$, $I_{д3}$ и т.д. Обычно используют 8...10 точек, причем для повышения точности их чаще берут в той зоне, где кривая резко меняет свое направление, и реже, если она близка к прямой. При этом, как правило, используют точки номинальных режимов (часового и продолжительного). Полученные точки откладывают в осях координат и соединяют с помощью лекала.

2.3. Пересчет характеристик при изменении передаточного отношения редуктора и диаметров колесных пар

Из формул (2.14) и (2.25) видно, что скоростная и электротяговая характеристики зависят от передаточного отношения редуктора и диаметров колес. Если передаточное отношение редуктора данного локомотива в процессе эксплуатации не меняется, то диаметры колес уменьшаются из-за износа и периодических обточек.

Приводимые в ПТР характеристики обычно относят к номинальным диаметрам колес или – к среднеизношенным.

В практике бывают случаи, когда тяговые электродвигатели одного и того же типа используют на разных локомотивах, имеющих различные передаточные отношения редукторов.

Порядок пересчета характеристик при изменении и D сводится к следующему. Если локомотив имеет передаточное отношение редуктора β_1 и диаметр движущих колес D_1 то, как следует из формулы (2.14), скорость его движения, км/ч: $v_1 = 0{,}188 D_1 n/\beta_1$.

В случае работы того же тягового электродвигателя на другом локомотиве, имеющем передаточное отношение β_2 и диаметр движущих колес D_2, при той же частоте вращения вала **n** скорость движения:

$$v_2 = 0{,}188 D_2 n/\beta_2.$$

Разделив второе равенство на первое, получим:

$$\frac{v_2}{D_2 \beta_1} = \frac{\beta_1}{D_1 \beta_2} \cdot v_1$$

Откуда скорость движения:

$$v_2 = \frac{D_2 \beta_1}{D_1 \beta_2} v_1, \qquad (2.32)$$

т.е. скорость движения при неизменной частоте вращения якоря тягового электродвигателя будет больше при большем диаметре колесных пар и меньшем передаточном отношении редуктора.

Силу тяги $F_{кд1}$ в ньютонах, при неизменном вращающем моменте M, диаметре колес D_1 и передаточном отношении редуктора β_1 определяют по формуле
(2.25):

$$F_{кд1} = 2M\beta_1\eta_п / D_1.$$

Аналогично при измененных значениях диаметра колеса D_2 и передаточного отношения редуктора β_2:

$$F_{кд2} = 2M\beta_2\eta_п / D_2.$$

Разделив второе равенство на первое, определяют силу тяги:

$$\frac{D_1 \beta_2}{D_2 \beta_1} F_{кд1} = F_{кд2}. \qquad (2.33)$$

Из этого равенства видно, что большую силу тяги при неизменном вращающем моменте тягового электродвигателя получают при меньшем диаметре колесных пар и большем передаточном отношении редуктора.

Если нужно при одинаковых нагрузках тяговых электродвигателей получить разные скорости и силы тяги, например при использовании локомотива для грузовой и пассажирской службы, на электровозах и тепловозах меняют передаточное отношение , оставляя одинаковыми диаметры колес. Чтобы получить большую скорость при сравнительно малой силе тяги у пассажирского локомотива, передаточное отношение должно составлять 1,5...3; у грузовых локомотивов, которые должны иметь большую силу тяги и меньшую скорость движения, передаточное отношение больше –
3,5...5.

2.4. Сравнение характеристик при различных способах возбуждения тяговых электродвигателей

Из формул (2.15) и (2.27) видно, что скорость и сила тяги зависят от магнитного потока. Поэтому нужно выяснить, как изменяется магнитный поток или пропорциональная ему величина СФ от тока якоря.

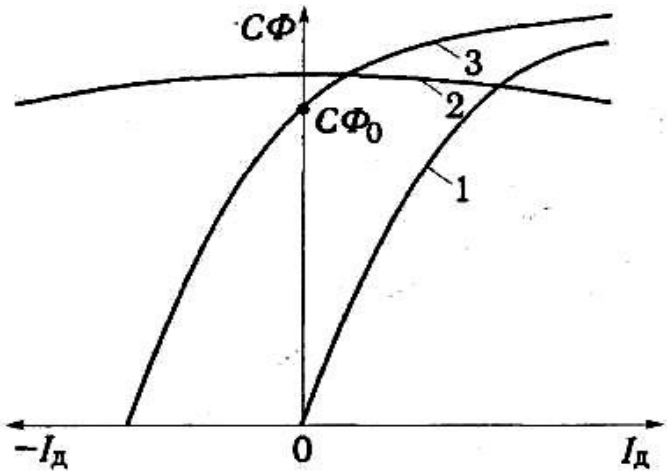


Рис. 2.9. Зависимость СФ от тока тяговых электродвигателей различного возбуждения:
1 — последовательного;
2 — параллельного или независимого;
3 — смешанного

При последовательном возбуждении токи якоря и возбуждения одинаковы (при полном возбуждении), и магнитный поток или СФ изменяется по магнитной или нагрузочной характеристике (при $I_д = I_в$) (кривая **1,** рис. 2.9). В электродвигателях параллельного или независимого возбуждения магнитный поток создается неизменным по значению током возбуждения. В машинах без компенсационной обмотки с увеличением тока якоря магнитный поток несколько снижается из-за размагничивающего действия реакции якоря (кривая **2**); в компенсированных машинах он остается практически постоянным при разных токах якоря.

В электрических машинах смешанного возбуждения магнитный поток образуется обмотками параллельного и последовательного возбуждения; при токе $I_д = 0$ он создается только одной обмоткой параллельного возбуждения (точка $СФ_0$ на кривой **3**). Если магнитодвижущая сила обмотки последовательного

возбуждения действует согласно с магнитодвижущей силой обмотки параллельного возбуждения, то с увеличением тока якоря магнитный поток и СФ возрастают (от точки $СФ_0$ вправо). Из-за насыщения магнитной системы СФ увеличивается медленно по сравнению с машинами последовательного возбуждения. В случае встречного включения обмоток их магнитодвижущие силы вычитаются. С увеличением тока якоря магнитный поток и СФ уменьшаются по магнитной характеристике (кривая **3** левее точки $СФ_0$). На рис. 2.9 первый квадрант соответствует режиму двигателя, второй – режиму генератора.

При последовательном возбуждении электродвигателя с увеличением тока $I_д$ возрастает и магнитный поток. Как видно из формулы (2.15), при постоянном напряжении $U_д$ числитель с повышением тока несколько уменьшается за счет увеличения падения напряжения в обмотках ($I_лr$), а знаменатель возрастает. Следовательно, скорость движения с увеличением тока $I_д$ будет снижаться вначале интенсивно, а затем более плавно (рис.2.10, а) в соответствии с темпом увеличения магнитного потока, который при больших токах возрастает незначительно из-за насыщения магнитной системы (см. рис. 2.9).

Характеристику, при которой с изменением тока или силы тяги скорость движения изменяется значительно, называют ***мягкой;*** если же колебания скорости малы, характеристику называют ***жесткой.*** Тяговый электродвигатель последовательного возбуждения обладает мягкой скоростной характеристикой в зоне малых токов и более жесткой – при больших токах $I_д$.

В зоне малых токов, когда магнитный поток изменяется в зависимости от тока $I_д$ по прямой линии, электромагнитная сила тяги в соответствии с формулой (2.26) пропорциональна квадрату тока. В зоне больших токов $I_д$ из-за насыщения магнитной системы магнитный поток изменяется незначительно, и сила тяги возрастает почти пропорционально току. Поэтому характеристика $F_{кд\ эм}(I_д)$ при малых токах близка к параболе, а при больших – к прямой линии.

Электротяговая характеристика $F_{кд\ эм}(I_д)$ располагается в соответствии с уравнением (2.27) ниже кривой $F_{кд\ эм}(I_д)$ на величину ΔF, вызванную магнитными и механическими потерями в тяговом электродвигателе и потерями в передаче. Эта характеристика пересекает ось абсцисс в точке O_1 (см. рис. 2.10), которая соответствует холостому ходу электродвигателя.

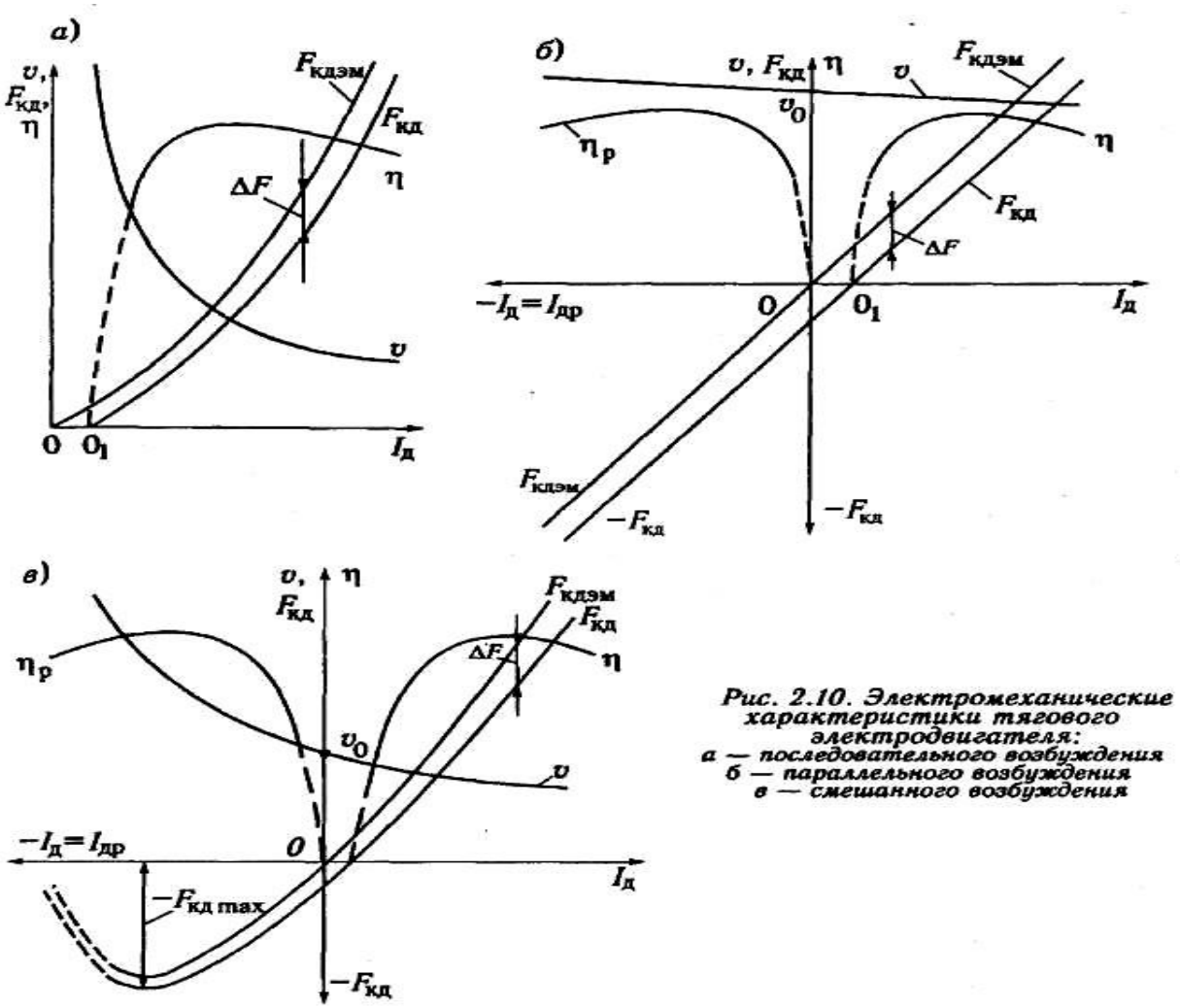


Рис. 2.10. Электромеханические характеристики тягового электродвигателя:
а — последовательного возбуждения
б — параллельного возбуждения
в — смешанного возбуждения

Кривая КПД $\eta(I_д)$ имеет обычный для электрических машин вид с наибольшими значениями в зоне номинальных токов нагрузки. При холостом ходе (точка O_1) КПД равен нулю, и вся подводимая мощность расходуется на покрытие потерь в тяговом электродвигателе (в основном механических) и передаче. Повышение нагрузки вызывает относительное уменьшение механических потерь, и КПД резко возрастает. В зоне больших токов КПД снижается вследствие влияния повышенных электрических потерь.

При параллельном или независимом возбуждении скоростная характеристика $v(I_д)$ жесткая из-за незначительного изменения магнитного потока. Снижение скорости движения с увеличением тока вызвано возрастающим падением напряжения в обмотках тягового электродвигателя. Электромагнитная сила тяги изменяется пропорционально току $I_д$ в связи с тем, что магнитный поток остается почти постоянным (незначительно изменяется вследствие действия реакции якоря). Электротяговая характеристика $F_{кд}(I_д)$ располагается ниже характеристики $F_{кд\ эм}(I_д)$ на величину ΔF возникающую из-за магнитных и механических потерь в электродвигателе и потерь в передаче.

Если принять магнитный поток постоянным при разных токах $I_д$, то в соответствии с формулой (2.16) с увеличением скорости будет возрастать ЭДС, наводимая в обмотке якоря, вызывая снижение тока $I_д$. При скорости $\mathbf{v_0}$ (рис. 2.10, б) ЭДС сравняется с подведенным напряжением, а ток будет равен нулю. Дальнейшее повышение скорости движения вызовет наведение в обмотке якоря ЭДС, превышающей подведенное напряжение. Ток начнет протекать от тягового электродвигателя в сеть – $I_д$ или $I_{др}$ – это генераторный режим работы электродвигателя (режим рекуперации).

С изменением направления тока падение напряжения в формуле (2.15) будет прибавляться, и с увеличением тока скорость будет возрастать, как показано на рис. 2.10, б. Произведение положительного магнитного потока на отрицательный ток даст в соответствии с формулой (2.26) отрицательное значение электромагнитной силы тяги. Это – тормозная электромагнитная сила – ($\square F_{кд\ эм}$), показанная в третьем квадранте. Тормозная сила – ($\square F_{кд}$) больше электромагнитной на величину $\square F$, так как сила, вызванная магнитными и механическими потерями в электродвигателе, работающем в генераторном режиме, и потерями в передаче, действует в одном направлении с тормозной силой. Точка O_1 соответствует холостому ходу тягового электродвигателя.

Тяговые электродвигатели смешанного возбуждения имеют характеристики, приведенные на рис. 2.10, в. При согласном включении обмоток параллельного и последовательного возбуждения характеристики $v\square I_д\ \square$, $F_{кд}\ \square I_д\ \square$ занимают промежуточное положение между характеристиками электродвигателей последовательного и параллельного возбуждения. При увеличении скорости движения ток в режиме двигателя уменьшается, а затем переходит через ноль и изменяет направление. Тяговый электродвигатель переходит в генераторный режим, при котором обмотка последовательного возбуждения действует встречно с обмоткой параллельного возбуждения.

С увеличением тока $I_{др}$ генераторного режима магнитный поток машины уменьшается. Тормозная сила в соответствии с формулами (2.26) и (2.27) вначале возрастает за счет более интенсивного роста тока $I_{др}$ и меньшего снижения магнитного потока Ф (из-за насыщения магнитной системы), а затем, достигнув максимума ($\square F_{кд\ max}$)начинает снижаться вследствие более интенсивного уменьшения магнитного потока, вызываемого обмоткой последовательного возбуждения.

2.5. Выбор характеристик электродвигателей для тяги поездов

Требования, предъявляемые к тяговым электродвигателям. Они должны удовлетворять специфическим требованиям, предъявляемым условиями тяги поездов. Основными из этих требований являются:

♦электрическая устойчивость режимов работы;

♦механическая устойчивость движения поезда;

♦равномерное распределение нагрузок между параллельно работающими тяговыми электродвигателями;

♦возможно меньшие изменения нагрузки электродвигателей при колебаниях напряжения в контактной сети;

♦наименьшие изменения потребляемой мощности тяговыми электродвигателями при движении поезда по различным элементам профиля пути;

♦возможно более полное использование пропускной способности линии;

♦экономичное регулирование скорости в широком диапазоне;

♦наименьший расход энергии на тягу поездов; ♦использование рекуперативного торможения;

♦наилучшее использование сил сцепления колесных пар с рельсами;

♦надежность в работе тяговых электродвигателей.

Как удовлетворяют этим требованиям тяговые электродвигатели последовательного, параллельного и смешанного возбуждения.

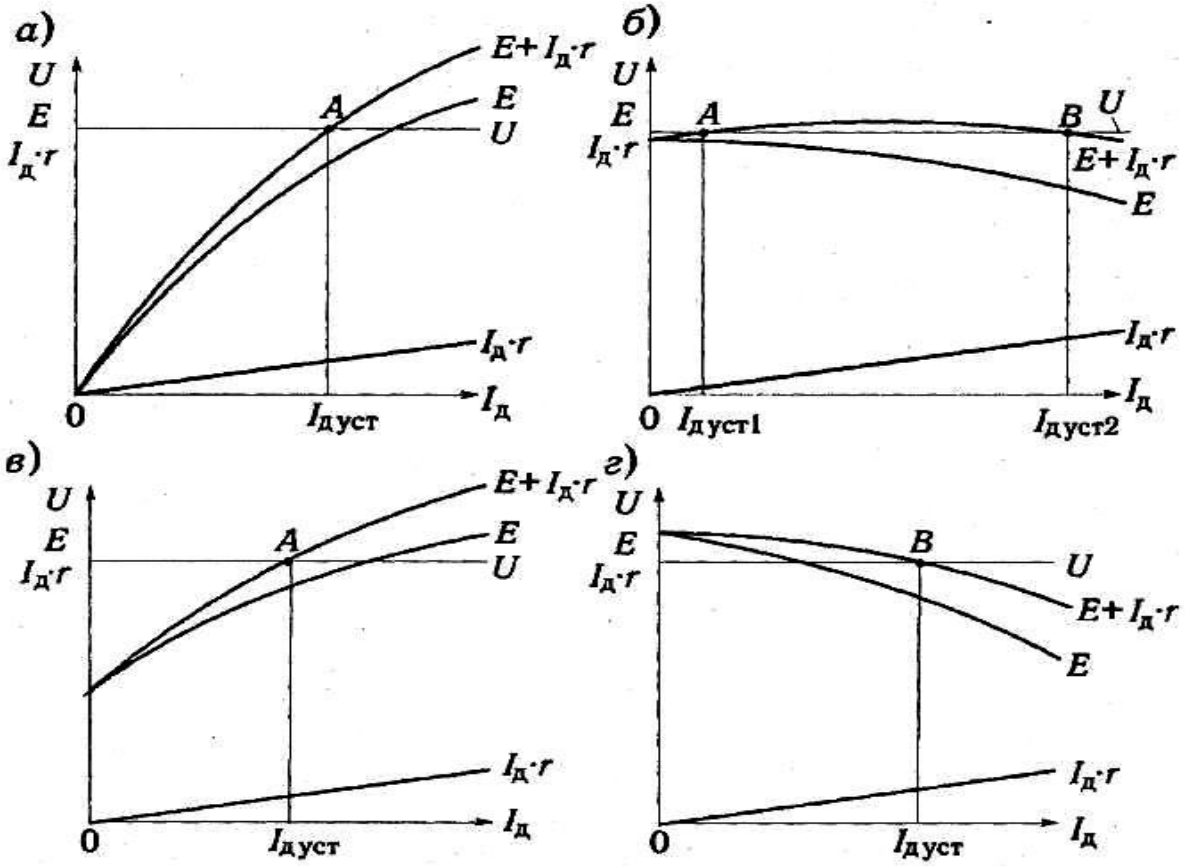


Рис. 2.11 Условия электрической устойчивости электродвигателей

Электрическая устойчивость. Под ***электрической устойчивостью*** понимают стремление электродвигателей к установившемуся току и автоматическому его восстановлению при малейших отклонениях. Это требование наиболее важным т.к. без электрической устойчивости электродвигатель не может устойчиво работать и не применяется на практике. Ее устанавливают в результате рассмотрения электрического равновесия в силовой цепи электродвигателя. Если электродвигатель подключен под напряжение $U_д$, то справедливо равенство (2.17). На рис. 2.11 показаны характеристики входящих в это уравнение напряжений и падения напряжения в функции тока $I_д$.

Быстро протекающие электрические процессы происходят при практически неизменной скорости, поэтому в соответствии с (2.16) ЭДС электродвигателя пропорциональна магнитному потоку.

На (рис. 2.11, а) показаны характеристики тягового электродвигателя последовательного возбуждения из которых видно, что установившийся режим соответствует точке А при котором выдержано равенство (2.17) $U_д = E + I_д r$.

Необходимо установить будет ли в этой точке устойчивый режим. Если ток $I_д$ окажется несколько ниже значения $I_{д\ уст}$, то подведенное напряжение окажется выше, чем ($E + I_д r$) и ток, равный из выражения (2.17):

$$I_д \uparrow \frac{U \downarrow E}{r},$$

будет возрастать до значения $I_{д\,уст}$.

В том случае, когда ток $I_д$ отклонится от значения $I_{д\,уст}$ в большую сторону напряжение **U** окажется ниже, чем (E + $I_д$ r), что вызовет уменьшение тока до значения $I_{д\,уст}$. Таким образом, есть стремление тока к установившемуся значению и электродвигатель последовательного возбуждения обладает электрической устойчивостью.

Из приведенных рассуждений видно, что требованию электрической устойчивости удовлетворяют графики, в которых значение (E + $I_д$r) возрастает с увеличением тока.

В электродвигателях параллельного или независимого возбуждения без компенсационной обмотки (рис. 2.11, **б)** магнитный поток, а, следовательно, и ЭДС несколько снижаются с увеличением тока $I_д$, а падение напряжения $I_д$r – возрастает. В точке **А** такой двигатель обладает электрической устойчивостью. В точке **В,** находящейся обычно за пределами рабочей зоны электродвигателя, такая устойчивость отсутствует. Так как, например с увеличением тока $I_д$ подведенное напряжение U будет больше, чем (E + $I_д$r), что вызовет новое увеличение тока и т.д. до срабатывания защиты. Случайное уменьшение тока $I_д$ приведет к дальнейшему его снижению.

Электродвигатель смешанного возбуждения с согласным включением обмоток параллельного и последовательного возбуждения, как видно из рис. 2.11, в электрически устойчив т.к. (E + $I_д$r) – возрастает с увеличением $I_д$.

В случае встречного включения обмоток параллельного и последовательного возбуждения электродвигателя смешанного возбуждения (рис. 2.11, г) значение (E + $I_д$r) уменьшается с повышением тока $I_д$. Такой электродвигатель в точке **В** не обладает электрической устойчивостью и работать в режиме двигателя не может.

Таким образом, в режиме тяги обладают электрической устойчивостью тяговые электродвигатели последовательного, параллельного или независимого возбуждения и электродвигатели смешанного возбуждения при согласном включении обмоток параллельного и последовательного возбуждения.

Механическая устойчивость. **Механической устойчивостью** называют стремление тягового подвижного состава к установившейся скорости движения и восстановление ее при всевозможных отклонениях.

Из механики известно, что установившаяся скорость движения наступает в случае равенства действующих на тело сил. В режиме тяги на поезд действуют сила тяги и силы сопротивления движению. Рассмотрим, какие характеристики силы тяги обеспечивают механическую устойчивость. Силы сопротивления движению W несколько возрастают с увеличением скорости движения (рис. 2.12).

На нем показаны также тяговые характеристики $F_K(v)$ при тяговых электродвигателях с разными системами возбуждения.

На (рис. 2.12, а) приведены тяговые характеристики тяговых электродвигателей последовательного возбуждения. В точке **А** силы F_K и W равны, но направлены в противоположные стороны, что соответствует установившейся скорости движения. Если скорость окажется выше установившейся, то, как видно из графиков, сила сопротивления движению окажется больше, чем сила тяги. Это приведет к снижению скорости. Когда скорость окажется ниже $v_{уст}$, сила тяги будет больше сил сопротивления движению и скорость будет возрастать.

Таким образом, имеется стремление к установившейся скорости и тяговый электродвигатель последовательного возбуждения обладает механической устойчивостью.

После проведения аналогичных исследований, не трудно видеть, что механической устойчивостью обладает тяговый подвижной состав с электродвигателями параллельного и независимого возбуждения (рис. 2.12, б), а также смешанного возбуждения при согласном включении обмоток параллельного и последовательного возбуждения (рис. 2.12, в). Тяговый подвижной состав с тяговыми электродвигателями смешанного возбуждения при встречном включении обмоток параллельного и последовательного возбуждения в точке установившегося режима **В** механической устойчивостью не обладает.

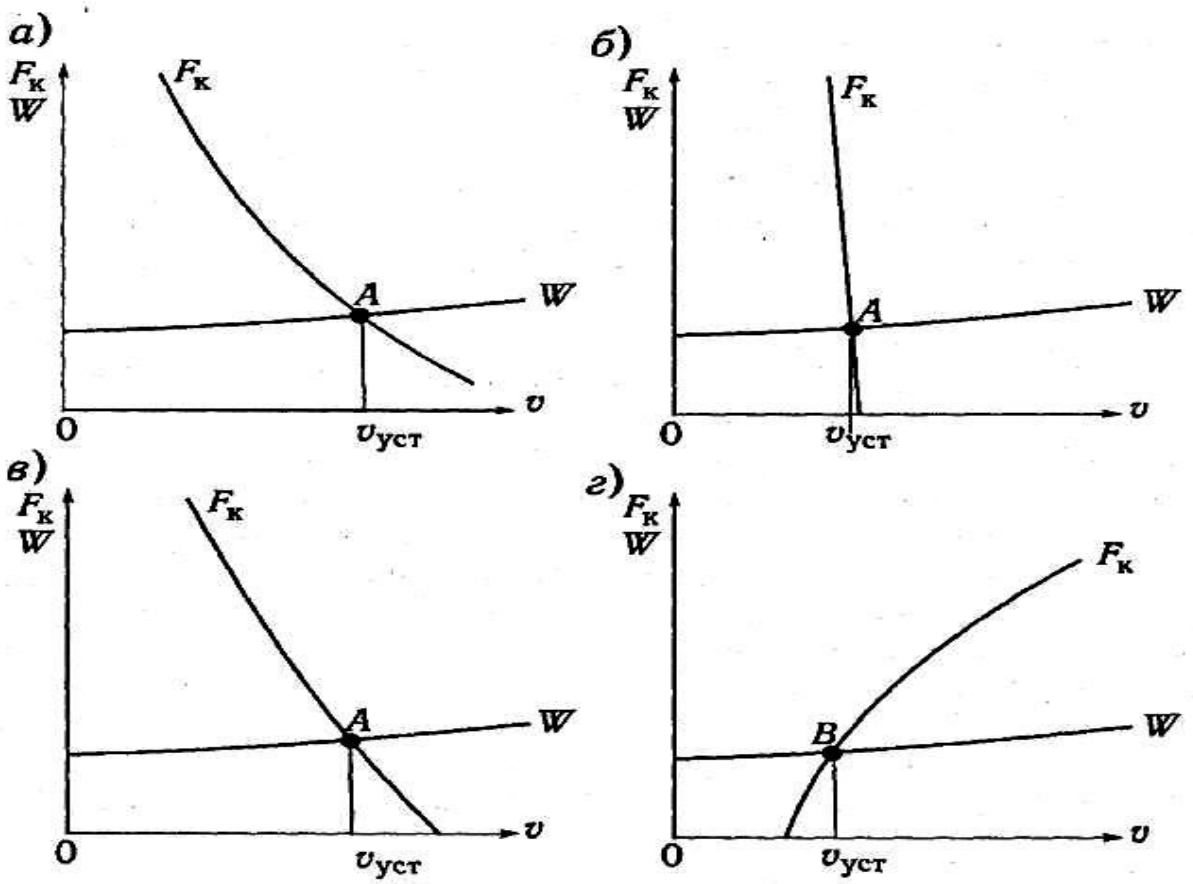


Рис. 2.12 Условия механической устойчивости тягового подвижного состава

Равномерное распределение нагрузки между тяговыми электродвигателями. Как правило, локомотивы имеют несколько тяговых электродвигателей, включенных в параллельные ветви. При изготовлении и ремонте неизбежны различные отклонения размеров деталей, технологии обработки и качества применяемых материалов в допустимых пределах. Поэтому скоростные и электротяговые характеристики каждого электродвигателя несколько отличаются от других. Разные колесные пары локомотива также могут иметь отклонения в диаметрах колес (см. раздел 1.5). Эти отклонения являются причиной неравномерного распределения нагрузок по параллельно включенным тяговым электродвигателям.

На рис. 2.13 показаны несовпадающие скоростные и электротяговые характеристики двух тяговых электродвигателей, имеющих индексы **1** и **2.** При одинаковых скоростях движения $\mathbf{v_1}$ разница в потребляемых токах $I_{д1}$, и $I_{д2}$ электродвигателей последовательного возбуждения (рис. 2.13, а) сравнительно невелика. У электродвигателей параллельного возбуждения (рис. 2.13, б) разница в токах в несколько раз больше. Силы тяги $F_{кд1}$ и $F_{кд2}$ при токах $I_{д1}$ и $I_{д2}$ электродвигателей последовательного возбуждения отличаются незначительно, а при параллельном возбуждении их расхождение в несколько раз больше. Таким

образом, мягкие характеристики электродвигателей последовательного возбуждения обеспечивают более равномерные нагрузки по сравнению с жесткими характеристиками двигателей параллельного возбуждения.

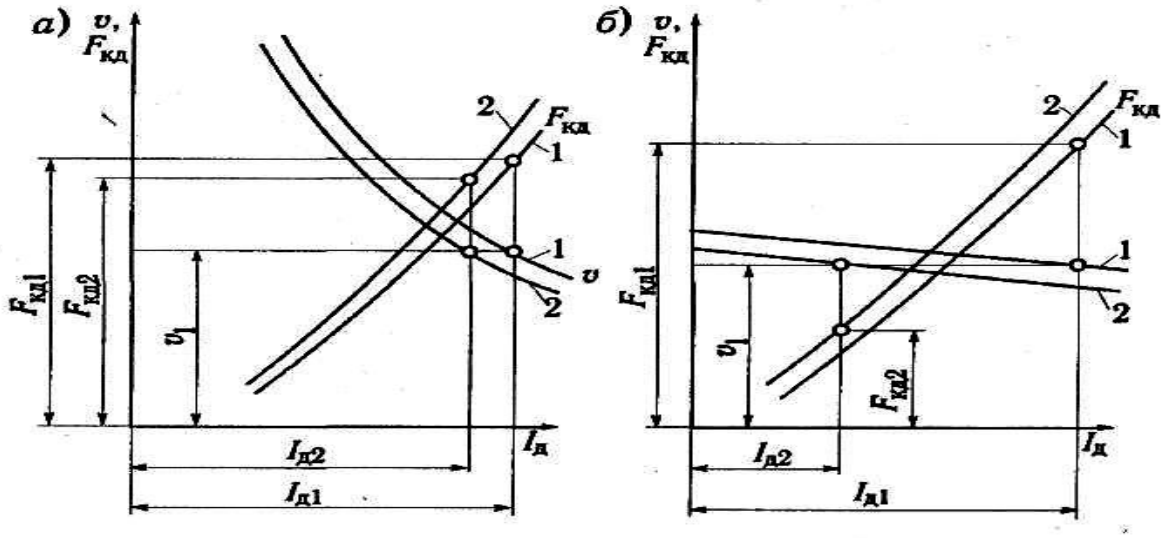


Рис. 2.13. Влияние расхождения характеристик и диаметров колесных пар на нагрузку параллельно включенных тяговых двигателей при последовательном (а) и параллельном (б) соединениях обмоток возбуждения

Изменение нагрузок тяговых электродвигателей электроподвижного состава при колебаниях напряжения в контактной сети. Как видно из формулы (2.15), скорость движения при одинаковых нагрузках зависит от напряжения на электродвигателе, которое определяется уровнем напряжения в контактной сети. Следовательно, при изменении напряжения в контактной сети изменяется и скоростная характеристика. На рис. 2.14 показаны две скоростные характеристики, одна из которых относится к напряжению U_1 а вторая – к U_2. Сила тяги от напряжения не зависит (она зависит в основном от тока и магнитного потока). Поэтому на рис.

2.14 показано по одной электротяговой характеристике.

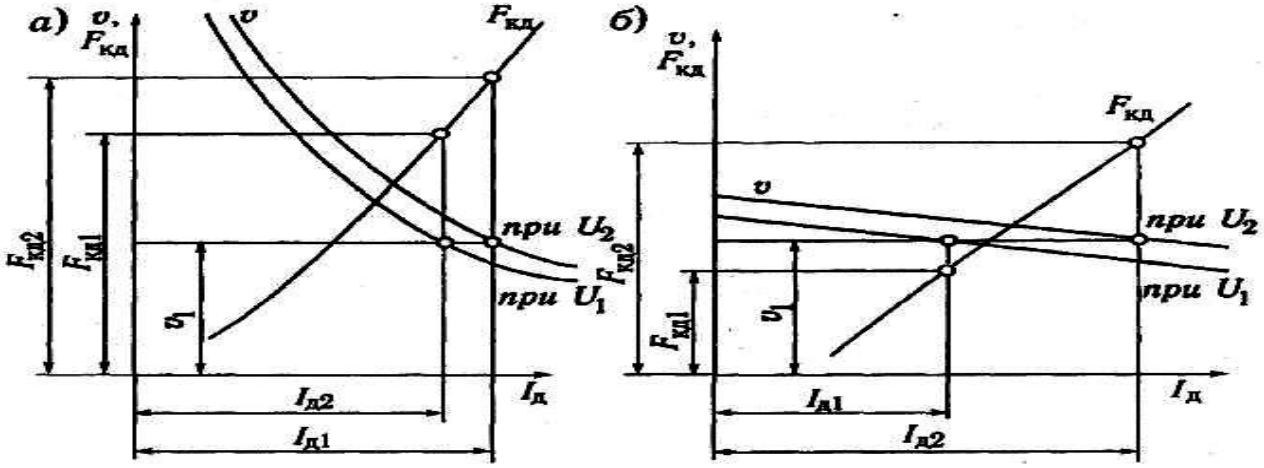


Рис. 2.14. Влияние изменения напряжения на нагрузку тяговых электродвигателей при последовательном (а) и параллельном (б) соединениях обмоток возбуждения

При работе тяговых электродвигателей по скоростной характеристике, соответствующей напряжению U_1 и скачкообразном изменении напряжения до U_2 переход на скоростную характеристику, соответствующую U_2, протекает по горизонтальной линии, так как скорость движения поезда за время скачка практически не изменится. При этом изменение тока от $I_{д1}$ до $I_{д2}$ электродвигателей последовательного возбуждения с мягкой характеристикой невелико (см. рис.2.14,а), а в двигателях параллельного возбуждения с жесткой характеристикой значительно. Соответственно и силы тяги $F_{кд1}$ и $F_{кд2}$ электродвигателей последовательного возбуждения изменяются мало, а электродвигателей параллельного возбуждения – много больше (рис.2.14, б).

Таким образом, колебания напряжения вызывают незначительные изменения нагрузок электродвигателей последовательного возбуждения. При параллельном возбуждении толчки тока и силы тяги получаются значительно больше и могут отразиться на плавности движения поезда.

Изменение мощности, потребляемой тяговыми электродвигателями, при движении по различным элементам профиля пути. В зависимости от условий движения поезда тяговые электродвигатели развивают разные мощности. При следовании по легким участкам профиля они работают с небольшими нагрузками и потребляемыми мощностями. В случае движения состава по подъему электродвигатели работают с большими нагрузками и мощностями. Если машинист не меняет режима ведения поезда, то при тяговых электродвигателях параллельного возбуждения из-за жестких характеристик скорость движения по подъему уменьшается незначительно, и развиваемая ими мощность, равная произведению скорости на силу тяги, возрастает почти пропорционально силе тяги.

Большая мощность, потребляемая только в отдельные моменты времени, когда поезд идет по тяжелому подъему, вызывает неоправданное удорожание системы электроснабжения вследствие необходимости установки более мощного оборудования на тяговых подстанциях и повышения площади сечения проводов контактной сети.

Тяговые электродвигатели последовательного возбуждения при повышении силы тяги снижают скорость движения (благодаря мягким характеристикам) и потребляемая ими мощность оказывается меньше, чем мощность двигателей параллельного возбуждения.

Таким образом, при движении поезда по тяжелым подъемам электродвигатели последовательного возбуждения потребляют из сети меньшие мощности, а следовательно, и токи по сравнению с двигателями параллельного возбуждения и равномернее нагружают систему электроснабжения.

Использование пропускной способности линии. Тяговые электродвигатели последовательного возбуждения обеспечивают движение по тяжелым подъемам с меньшими скоростями, чем на более легких участках пути. Участки с тяжелыми подъемами ограничивают число пропускаемых пар поездов. В случае применения электродвигателей параллельного возбуждения с жесткими характеристиками скорость движения поездов по всем элементам профиля пути будет примерно одинакова и на тяжелых подъемах больше, чем при двигателях последовательного возбуждения.

По условиям использования пропускной способности тяговые двигатели параллельного возбуждения имеют преимущество. Это достоинство жестких характеристик можно частично компенсировать при мягких характеристиках за счет использования машинистом ослабленного возбуждения.

Экономичное регулирование скорости движения. Скорость движения состава при установке на локомотивах электродвигателей параллельного и смешанного возбуждения можно легко регулировать изменением магнитного потока за счет воздействия на небольшой (по значению) ток возбуждения. В электродвигателях последовательного возбуждения регулирование магнитного потока требует усложнения силовой цепи и дополнительного оборудования (индуктивных шунтов, контакторов, резисторов) из-за больших токов, протекающих через обмотки возбуждения. Однако в этом случае требуется меньшее число ступеней регулирования благодаря мягким характеристикам и меньшим диапазонам регулирования скорости.

Расход энергии на тягу поездов. При постоянной скорости движения требуется совершать меньшую работу по перемещению поезда. Поэтому при использовании жестких характеристик двигателей параллельного возбуждения расходуется меньше электроэнергии. При мягких характеристиках

электродвигателей последовательного возбуждения скорость движения изменяется в широких пределах в зависимости от профиля пути. При равной средней скорости здесь требуется совершить большую работу и израсходовать несколько больше энергии. Это связано с тем, что силы сопротивления движению возрастают при повышении скорости более интенсивно, чем увеличивается скорость. Частично такой перерасход энергии компенсируется снижением потерь в пусковом реостате за счет более низких скоростей выхода на безреостатные характеристики.

Поэтому в пригородном движении с большим числом пусков и разгонов тяговые двигатели последовательного возбуждения имеют меньший расход энергии, а в условиях магистральных дорог – несколько больший по сравнению с двигателями параллельного возбуждения.

Использование рекуперативного торможения. Рекуперативное торможение позволяет уменьшить расход электрической энергии на тягу поездов, благодаря ее возврату в сеть при движении поезда по спуску или при снижении скорости движения. Тяговые электрические машины параллельного и смешанного возбуждения переходят в режим рекуперации (в генераторный режим с отдачей энергии в сеть) автоматически при увеличении скорости движения (выше скорости v_0 на рис.
2.10, б и в).

Тяговые электродвигатели последовательного возбуждения в режиме рекуперации устойчиво работать не могут. Поэтому на электровозах и моторных вагонах их переводят на независимое возбуждение от специального статического или вращающегося преобразователя, усложняя оборудование и схемы электроподвижного состава.

Условия сцепления колес с рельсами. Чтобы подробнее разобраться рассмотрим рис. 2.15, на котором построены кривые силы тяги на ободах колесной пары в зависимости от скорости при жесткой **3** и мягкой **2** характеристиках электродвигателей. Кривая **1** соответствует ограничению силы тяги по сцеплению $P_{сц}$. В точке **А** сила тяги реализуется на пределе по сцеплению, и поезд движется со скоростью v.

Если условия сцепления ухудшаются, например, при наезде колеса на масляное пятно, когда ограничение по сцеплению соответствует линии **4,** и сила сцепления снизится на $\Delta F_{сц}$, сила тяги окажется больше силы сцепления, и начнется проскальзывание колеса относительно рельса – боксование. При жесткой характеристике с увеличением скорости резко снижается сила тяги, и в точке **В** она сравняется с уменьшенной силой сцепления. На ободах колес скорость будет v_1 при скорости поезда v. Следовательно, колесная пара, кроме качения по рельсу, еще и скользит относительно рельса с небольшой скоростью Δv_1.

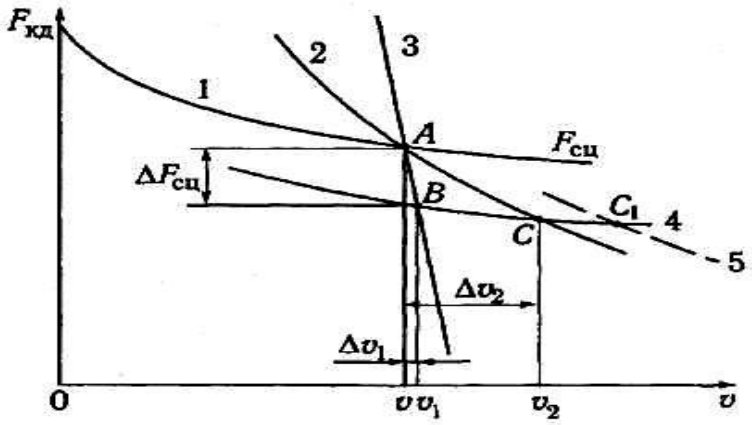


Рис. 2.15. Влияние жесткости характеристик на использование силы тяги по сцеплению

Сила трения проскальзывающей колесной пары уменьшается с увеличением скорости проскальзывания. При небольшой скорости скольжения Δv_1 коэффициент трения остается высоким (но меньшим коэффициента сцепления), и при проходе колесной парой места с пониженным сцеплением она может восстановить сцепление колес с рельсами. В аналогичном случае при мягкой характеристике сила тяги и пониженная сила сцепления сравняются в точке **C,** которой соответствует большее скольжение колес Δv_2 и соответственно меньший коэффициент трения. Вероятность самостоятельного восстановления сцепления после прохода места с пониженным сцеплением здесь значительно меньше.

Для прекращения боксования приходится подавать под колеса песок или снижать силу тяги.

В связи с тем, что в случае использования тяговых электродвигателей с жесткими характеристиками сцепление колесных пар с рельсами восстанавливается быстрее, среднее значение силы тяги по сцеплению, а следовательно, и коэффициент сцепления локомотива получается больше, чем при электродвигателях с мягкими характеристиками.

Таким образом, электродвигатели параллельного возбуждения обеспечивают более высокий коэффициент сцепления по сравнению с тяговыми электродвигателями последовательного возбуждения.

На силу тяги по сцеплению влияет также схема соединения электродвигателей. При параллельном соединении двух тяговых двигателей последовательного возбуждения процесс срыва сцепления идет аналогично рассмотренному. В случае последовательного соединения, например, двух электродвигателей с совпадающими характеристиками, напряжение U распределяется между ними поровну ($U_{д1} = U_{д2}$). Однако при срыве сцепления одной колесной парой, например первой, напряжения между двигателями,

связанными с боксующей и небоксующей колесными парами, перераспределяются.

Поскольку электродвигатели соединены последовательно, токи и магнитные потоки у них одинаковы. Однако боксующая колесная пара имеет большую скорость на ободе колеса и в обмотке якоря, связанного с ней электродвигателя, наводится большая ЭДС в соответствии с формулой (2.16). Следовательно, он работает под большим напряжением ($U_{д1} > U_{д2}$). Напряжение на втором электродвигателе при этом снижается, так как сумма $U_{д1}$ и $U_{д2}$ должна быть равна подведенному напряжению U.

Большему напряжению соответствует более высокая скоростная характеристика **5** (рис. 2.15), при работе по которой скорость скольжения колесной пары будет еще больше (точка C_1), а вероятность самостоятельного восстановления сцепления — еще меньше. Поэтому коэффициент сцепления локомотива при последовательном соединении электродвигателей меньше, чем при параллельном. На электровозах переменного тока тяговые электродвигатели включены параллельно между собой, а на локомотивах постоянного тока не менее двух электродвигателей – последовательно. Поэтому коэффициент сцепления электровозов переменного тока выше коэффициента сцепления электровозов постоянного тока.

Конструктивные особенности. Тяговые электродвигатели параллельного и смешанного возбуждения имеют на главных полюсах обмотки возбуждения, состоящие из большого числа витков провода малой площадью сечения. Механическая и электрическая прочность таких обмоток значительно меньше, чем обмоток с малым числом витков шины большой площадью сечения, которые установлены на электродвигателях последовательного возбуждения. В связи с малым числом витков обмоток полюсов электродвигателей последовательного возбуждения переходные процессы в них проходят более спокойно.

Таким образом, по надежности тяговые электродвигатели последовательного возбуждения имеют преимущества перед электродвигателями параллельного возбуждения.

Тяговые электродвигатели смешанного возбуждения по равномерности распределения нагрузок, влиянию изменения напряжения на нагрузку, изменению мощности в зависимости от профиля пути, влиянию на пропускную способность, по экономичности регулирования и расхода энергии на тягу поездов занимают промежуточное положение между электродвигателями последовательного и параллельного возбуждения.

Из анализа предъявляемых требований к тяговым двигателям видно, что каждая система возбуждения имеет свои преимущества и недостатки. Однако, по таким наиболее важным показателям, как равномерность распределения нагрузок,

меньшее изменение нагрузки при колебаниях напряжения в сети, меньшее изменение мощности при движении по различным элементам профиля пути и надежность конструкции, электродвигатели последовательного возбуждения обладают преимуществами. Поэтому их и используют для тяги поездов на железных дорогах. Чтобы устранить недостатки мягких характеристик – уменьшить число срывов сцепления колесных пар с рельсами – используют всевозможные противобоксовочные средства, а для обеспечения рекуперации переводят электродвигатели на независимое возбуждение, хотя при этом приходится усложнять оборудование электроподвижного состава.

2.6. Тяговые и удельные тяговые характеристики ЭПС

Скоростная и электротяговая характеристики позволяют определить силу тяги при данной скорости движения в такой последовательности: по скорости находят ток $I_д$, а по нему – силу тяги, развиваемую колесной парой. Однако для определения сил, действующих на поезд, необходимо установить силу тяги локомотива непосредственно от скорости движения. Для этого пользуются ***тяговой характеристикой,*** показывающей зависимость силы тяги локомотива F_K от скорости движения v. Ее строят по скоростной и электротяговой характеристикам следующим образом.

Силу тяги локомотива F_K в ньютонах, равную произведению силы тяги, реализуемой каждой колесной парой, на число движущих колесных пар или тяговых электродвигателей, определяют по формуле:

$$F_к = n_{кд}F_{кд}. \qquad (2.34)$$

где $n_{кд}$ – число движущих колесных пар.

Практически из электромеханических характеристик, отнесенных к ободу колеса (рис. 2.16, а), задаются током $I_{д1}$ и определяют скорость движения $\mathbf{v_1}$ и силу тяги $F_{кд1}$. Затем $F_{кд1}$ умножают на число тяговых электродвигателей или движущих колесных пар и вычисляют по формуле (2.34) силу тяги локомотива $F_{кд1}$. Значение скорости откладывают по оси абсцисс графика (рис. 2.16, б), а силу тяги $F_{кд1}$ – по оси ординат. Полученная точка с координатами v_1 и $F_{к1}$ находится на тяговой характеристике электроподвижного состава.

Аналогично, задавая токи $I_{д2}$, $I_{д3}$, находят скорости движения v_2, v_3, силы тяги $F_{кд2}$, $F_{кд3}$, а затем рассчитывают силы тяги $F_{к2}$, $F_{к3}$ и определяют точки для построения тяговой характеристики и т.д. Соединив полученные точки плавной кривой, получают тяговую характеристику. Обычно берут 8 ... 10 точек, причем на скоростных характеристиках их располагают чаще в местах резкого изменения направления линии и реже – при небольших изгибах характеристик с обязательным использованием точек, соответствующих номинальным (часовому и продолжительному) режимам.

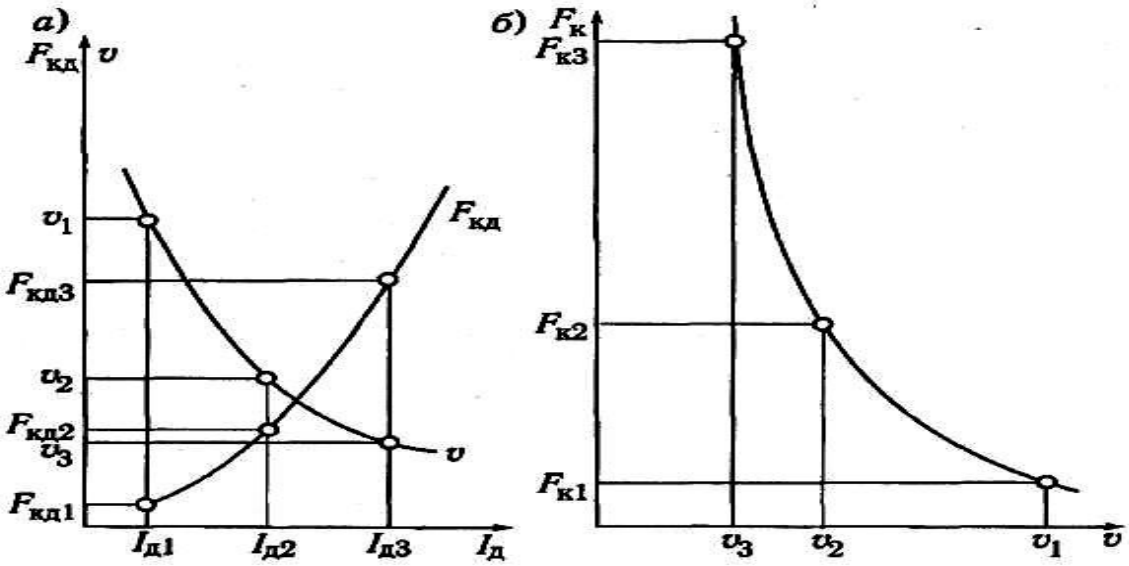


Рис. 2.16. Построение тяговой характеристики электроподвижного состава

Каждому способу возбуждения тягового электродвигателя соответствует своя тяговая характеристика, однако все они показывают снижение силы тяги F_K при увеличении скорости. На рис. 2.17 приведены тяговые характеристики электроподвижного состава при различных возбуждениях электродвигателей, отличающихся степенью снижения силы тяги с увеличением скорости движения, которую характеризует ***коэффициент жесткости характеристик.*** Тяговые характеристики, при которых сила тяги резко снижается с ростом скорости, называют ***жесткими*** (кривая **2**), а при небольшом снижении силы тяги – ***мягкими*** (кривая **1** или **1'** особенно в зоне малых сил тяги и больших скоростей).

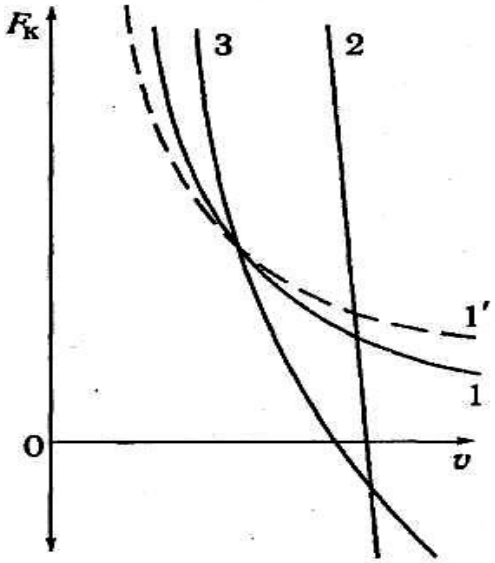


Рис. 2.17. Тяговые характеристики электроподвижного состава с электродвигателями различного возбуждения

Тяговые характеристики при использовании электродвигателей параллельного возбуждения жесткие. Тяговые характеристики при электродвигателях последовательного возбуждения имеют разную жесткость в зависимости от степени насыщения магнитной системы. При установке электродвигателей с **высоким** насыщением тяговые характеристики имеют большую жесткость, и в зоне высоких скоростей обеспечивают сравнительно небольшие силы тяги (кривая **1**). Значит, в этой зоне не полностью используется мощность электродвигателей. Поэтому у современных электродвигателей предусматривают сравнительно малое насыщение магнитной

системы и мягкие характеристики (кривая **1'**), позволяющие полнее использовать мощности в зоне высоких скоростей.

Тяговая характеристика при электродвигателях со смешанным возбуждением (кривая **3** на рис. 2.17) по своей жесткости занимает среднее положение между характеристиками электродвигателей параллельного и последовательного возбуждения.

Рабочая зона на тяговых характеристиках ограничивается условиями надежной работы электроподвижного состава. В зоне высоких скоростей тяговая характеристика (рис. 2.18) ограничена наибольшей допустимой (или конструкционной) скоростью движения (линия **1**). В зоне больших значений силы тяги она обычно ограничена или силой тяги, развиваемой электродвигателем при наибольшем допустимом токе по коммутации (кривая **2**), или по условиям сцепления колесных пар с рельсами (кривая **3**).

При больших токах ухудшается коммутация, вызванная недопустимым искрением под щетками, которое может перейти в круговой огонь по коллектору. Наибольший допустимый ток по коммутации при номинальном напряжении – это ток, который при стендовых испытаниях не вызывает опасного для работы электродвигателя искрения под щетками. В соответствии с ГОСТ 2582–81 установлен наибольший ток по коммутации для тяговых двигателей, равный их двойному номинальному (часовому) току ($2I_{дч}$).

В эксплуатационных условиях наибольший ток по коммутации понижают до (1,4...1,7) $I_{дч}$ в связи с более тяжелыми условиями работы электродвигателей по сравнению с работой на стенде вследствие динамических воздействий, колебаний напряжения сети, повышенной влажности воздуха и т.п. Ограничение силы тяги по коммутации определяют следующим образом: для заданного значения наибольшего тока по электротяговым характеристикам тягового двигателя определяют силу тяги $F_{кд}$, пересчитывают ее в $F_К$ и наносят на тяговую характеристику (линия **2**).

Сила тяги по сцеплению колес с рельсами зависит от нагрузки, передаваемой колесными парами на рельсы, условий сцепления и конструктивных особенностей электроподвижного состава. Ее определяют по формуле (1.14).

Из двух ограничений — по коммутации тяговых электродвигателей и сцеплению колес с рельсами действительным ограничением силы тяги на каждой тяговой характеристике или при одинаковых скоростях является та, которая имеет меньшее значение и располагается на графике $F_К(v)$ ниже.

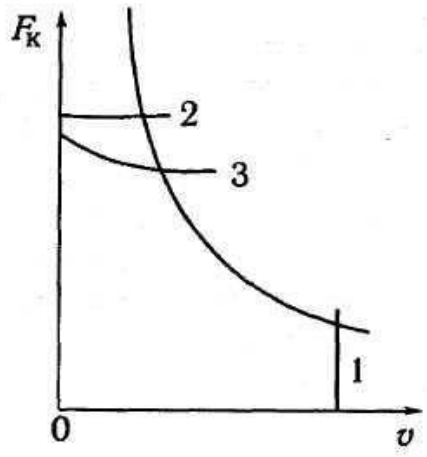


Рис. 2.18. Ограничения тяговых характеристик

Как правило, у грузовых электровозов наибольшая сила ограничивается сцеплением колес с рельсами, а у электропоездов и большинстве пассажирских электровозов — по коммутации тяговых электродвигателей.

В случае изменения передаточного отношения зубчатой передачи и диаметра бандажей изменяются и тяговые характеристики. Пересчет тяговых характеристик в этом случае можно выполнить, пользуясь перестроением электромеханических характеристик (см. раздел 2.3). Характеристики можно также перестроить, задаваясь значениями v и $F_{кд}$ при $\square_1$ и D_1, и пересчитывая их на $\square_2$ и D_2 по формулам (2.32) и (2.33). В этом случае вместо $F_{кд}$ в формулу (2.33) подставляют $F_К$.

Зависимость удельной силы тяги от скорости движения называют ***удельной тяговой характеристикой.*** Удельную силу тяги $f_к$ (Н/кН) определяют, зная силу тяги электровоза, тепловоза или моторного вагона и вес поезда mg, по формуле (1.2).

Удельную тяговую характеристику строят на основании тяговой характеристики. При этом для каждой скорости по тяговой характеристике определяют силу тяги $F_К$ и делят на вес поезда mg. Полученную точку, соответствующую значениям $f_{к1}$ и $\mathbf{v_1}$, наносят в осях координат $f_к$ и v. Для удобства выполнения последующих расчетов графическими методами построения выполняют во втором квадранте. По оси ординат откладывают скорость, а по оси абсцисс влево от точки пересечения осей – удельную силу тяги.

Значения $f_к$ для других скоростей движения определяют аналогично, а затем, соединив полученные точки плавной кривой, получают характеристику удельных сил тяги от скорости движения.

Тема 3
РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. Способы регулирования скорости движения

Локомотивы должны обеспечивать трогание поезда с места, разгон и движение с различными скоростями, ускорениями и замедлениями. Как видно из формулы (2.15), скорость движения определяется напряжением, подведенным к тяговым электродвигателям, падением напряжения в цепи и магнитным потоком. Разберем влияние каждого из этих факторов.

Номинальное напряжение в контактной сети постоянного тока, а следовательно, и на токоприемнике электроподвижного состава равно 3000 В. Тяговые электродвигатели изготавливают, как правило, на напряжение 1500 В с изоляцией обмоток на 3000 В. Поэтому под напряжение контактной сети можно включить последовательно не менее двух электродвигателей. Если установить последовательно большее число электродвигателей, напряжение на каждом из них будет меньше.

На восьмиосных электровозах ВЛ10, ВЛ11М, ЧС7 применяют три схемы соединения тяговых электродвигателей (рис. 3.1): последовательное или сериесное (**С**) восьми электродвигателей (см. рис. 3.1,а) с напряжением на каждом $U_д$ = 375 В; последовательно-параллельное (**СП**) по четыре электродвигателя последовательно в две параллельные ветви (см. рис. 3.1, б) с напряжением $U_д$ = 750 В и параллельное (**П**) соединение четырех групп электродвигателей по два двигателя последовательно (см. рис. 3.1, в) с напряжением $U_д$ = 1500 В.

На восьмиосных электровозах ВЛ11, в отличие от других электровозов, при нормальной работе используются последовательно-параллельное и параллельное соединение электродвигателей. Последовательное соединение применяют при ограничении скорости и маневровой работе.

На шестиосных электровозах ЧС2Т и ЧС2 применяют также три схемы соединения групп тяговых электродвигателей: последовательное шести электродвигателей с напряжением на каждом электродвигателе U 500 В, последовательно-
параллельное по три электродвигателя последовательно в две параллельные ветви с напряжением U = 1000 В и параллельное – по два электродвигателя в три параллельные ветви с напряжением U = 1500 В.

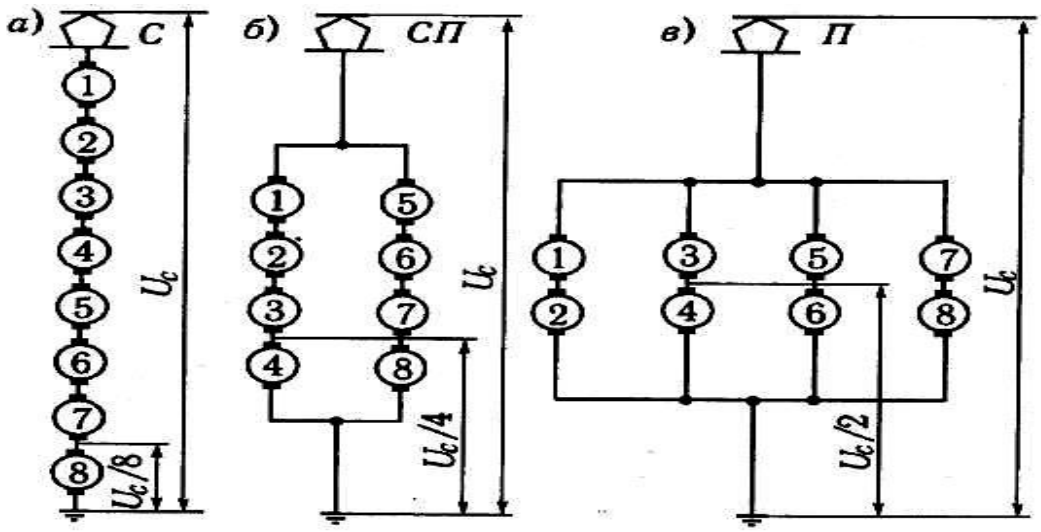


Рис. 3.1. Способы включения тяговых электродвигателей на восьмиосных электровозах при последовательном (а), последовательно-параллельном (б) и параллельном (в) соединениях

На четырехосных электровозах и электропоездах ЭР2 используют две схемы соединения: последовательное — с напряжением на каждом электродвигателе $U_д$ = =750 В и параллельное соединение электродвигателей, включенных по два последовательно в две параллельные ветви с напряжением $U_д$ = 1500 В. На электропоездах ЭД4, ЭД2Т, ЭР2Р, ЭР2Т тяговые электродвигатели рассчитаны на напряжение 750 В, поэтому применяют только последовательное их включение.

Перечисленные примеры показывают, что, изменяя схемы включения групп электродвигателей, можно подавать на них разные напряжения. Причем ступени напряжения получаются большими (более 375 В). Сравнительно плавное изменение напряжения получают при последовательном включении в цепь электродвигателей реостата R (рис. 3.2), сопротивление которого можно регулировать. Однако в реостате теряется много энергии, потребляемой из контактной сети, что вызывает снижение КПД электроподвижного состава. Кроме того, сам реостат нагревается до высоких температур. Поэтому его включают кратковременно только на период пуска и разгона электроподвижного состава и называют ***пусковым реостатом.***

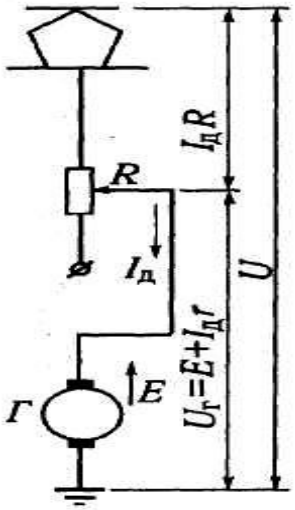


Рис. 3.2. Включение пускового реостата в цепь тягового электродвигателя

Магнитный поток можно регулировать, изменяя магнитодвижущую силу или магнитную проводимость. При неизменной магнитной проводимости на магнитный поток можно воздействовать, изменяя магнитодвижущую силу, равную произведению тока возбуждения на число витков обмотки возбуждения. Для регулирования скорости движения можно варьировать этот ток и

число витков. На электроподвижном составе и тепловозах с электродвигателями последовательного возбуждения применяют ***ослабление возбуждения***, чтобы увеличить скорость движения.

Наибольшее распространение получил способ ослабления возбуждения шунтированием обмоток возбуждения, при котором параллельно обмотке включают шунтирующий контур (рис. 3.3, а), состоящий из резистора $R_ш$ и индуктивного шунта **ИШ.** При этом через обмотку проходит только часть тока якоря $I_д$. Остальная его часть замыкается через шунтирующий контур. При меньшем токе возбуждения (по сравнению с током якоря) в магнитной системе наводится меньший магнитный поток, и, как следует из формулы (2.15), скорость при том же токе $I_д$ станет больше, чем в режиме ***полного возбуждения,*** при котором весь ток якоря протекает через обмотки возбуждения. Обычно сопротивление резистора $R_ш$ регулируют, в результате чего получают несколько ступеней возбуждения.

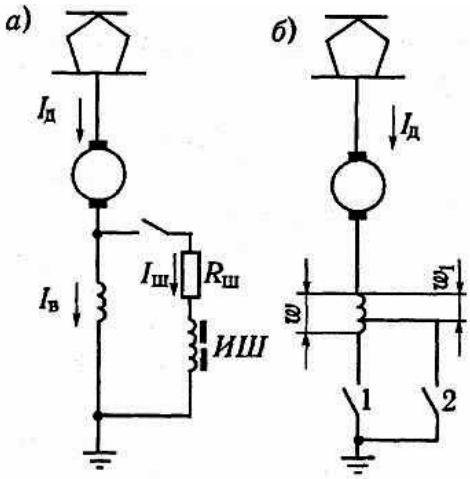


Рис. 3.3. Способы ослабления возбуждения тяговых электродвигателей: а — шунтированием обмотки возбуждения; б — отключением части витков обмотки возбуждения

Индуктивный шунт необходим для сохранения соотношения токов в обмотке возбуждения и шунтирующем контуре при переходных процессах. В самом деле, если бы не было в шунтирующем контуре индуктивного шунта, и индуктивное сопротивление контура было незначительным, возрастающий в цепи обмотки якоря ток в основном замкнулся бы через шунтирующий контур, чрезмерно ослабив возбуждение. Через обмотку возбуждения пройдет меньшая часть тока, так как в этой цепи он встретит большее индуктивное сопротивление.

Второй способ изменения возбуждения основан на отключении части витков катушек. Каждая катушка полюса тягового электродвигателя должна быть секционирована, и от нее нужно сделать дополнительные выводы (рис. 3.3, б). В режиме полного возбуждения включен контактор **1** и выключен контактор **2.** При этом ток проходит через все витки **w** обмотки возбуждения, магнитодвижущая сила — наибольшая. Чтобы получить режим ослабленного возбуждения, отключают контактор **1** и включают контактор **2.** Ток протекает только через часть витков w_1 катушек возбуждения, и магнитодвижущая сила, а следовательно, и магнитный поток оказываются меньшими.

Этот способ ослабления возбуждения не нашел применения на эксплуатируемых электроподвижном составе и тепловозах из-за усложнения конструкции электродвигателей, так как для каждой ступени ослабления

возбуждения необходимо добавлять по одному выводу от каждой катушки возбуждения, размещение которых в сжатых габаритах двигателя практически невозможно.

3.2. Характеристики при изменении напряжения на тяговых электродвигателях

Заданные электромеханические и тяговые характеристики для одного напряжения, соответствующего, допустим, параллельному соединению тяговых электродвигателей, могут быть пересчитаны на другое напряжение, например, при последовательном соединении. Такие же действия выполняют и в случае изменения напряжения контактной сети.

Порядок пересчета скоростной характеристики при изменении напряжения на тяговом электродвигателе с $U_{д1}$ до $U_{д2}$ следующий. Из формулы (2.15) определяют скорость электроподвижного состава при напряжении на электродвигателе $U_{д1}$ и токе $I_д$:

$$v_1 = \frac{U_{д1} - I_д^r}{СФ}.$$

Аналогично вычисляют скорость при том же токе $I_д$, а следовательно, и потоке Ф, но при напряжении $U_{д2}$:

$$v_2 = \frac{U_{д2} - I_д^r}{СФ}.$$

Разделив второе равенство на первое, получим:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{U_{д2} - I_д r}{U_{д1} - I_д r},$$

т.е. скорости пропорциональны электродвижущим силам двигателя. Отсюда следует:

$$v_2 = \frac{U^{д2} - I_д r}{U_{д1} - I_д r} v_1. \qquad (3.1)$$

Практически характеристики при изменении напряжения строят следующим образом. На заданной характеристике скорости при напряжении $U_{д1}$ (кривая **1**), выбирают ряд точек $\mathbf{a_1, a_2, ...}$ (рис. 3.4) и определяют их ординаты: $\mathbf{O_1a_1, O_2a_2, ...,}$ соответствующие скоростям движения электроподвижного состава при напряжении $U_{д1}$.

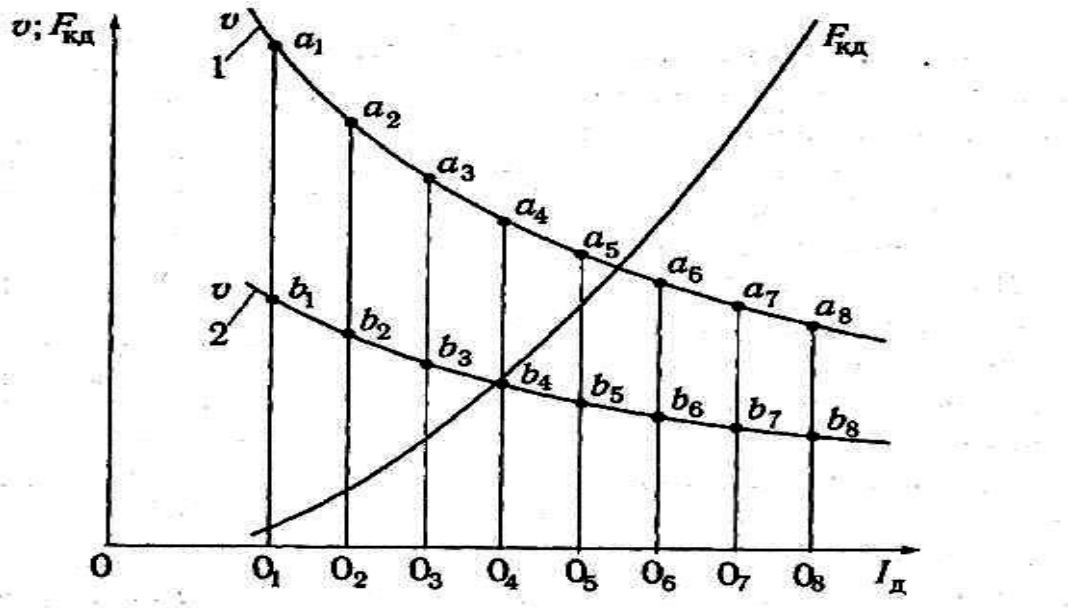


Рис. 3.4. Скоростные и электротяговая характеристики при различных напряжениях на тяговых двигателях

Для точного расчета рассчитывают падение напряжения в обмотках тягового электродвигателя $I_д r$ при каждом токе, а затем по формуле (3.1) – скорость при напряжении $U_{д2}$ для тех же токов. Полученные скорости в масштабе откладывают на оси ординат и устанавливают точки **b_1, b_2, b_3, ...** Соединив их плавной кривой, получают скоростную характеристику при напряжении $U_{д2}$ (кривая **2**).

Падение напряжения в тяговом электродвигателе, имеющем мощность в несколько сотен киловатт, по сравнению с номинальным напряжением, незначительно (2–4 %). Если им пренебречь, то из формулы (3.1) следует, что скорость движения при неизменной нагрузке примерно пропорциональна подведенному напряжению:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{U_{д1}}{U_{д2}}, \quad (3.2)$$

или

$$v_2 = v_1 \cdot U_{д2}/U_{д1}. \quad (3.3)$$

Чтобы качественно оценить процесс или приближенно рассчитать скорости, можно использовать формулу (3.3). Так, если напряжение $U_{д2}$ в два раза меньше $U_{д1}$, то ординаты точек **b_1, b_2, b_3, ...** примерно в два раза меньше ординат точек **a_1, a_2, a_3, ...**

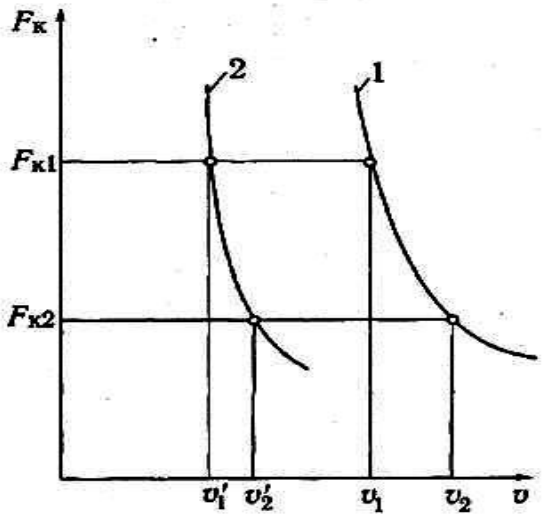


Рис. 3.5. Построение тяговой характеристики на измененное напряжение

Электромагнитная сила тяги на ободе колеса, как видно из формулы (2.26), не зависит от напряжения $U_д$. Силу тяги $F_{кд} \approx F_{кд\ эм} \approx \Delta F$ можно также считать не зависящей от напряжения $U_д$. Поэтому на рис. 3.4 показана одна электротяговая характеристика, по которой для каждого тока определяют силу тяги при напряжениях $U_{д1}$ и $U_{д2}$.

Тяговые характеристики ЭПС с двигателями последовательного возбуждения пересчитывают аналогично скоростным характеристикам. Так как практически сила тяги при неизменном токе не зависит от напряжения, при одной и той же силе тяги скорость определяют по формуле (3.1).

На рис. 3.5 показано перестроение тяговой характеристики **1,** соответствующей напряжению $U_{д1}$, на напряжение $U_{д2}$. При силе тяги $F_{к1}$ скорость движения v_1 снижается в соответствии с формулой (3.1) до v_1', при силе тяги $F_{к2}$ скорость уменьшается с v_1 до v'_2. По полученным таким образом восьми – десяти точкам строят тяговую характеристику при напряжении $U_{д2}$ (кривая **2**).

3.3. Характеристики при регулировании возбуждения

Степень изменения магнитного потока тягового электродвигателя характеризует ***коэффициент регулирования возбуждения,*** равный отношению магнитодвижущей силы главных полюсов при ослабленном возбуждении $I_в w_{ов}$ к магнитодвижущей силе при полном возбуждении $I_в w_{пв}$:

$$\beta = I_в w_{ов} / I_в w_{пв}.$$

В случае шунтирования обмотки возбуждения электродвигателя последовательного возбуждения ток $I_в$ меньше тока якоря $I_д$, а число витков неизменно, поэтому коэффициент β равен отношению тока возбуждения $I_в$ к току якоря $I_д$, т. е.

$$\beta = I_в / I_д.$$

Если возбуждение ослабляют изменением числа витков обмотки полюса, то коэффициент β определяют как отношение оставшейся части включенных витков w_1 к общему числу w. Коэффициент регулирования возбуждения иногда выражают также в процентах.

Степень ослабления возбуждения можно допускать до определенного предела, ниже которого нарушаются нормальные потенциальные условия на коллекторе тягового электродвигателя, что может привести к круговому огню. Обычно наименьший коэффициент регулирования возбуждения на электровозах составляет 0,3...0,5. В электродвигателях с компенсационной обмоткой можно допускать более глубокое ослабление возбуждения.

Скоростные и электротяговые характеристики тягового электродвигателя при неизменном напряжении и ослаблении возбуждения определяют, исходя из характеристик электродвигателя при полном возбуждении. Скорость движения при полном возбуждении $v_{пв}$ и токе $I_д$ для схемы на рис. 3.6, а вычисляют по формуле (2.15):

$$v_{пвIд} = \frac{U^д - I^д (r^o + r^в)}{C\Phi_{пвIд}}, \quad (3.4)$$

где $I_д$ – ток якоря при полном возбуждении $\beta = 1$; r_0 – сопротивление обмоток якоря, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки; $r_в$ – сопротивление обмотки возбуждения.

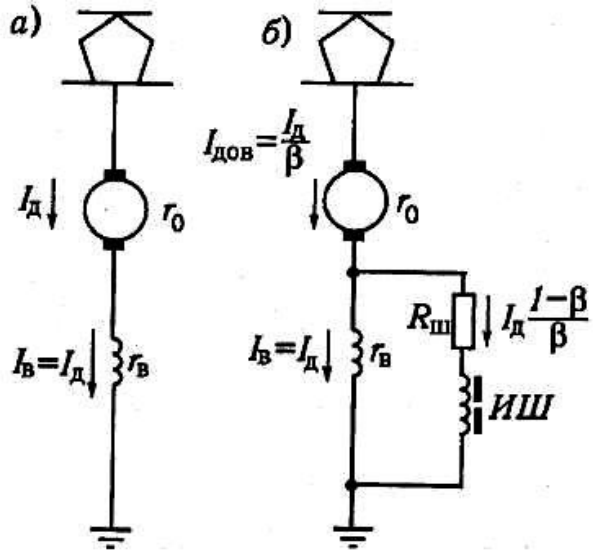


Рис. 3.6. Схема включения тягового электродвигателя: а — при полном возбуждении; б — при ослабленном

Скорость того же ЭПС при ослабленном возбуждении и токе $I_{д ов}$:

$$v_{оввI} = \frac{U_д - I_{д ов}(r_о + r_в)}{C\Phi_{овIд ов}}. \quad (3.5)$$

Сравнив формулы (3.4) и (3.5) при $I_д = I_{д ов}$ видно, что трудно определить отношение $v_{ов}/v_{пв}$, так как закон изменения магнитного потока от тока возбуждения не имеет простого аналитического выражения. Если же рассмотреть скорость $v_{ов}$ при токе якоря $I_{д ов} = I_д/\beta$ (рис. 3.6, б), которому соответствует ток в обмотке возбуждения:

$$I_в = I_{д ов} - I_д/\beta = I_д - I_д,$$

то при $I_{д ов} = I_д/\beta$: $I^д (r_0 + r_в)$

$$v_{овIд/\beta} = \frac{U_д}{C\Phi_{овIд/\beta}}. \quad (3.6)$$

где $\Phi_{овIд/\beta}$ – магнитный поток при ослабленном возбуждении и токе якоря $I_{дов}=I_д/\beta$.

После деления равенства (3.6) на равенство (3.4) и перенесения $v_{пвI_д}$ из знаменателя левой части в числитель правой получим скорость при ослабленном возбуждении: $I^д$ □$r_о$ □□$r_в$ □

$$U_д □ \overline{v}_{овI_д/□} □ □ □ СФ_{пвI_д} □v_{пвI_д},$$

$$U_д □ I_д □r_о □ r_в □ СФ_{овI_д/□}$$

где $v_{овI_д/□}$ □ скорость при токе электродвигателя $I_д/□$; $v_{пвI_д}$ □ при токе электродвигателя $I_д$.

Следовательно, для определения скорости при ослабленном возбуждении необходимо знать напряжение **$U_д$**, ток $I_д$, сопротивления обмоток тягового электродвигателя, магнитные или нагрузочные характеристики и скорость при полном возбуждении.

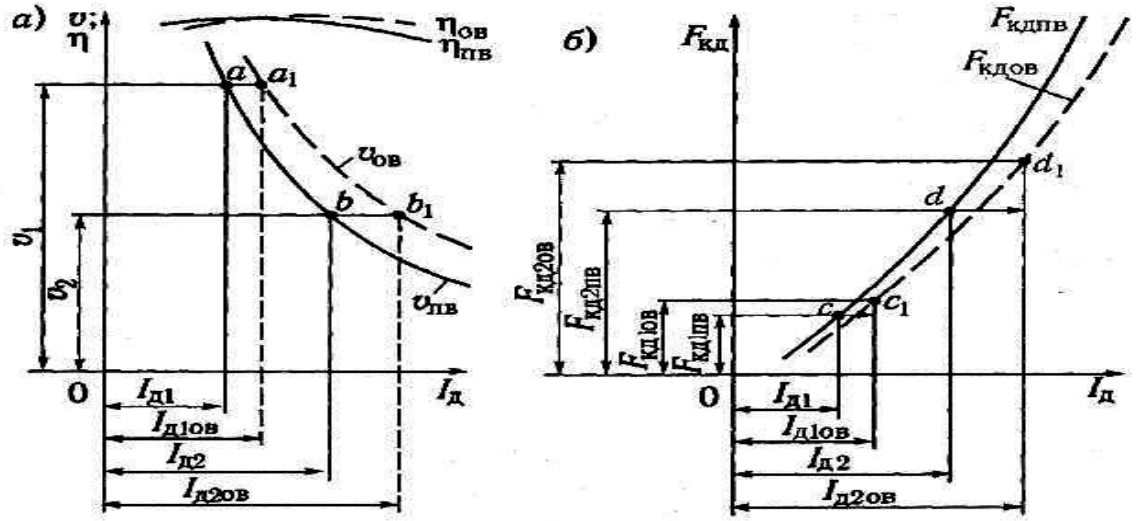


Рис. 3.7. Построение характеристик тягового электродвигателя при ослабленном возбуждении:
а — скоростной; б — электротяговой

При качественной оценке процессов или для приближенных расчетов можно пользоваться более простой формулой. Если пренебречь разницей в размагничивающем действии реакции якоря при токах якоря $I_д$ и $I_д/□$, то магнитные потоки $Ф_{пвI_д}$ и $Ф_{овI_д/□}$ будут равны, так как равны токи в обмотках возбуждения ($I_в$ = $I_д$). Падение напряжения в обмотках электродвигателя сравнительно невелико, и если пренебречь разницей в падении напряжения, указанной в числителе и знаменателе, то получим: $I^д$ □$r_о$ □□$r_в$ □

$$U_д □ —$$

$$——□—— □ СФ_{пвI_д} □1,$$

$$U_д □ I_д □r_о □ r_в □ СФ_{овI_д/□}$$

или $v_{овI_д/}$ □ $v_{пвI_д}$. (3.8)

Построение скоростной характеристики при ослабленном возбуждении из выражения (3.8) проводят следующим образом. На скоростной характеристике при полном возбуждении (**сплошная линия** на рис. 3.7, а) берут произвольную точку **a,** соответствующую скорости v_1 и току $I_{д1}$. На оси абсцисс откладывают ток $I_{д1\ ов}$ = =$I_{д1}$/□, и через эту точку проводят вертикальную штриховую линию. Поскольку скорость остается неизменной, точку **a,** соответствующую значениям $I_{д1}$ и v_1, сносят вправо до пересечения с вертикальной штриховой линией. Полученная точка $\mathbf{a_1}$, соответствующая скорости v_1 при токе $I_{д1\ ов}$, находится на скоростной характеристике электродвигателя при ослабленном возбуждении.

Аналогично для режима работы электродвигателя с другим током $I_{д2}$ (точка **b**) строят точку $\mathbf{b_1}$ при токе $I_{д2\ ов}$ и скорости v_2 в режиме ослабленного возбуждения и т.д. Кривая, проведенная через точки $\mathbf{a_1}$, $\mathbf{b_1}$ и другие точки, полученные так же, будет скоростной характеристикой тягового электродвигателя при заданном коэффициенте ослабления возбуждения. Эта кривая, как следует из формулы (2.15), расположена выше скоростной характеристики электродвигателя при полном возбуждении.

Подобный способ построения скоростной характеристики не учитывает изменение падения напряжения в обмотках электродвигателя и изменение магнитного потока при увеличении тока якоря (в некомпенсированном двигателе). Если же их учесть, то скоростная характеристика при ослабленном возбуждении будет несколько отличаться от найденной кривой. Однако это расхождение небольшое, и рассмотренный способ можно использовать для приближенных расчетов. Для более точного пересчета нужно использовать формулу (3.7).

Характеристики КПД при полном и ослабленном возбуждениях тягового электродвигателя, как видно из (рис. 3.7, а), пересекаются между собой. В зоне больших токов нагрузки КПД при ослабленном возбуждении выше, чем при полном за счет меньших электрических потерь. При малых токах КПД при ослабленном возбуждении ниже, чем при полном, вследствие более высоких значений механических потерь, вызванных большей скоростью движения.

Силу тяги $F_{кд\ ов}$ при ослабленном возбуждении также определяют по силе тяги при полном возбуждении $F_{кд\ пв}$ (рис. 3.7, б). Силу тяги в ньютонах при полном возбуждении $F_{кд\ ов}$ и токе $I_д$ вычисляют из уравнения (2.31):

$$F_{кд\ пвI_д} \approx 3{,}6 \frac{U_д I_д}{v_{пвI_д}} \eta_{пвI_д}, \quad (3\ 9)$$

где $v_{пвI_д}$ □ скорость при токе $I_д$ и полном возбуждении; $\eta_{пвI_д}$ □ КПД элек-

тровоза при токе $I_д$ и полном возбуждении.

Аналогично определяют силу тяги при ослабленном возбуждении $F_{кд\ ов}$ и токе $I_{д\ ов} = I_д/□$:

$$F_{кд\ овIд/□} □ 3{,}6 [\frac{U_д I_д /□}{v_{овIд}} [□_{овIд/□}, \quad (3.10)$$

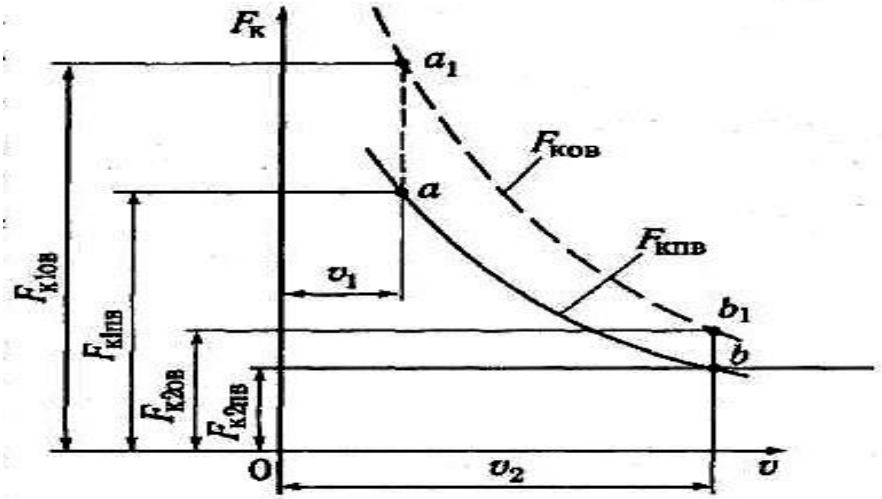


Рис. 3.8. Построение тяговой характеристики при ослабленном возбуждении

где $v_{овIд/□}$ □ скорость при ослабленном возбуждении и токе $I_{д\ ов} = I_д/□$; $□_{овIд/□}$ □ КПД при тех же условиях.

Поделив выражение (3.10) на выражение (3.9), получим:

$$F_{кд\ овIд/□} □ 1 □ v_{пвIд} □ □_{овIд/□},$$

$$F_{кд\ пвIд} □ v_{овIд/□} □_{пвIд}$$

откуда 1 $v_{пвIд}$ $□_{овIд/□}$ $F_{кд}$ $_{пвIд}$.

$$\_ \quad \_\_\_\_\_ \quad \_\_\_\_\_ \quad (3.11)$$

$$F_{кд\ овIд/□} □ □ □ □$$

$$□ v_{овIд/□} □_{пвIд}$$

Из выражения (3.8) следует, что скорость $v_{ов}$ при токе $I_д/□$ примерно равна скорости $v_{пв}$ при токе $I_д$. Считая их равными между собой, и пренебрегая разницей в КПД $□_{ов}$ при $I_д/□$ по сравнению с $□_{пв}$ при $I_д$, составляющей не более 1 %, получаем простую формулу для приближенных расчетов:

$$1$$

$$F_{кд\ овIд/□} □ \_ □ F_{кд\ пвIд}. \quad (3.12)$$

Иными словами, сила тяги при ослабленном возбуждении и токе якоря $I_д$ /□ в 1/□ раз больше силы тяги при полном возбуждении и токе $I_д$.

Кривую силы тяги $F_{кд\ ов}$ при ослабленном возбуждении строят следующим образом. Точку, расположенную на кривой силы тяги $F_{кд\ пв}$ при полном возбуждении, с координатами $I_{д1}$ и $F_{кд1\ пв}$ (точка **С** на рис. 3.7, б) переносят вправо до линии, соответствующей току $I_{д1\ ов}$ =$I_{д1}$ /□, а затем перемещают ее вверх по линии $I_{д1\ ов}$ до значения силы тяги $F_{кд\ пв}$ /□ (точка $\mathbf{C_1}$). Подобным образом находят другие точки ($\mathbf{d_1}$ и т.д.) и, соединив их плавной кривой, получают характеристику касательной силы тяги колесной пары при ослабленном возбуждении (**штриховая линия,** проходящая через точки $\mathbf{c_1}$, $\mathbf{d_1}$). Эта линия расположена ниже характеристики силы тяги при полном возбуждении. Для более точного построения харки при ослабленном возбуждении используют формулу (3.11).

На электровозах ВЛ10, ВЛ11, ВЛ11М с тяговыми электродвигателями ТЛ2К предусмотрены четыре ступени ослабления возбуждения:□$_1$= 0,75; □$_2$ = 0,55; □$_3$= 0,43; □$_4$ = 0,36. На электропоездах ЭР2 с тяговыми электродвигателями УРТ110 – две ступени:□$_1$= 0,67 и □$_2$ □ 0,50. Электропоезда ЭД4М, ЭД4, ЭР2Р, ЭР2Т имеют шесть ступеней ослабления возбуждения до □= 0,2.

Тяговую характеристику локомотива при ослабленном возбуждении получают, перестраивая тяговую характеристику при полном возбуждении приближенным методом без построения промежуточных электромеханических характеристик в следующем порядке. Возьмем произвольную точку **а** на тяговой характеристике электровоза или моторвагонного поезда при полном возбуждении, которой соответствует скорость v_1 и сила тяги $F_{к1\ пв}$ (рис. 3.8). В соответствии с приведенными рассуждениями в режиме ослабленного возбуждении при той же скорости сила тяги всех электродвигателей $F_{к1пв}$ возрастает до $F_{к1\ пв}$/□. На рис. 3.8 показано перемещение точки **а** вверх (по ординате) до точки $\mathbf{a_1}$, соответствующей силе тяги $F_{к1\ пв}$/□ = $F_{к1\ ов}$. Рассуждая аналогично, точку **b,** соответствующую скорости $\mathbf{v_2}$ и силе тяги $F_{к2\ пв}$, нужно перенести в положение $\mathbf{b_1}$, соответствующее силе тяги $F_{к1\ пв}$/□ = $F_{к1\ ов}$. Найдя ряд других точек и, соединив их кривой, получают тяговую характеристику локомотива при ослабленном возбуждении (**штриховая линия,** проходящая через точки $\mathbf{a_1}$, $\mathbf{b_1}$).

Чтобы более точно пересчитать тяговую характеристику локомотива, используют электромеханические характеристики тяговых электродвигателей при ослабленном возбуждении, снятые в процессе испытания электродвигателей или

пересчитанные с характеристик при полном возбуждении точным методом по формуле (3.11).

3.4. Процесс изменения скорости при скачкообразном изменении напряжения и включении ступени ослабления возбуждения

Изменение напряжения на электродвигателе и ослабление возбуждения вызывают изменение нагрузки, так как скорость движения мгновенно измениться не может вследствие большой массы поезда. Рассмотрим влияние мгновенного увеличения напряжения на изменение скорости поезда в случае движения по участку с постоянным планом и профилем пути.

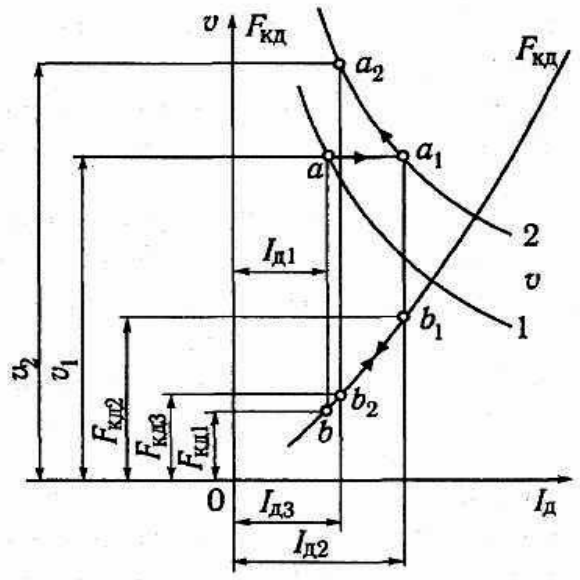


Рис. 3.9. Последовательность изменения режимов работы тягового электродвигателя при скачкообразном изменении напряжения

Предположим, что электродвигатель работает при напряжении $U_{д1}$, которому соответствует скоростная характеристика **1** (рис. 3.9). Установившийся режим его работы определяется неизменной скоростью v_1, током $I_{д1}$ и силой тяги $F_{кд1}$ (точки **a** и **b**). Установившаяся скорость движения по законам механики может быть только в том случае, когда сумма действующих сил на поезд равна нулю или (в нашем случае) когда сила тяги $F_{кд1}$, умноженная на число сцепных осей, уравновешивает силы сопротивления движению поезда.

При установившейся скорости напряжение на тяговом электродвигателе в соответствии с формулой (2.17) уравновешивается ЭДС и падением напряжения в его обмотках. При повышении напряжения до $U_{д2}$, которому соответствует скоростная характеристика **2,** нарушаются баланс напряжения, ЭДС и падения напряжения в обмотках электрической машины. В первый момент ЭДС не изменяется, так как скорость движения и магнитный поток остаются практически постоянными. Повышенная разность между более высоким напряжением $U_{д2}$ и неизменной ЭДС компенсируется увеличением тока $I_д$. Оно вызывает появление ЭДС самоиндукции, которая также компенсирует в переходной период повышенную величину $U_д - C\Phi v$.

На графике изменение режима работы электродвигателей происходит по горизонтальной линии $\mathbf{aa_1}$ при неизменной скорости и изменении тока с $I_{д1}$ до $I_{д2}$. При увеличении тока возрастает магнитный поток, а в соответствии с формулой

(2.27) возрастает и сила тяги с $F_{кд1}$ до $F_{кд2}$ (от точки **b** до точки $\mathbf{b_1}$), нарушая равновесие сил, действующих на поезд. Сила тяги превышает по значению силы сопротивления, поэтому скорость движения начинает увеличиваться. Скорость нарастает медленнее по отрезку кривой $\mathbf{a_1a_2}$ характеристики **2.** С ее повышением снижается ток $I_д$ и по кривой $\mathbf{b_1b_2}$ уменьшается сила тяги.

Нарастание скорости v и снижение силы тяги $F_{кд}$ будут продолжаться до нового установившегося режима, который наступит при равновесии сил тяги и сил сопротивления движению поезда. Такое равновесие будет при силе тяги, немного превышающей силу $F_{кд1}$, так как сопротивление движению при большей скорости будет иметь несколько большее значение.

Новому установившемуся режиму соответствует сила тяги $F_{кд3} > F_{кд1}$. При этом установится ток $I_{д3}$ и скорость v_2. Однако разница между силами $F_{кд3}$ и $F_{кд1}$, а следовательно, и между токами $I_{д3}$ и $I_{д1}$ незначительна. Поэтому можно считать, что изменение напряжения в контактной сети вызовет изменение скорости, а сила тяги и ток тяговых электродвигателей будут иметь первоначальное значение (до изменения напряжения). Если напряжение на электродвигателях уменьшится, то процесс будет протекать аналогично рассмотренному, но в сторону уменьшения скорости v.

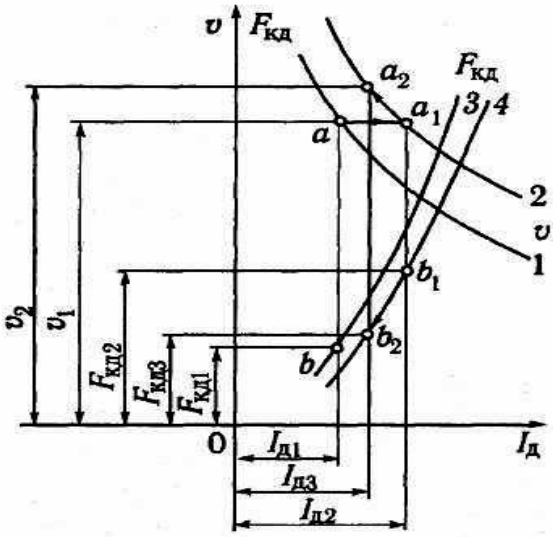


Рис. 3.10. Последовательность изменения режимов работы тягового электродвигателя при включении ослабления возбуждения

Последовательность изменения режима работы электродвигателя при ослаблении возбуждения показана на рис. 3.10. При полном возбуждении электродвигатель работает по скоростной характеристике **1** и характеристике силы тяги **3.** Установившийся режим работы соответствует точкам **a** и **b** и характеризуется скоростью v_1, током $I_{д1}$, и силой тяги $F_{кд1}$.

При постоянном напряжении $U_д$ и ослаблении возбуждения режим работы электродвигателя изменится. Включение параллельно обмотке возбуждения шунтирующего контура при практически неизменных скорости движения и магнитном потоке вызывает уменьшение сопротивления цепи тягового электродвигателя. Вследствие этого нарушается баланс напряжения, ЭДС и падения напряжения в обмотках, что вызывает увеличение тока $I_{д1}$ до $I_{д2}$. Изменение режима соответствует переходу из точки **a** на характеристике полного возбуждения в точку $\mathbf{a_1}$ на кривой **2** ослабленного возбуждения. Сила тяги

возрастает до $F_{кд2}$ в точке **b_1** на кривой **4,** соответствующей ослабленному возбуждению.

Сила тяги $F_{кд2}$, умноженная на число электродвигателей, будет больше сил сопротивления движению, и поезд начнет увеличивать скорость. С ростом скорости ток электродвигателя, а следовательно, и магнитный поток уменьшатся, и соответственно сила тяги снизится по характеристике **4.** Новое равновесное состояние наступит в точке **b_2.** При этом силы сопротивления движению поезда, несколько возросшие с увеличением скорости, уравновесятся силой тяги электроподвижного состава, равной $F_{кд3}$, умноженной на число электродвигателей. Силе тяги $F_{кд3}$ соответствует ток $I_{д3}$, а следовательно, и скорость v_2 (точка **a_2**).

Как уже указывалось, скорость поезда изменяется сравнительно медленно, и до момента установления новой скорости обычно успевают измениться напряжение на электродвигателе, профиль пути и т.п. Поэтому установившийся режим работы электродвигателей бывает очень редко. Чаще скорость движения или увеличивается, или уменьшается в зависимости от профиля пути и действий машиниста.

3.5. Пуск и разгон электроподвижного состава

Тяговые электродвигатели в период пуска должны обеспечить плавное трогание, а затем разгон электроподвижного состава с различными ускорениями. Изменение схем соединения тяговых электродвигателей вызывает изменение напряжения и тока $I_д$ слишком большими ступенями и не обеспечивает плавный пуск. Поэтому на каждом соединении тяговых электродвигателей в их цепь включают пусковой реостат, сопротивление которого можно изменять мелкими ступенями и ограничивать броски тока $I_д$. Подведенное напряжение (см. рис. 3.2) уравновешивается ЭДС тягового электродвигателя и падением напряжения в его обмотках и в реостате:

$$U = E + I_д(r + R),$$

где R – сопротивление реостата.

Так как ЭДС E = CΦv, выражение для скорости имеет вид:

$$v = \frac{U - I_д(r + R)}{C\Phi}. \qquad (3.13)$$

Отсюда видно, что при одном и том же напряжении U, токе $I_д$ и магнитном потоке Ф при большем сопротивлении реостата R установившаяся скорость становится меньше. Следовательно, реостатные характеристики $U(I_д)$ располагаются тем ниже, чем большее сопротивление реостата R включено в цепь.

Из формулы (3.13) определяют ток:

$$I_д \quad \square \quad \_\_\_\_\_ U \quad \square C\Phi v.$$

(3.14) r □ R

В момент трогания с места при v = 0, а следовательно, и СФv = 0 ток тягового электродвигателя $I_д = U/(R + r)$. Поэтому ток в момент трогания определяется напряжением U, сопротивлениями реостата R и обмоток тягового электродвигателя r.

При пуске сила тяги должна нарастать, по возможности, плавно, без больших толчков. Поэтому сопротивление R реостата должно быть подобрано так, чтобы обеспечить в первый момент небольшой ток электродвигателей и малую силу тяги F_K для плавного нарастания натяжения автосцепных устройств. Затем для увеличения тока, а значит, и силы тяги сопротивление реостата нужно постепенно уменьшать. Когда сила тяги превысит силы сопротивления движению, поезд начнет двигаться с некоторым ускорением. При увеличении скорости движения в тяговом электродвигателе будет наводиться возрастающая ЭДС. Ток $I_д$, как видно из выражения (3.14), а следовательно, и сила тяги будут уменьшаться, вследствие чего ускорение движения также уменьшится.

Таким образом, при постоянном сопротивлении реостата в цепи электродвигателей ускорение не будет постоянным. Для получения постоянного ускорения нужно одновременно с изменением скорости движения изменять и сопротивление так, чтобы ток $I_д$, а следовательно, и сила тяги $F_{кд}$ оставались постоянными.

Из выражения (3.14) получим необходимое сопротивление реостата при пусковом токе $I_{дп}$:

$$R \square \_\_\_\_\_ U \quad \square C\Phi v \quad \square r. \qquad (3.15)$$

$$I_{д\,п}$$

Отсюда видно, что при неизменных напряжении U, пусковом токе $I_{дп}$ и магнитном потоке Ф зависимость сопротивления R реостата от скорости v представляет собой прямую линию. Для построения этой зависимости нужно иметь две точки, которые находят из следующих условий. В момент трогания, когда скорость v = 0, сопротивление вычисляют так:

$$R = (U/I_{д\,п}) - r. \qquad (3.16)$$

Из этого выражения находят первую точку прямой R(v). Вторую точку определяют при скорости выхода на ходовую характеристику, когда пусковой реостат должен быть выведен из цепи, т.е. R = 0.

В системе координат v и $I_д$ показана скоростная характеристика тягового электродвигателя и указан пусковой ток $I_{дп}$. Систему координат R и v размещают во втором квадранте так, чтобы ось сопротивления R реостата была направлена влево, как показано на рис. 3.11. Сопротивление R_1 реостата при скорости v = 0 определяют по формуле (3.16), и находят первую точку **b** искомой прямой. Вторая точка **c** находится на оси **v** при скорости v_a. Прямая **bc** показывает, что для сохранения постоянного значения тока $I_{дп}$ необходимо плавное уменьшение сопротивления пускового реостата с увеличением скорости v.

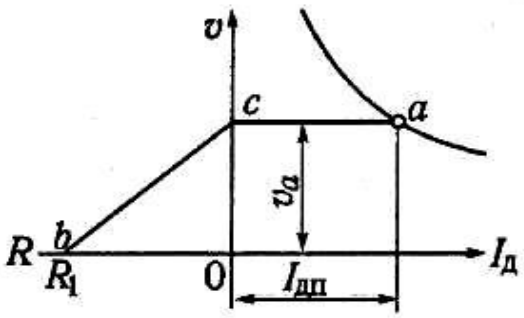


Рис. 3.11. Зависимость изменения сопротивления реостата от скорости движения при постоянном пусковом токе $I_{дп}$

Однако из-за больших мощностей тяговых электродвигателей и значительных токов пускового реостата осуществить плавное изменение сопротивления R реостата нельзя. Поэтому на электроподвижном составе применяют ступенчатый вывод отдельных секций реостата. Делают это так: при уменьшении тока до какого-то значения выключают ступень реостата. Тогда ток $I_д$ резко возрастает и вызывает соответствующее увеличение силы тяги. Под действием повышенной силы тяги скорость движения будет возрастать. Одновременно будет увеличиваться ЭДС. Последняя снова вызовет уменьшение тока. Для нового повышения тока необходимо выключить следующую ступень реостата и т.д.

Чтобы добиться плавного пуска и уменьшить колебания силы тяги $F_{кд}$ и тока $I_д$, сопротивление реостата в цепи электродвигателя нужно уменьшать небольшими ступенями. При этом требуется большее число ступеней пускового реостата, что усложняет электрические цепи и увеличивает число контакторов. Поэтому на практике ступени пускового реостата рассчитывают, задаваясь током $I_{дп}$ (или максимальным током электродвигателя $I_{д\ max}$) и допустимыми изменениями тока при переходе с одной ступени на другую, которые характеризуются ***коэффициентом неравномерности пускового тока:***

$$к_н = \frac{I_{д\ max} - I_{д\ min}}{2I_{д\ п}}, \qquad (3.17)$$

где $I_{д\ min}$ – минимальный ток перед выключением ступени пускового реостата.

Средний ток при пуске:

$$I_{д\ п} = (I_{д\ max} + I_{д\ min})/2. \qquad (3.18)$$

Из выражений (3.17) и (3.18) задаваясь значениями $к_н$ и $I_{дп}$ находят значения $I_{д\,min}$ и $I_{д\,max}$.

Коэффициент $к_н$ для электровозов принимают равным 0,04...0,08. Для электропоездов с ускорением – до 0,4...0,5 м/с^2, где допускается большая неравномерность силы тяги и тока при разгоне, коэффициент $к_н$ берут больше – до 0,15, а при ускорении 0,6...0,7 м/с^2 – до 0,08...0,1.

Обычно пусковой ток выбирают из условия использования наибольшего допустимого тока тяговых двигателей или из условия реализации наибольшей силы тяги по сцеплению колес с рельсами. С учетом работы электродвигателей в эксплуатации и необходимого запаса по надежной коммутации принимают $I_{дп}$ = 1,3...1,5 $I_{дч}$ и соответственно $I_{д\ max}$ = 1,5...1,7 $I_{дч}$; где $I_{дч}$ – ток номинального часового режима электродвигателя, А.

В случае ограничения по сцеплению среднее значение силы тяги определяют по формуле:

$$F_{кд\,п} = 1000 m_{ло} g \psi_к ,$$

где $m_{ло}g$ – средняя нагрузка от колесной пары на рельсы; $\psi_к$ – расчетный коэффициент сцепления.

Затем, пользуясь электротяговой характеристикой, определяют ток $I_{дп}$ для полученного значения $F_{кд\,п}$, а далее по заданному значению $к_н$ рассчитывают $I_{д\,max}$ и $I_{д\,min}$.

Если задан коэффициент неравномерности силы тяги при пуске $к'_н$, который имеет несколько большее значение, чем коэффициент неравномерности тока при пуске $к_н$, то максимальную и минимальную силы тяги в ньютонах определяют по формулам:

$$F_{кд\,max} = F_{кд\,п}(1 + к_н); \quad (3.19)$$

$$F_{кд\,min} = F_{кд\,п}(1 - к_н). \quad (3.20)$$

Токи $I_{д\ max}$, $I_{д\ min}$ соответствующие этим силам тяги, определяют по электротяговым характеристикам.

3.6. Расчет ступеней пускового реостата и построение пусковой диаграммы

Расчет ступеней пускового реостата и построение реостатных характеристик обычно выполняют графическим методом. В системе координат v и $I_д$ строят скоростную характеристику тягового электродвигателя — кривую **mba** (рис. 3.12) и отмечают значения пусковых токов $I_{д\ max}$ и $I_{д\ min}$. По формуле (3.16) определяют сопротивления реостата R_1 и R_2, соответствующие токам $I_{д\ max}$ и $I_{д\ min}$ при v = 0. Значения этих сопротивлений откладывают на оси R (точки **d** и **c**).

Точки **a**□и **b'** на оси **v** получают, снося влево значения скорости при выходе на ходовую характеристику (R = 0) с токами $I_{д\ max}$ и $I_{д\ min}$ (точки **a** и **b**). Прямая **da**□ соответствует изменению сопротивления R реостата в зависимости от скорости **v** при неизменном токе $I_{д\ max}$, прямая **cb'** – изменению R от скорости **v** при токе $I_{д\ min}$.

Максимальный пусковой ток $I_{д\ max}$ получают, включив в цепь электродвигателя реостат с сопротивлением R_1. Если бы при увеличении скорости сопротивление **R** изменялось по линии **da**□**,** то скорость **v** изменялась бы по прямой $\mathbf{a_1a}$. Поскольку сопротивление $\mathbf{R_1}$ реостата не изменяется, а ЭДС с возрастанием скорости увеличивается, ток $I_д$ будет уменьшаться. Скорость при этом изменяется по кривой $\mathbf{a_1b_2}$**.**

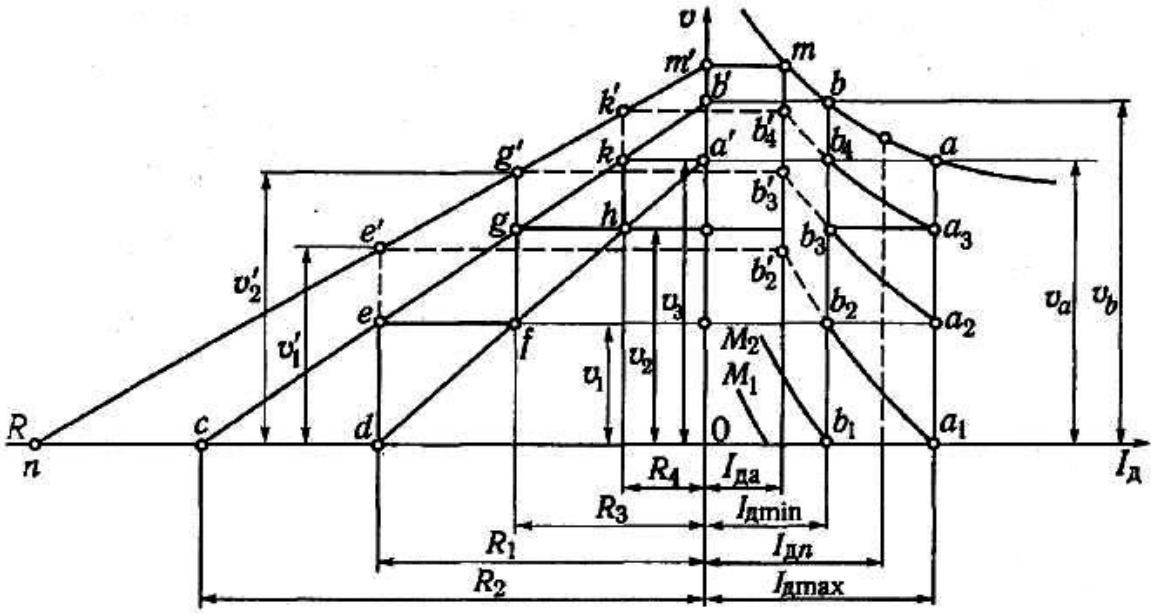


Рис. 3.12. Расчет сопротивления реостата

Точку $\mathbf{b_2}$ находят следующим образом. Точку **e** пересечения вертикальной линии **de**□с наклонной прямой **cb',** соответствующей току $I_{д\ min}$ при скорости v_1, переносят вправо до пересечения с вертикальной линией $\mathbf{b_1b}$ ($I_{д\ min}$). При уменьшении тока до $I_{д\ min}$ машинист или специальное реле выключит секцию реостата. Изменение сопротивления реостата происходит при практически неизменной скорости.

Оставшееся сопротивление пускового реостата должно быть таким, чтобы ток не превысил значения $I_{д\ max}$. Это соответствует переходу из точки $\mathbf{b_2}$ в точку $\mathbf{a_2}$**.** Точке $\mathbf{a_2}$ соответствует точка **f,** находящаяся на прямой **da**□при скорости v_1. Этой точке соответствует сопротивление R_3 реостата, которое необходимо оставить в цепи тягового электродвигателя, чтобы ток в цепи был равен $I_{д\ max}$. Следовательно, отрезок **ef,** равный разности сопротивлений R_1 и R_3, соответствует ступени

пускового реостата, которую нужно вывести из цепи. Под действием тока $I_{д\ max}$ скорость движения будет снова возрастать (кривая $\mathbf{a_2b_3}$).

Когда при скорости v_2 ток снизится до значения $I_{д\ min}$ (точки **g** и $\mathbf{b_3}$), сопротивление реостата снова уменьшают до значения R_4 (переход из точки **g** в точку **h**). Ток при этом возрастает до $I_{д\ max}$. При скорости v_3 и сопротивлении R_4 ток снова будет равен $I_{д\ min}$ (точка $\mathbf{b_4}$). В этот момент реостат можно совсем выключить. Ток возрастет до $I_{д\ max}$, и тяговый электродвигатель выйдет на ходовую (безреостатную) характеристику в точке **a.**

Таким образом, при построении реостатных характеристик строят зависимости сопротивления **R** реостата от скорости и при неизменных токах $I_{д\ max}$ **(da)** и $I_{д\ min}$ **(cb).** Затем между этими прямыми поочередно проводят вертикальные и горизонтальные линии, начиная от точки **d,** соответствующей сопротивлению R при токе

$I_{д\ max}$.

Скорости, при которых выводятся секции пускового реостата (v_1, v_2, v_3 и т. д.), переносят в систему координат v и $I_д$. Пересечения горизонтальных линий с вертикальными, соответствующими токам $I_{д\ max}$ и $I_{д\ min}$, дают точки, через которые проходят реостатные характеристики.

В процессе построения ступеней реостата последняя горизонтальная линия **ka'** может оказаться на любой высоте между скоростями v_a и v_b, т.е. выход на ходовую характеристику может произойти не при наибольшем токе и наименьшей скорости, а при каком-то промежуточном значении между $I_{д\ max}$ и $I_{д\ min}$. При выполнении расчетов точку выхода на ходовую характеристику перемещают небольшим изменением колебаний пускового тока.

На практике построение ступенчатой линии **def ... a**начинают сверху – с точки **a'.** При этом, чаще всего последняя вертикальная линия оказывается между точками **c** и **d,** следовательно, сопротивление реостата будет больше значения R_1. Соответствующая ей скоростная характеристика, очевидно, будет пересекать ось абсцисс (при v = 0) между токами $I_{д\ min}$ и $I_{д\ max}$. Увеличение сопротивления реостата больше R_1 допустимо, так как наибольшее сопротивление определяет не разгон электроподвижного состава в зоне токов $I_{д\ max} - I_{д\ min}$, а условия плавного трогания и маневровой работы.

Чтобы построить реостатные характеристики, двух точек при $I_{д\ max}$ и $I_{д\ min}$ недостаточно. Необходимые восемь – десять точек находят построением при других токах. Например, на графике v ($I_д$) проводят вертикальную линию при токе $I_{да}$, а в системе координат R и v строят наклонную прямую **m'n,** соответствующую току $I_{да}$, тем же порядком, как и линии **cb'** и **da'.**

При сопротивлении R_1 реостата и токе $I_{д\ min}$ скорость была v_1. Если дальнейшее движение будет продолжаться при этом сопротивлении реостата, то с увеличением скорости ток, очевидно, будет уменьшаться. Проделав построения, аналогичные рассмотренным ранее, определяют, что при токе $I_{да}$ и сопротивлении R_1 реостата скорость равна $\mathbf{v_1'}$ (точка $\mathbf{b_2'}$). При сопротивлении R_3 реостата (токе $I_{да}$) скорость равна v_2' и т.д. Эти характеристики в области больших токов расходятся, а в области малых – сближаются. Поэтому при больших токах, для которых выполняют расчет ступеней реостата, выключение секции вызывает наибольшие броски тока, а, следовательно, и силы тяги.

Кривые, характеризующие зависимость скорости движения v от тока $I_д$ при различных сопротивлениях R реостата с указанием на них перехода с одной позиции на другую при наибольших токах, называют ***пусковой диаграммой.*** Иногда на этой диаграмме указывают также переход и при меньших токах.

Кроме ступеней реостата, полученных расчетом при заданном пусковом токе, на электроподвижном составе предусматривают дополнительные ступени, на которых пусковой ток имеет меньшие значения. Эти ступени **(M_1, M_2),** называемые **маневровыми,** позволяют постепенно увеличивать силу тяги и плавно трогать электроподвижной состав с места. Дополнительные ступени необходимы и при переходе с одного соединения тяговых двигателей на другое в том случае, когда во время переключения с токами, меньшими, чем $I_{д\ min}$, могут возникнуть чрезмерно большие броски тока.

На электровозах делают четыре – восемь маневровых ступеней. Сопротивление первой ступени реостата определяют из условий трогания (при v = 0) локомотива без состава на площадке с ускорением 0,4...0,5 м/с^2. На электропоездах с ускорениями 0,8...1 м/с^2 при автоматическом пуске предусматривают обычно одну маневровую ступень, сопротивление которой рассчитывают, исходя из начального ускорения при v = 0 около 0,5 ...0,6 м/с^2. Если ускорение не превышает 0,6 м/с^2, то маневровые ступени на электропоездах не делают.

Остальные маневровые ступени определяют исходя из равномерного деления интервала между током первой маневровой позиции и током $I_{д\ min}$ при v = 0 на допустимые колебания тока, равные $I_{д\ max} - I_{д\ min}$.

Иногда для уменьшения сопротивления пускового реостата на первых позициях включают ослабление возбуждения. Меньшее сопротивление пускового реостата вызывает большие токи якорей тяговых электродвигателей на первых позициях. Чтобы при этом необходимая сила тяги не возрастала, снижают магнитный поток. Такая система применена на электровозе ВЛ11. Первые 4 позиции на нем имеют одинаковое сопротивление пускового реостата, а коэффициент регулирования возбуждения изменяется ступенями от □ □ 0,16 на 1-

ой до 1,0 на 4-ой позиции. На последующих позициях выводятся ступени пускового реостата.

Рассмотренный способ расчета ступеней пускового реостата и построение пусковой диаграммы для одного тягового электродвигателя можно использовать и в случае включения **n** последовательно соединенных и **a** параллельно соединенных тяговых электрических машин. Сопротивление реостата в омах определяют так:

$$R_п = n\,R/a. \qquad (3.21)$$

Если предусмотрено несколько схем соединения тяговых электродвигателей, то определение необходимых сопротивлений ступеней реостата и построение пусковых диаграмм выполняют графическим методом аналогично выше рассмотренному с учетом напряжения, приходящегося на один электродвигатель. Каждой ступени сопротивления реостата соответствует определенная позиция рукоятки контроллера машиниста.

На рис. 3.13 приведена для примера пусковая диаграмма восьмиосного электровоза ВЛ10, имеющего 37 позиций и три соединения тяговых электродвигателей (**С, СП** и **П**). Позиции 16, 27 и 37 – безреостатные или ходовые, позиции с 1-й по 8-ю – маневровые, позиции 17...19 и 28...30 – переходные, которые уменьшают броски тока при переходе с 16-й позиции на 17-ю и с 27-й на 28-ю в зоне малых нагрузок.

Однако эти переходные позиции вызывают уменьшение тока, а значит, и силы тяги при разгоне с большими нагрузками тяговых электродвигателей. Чтобы указанные снижения силы тяги меньше влияли на разгон поезда, обычно на данных позициях машинист не задерживается, ускоренно переводя рукоятку контроллера на последующие позиции, на которых можно получить большие токи и силу тяги.

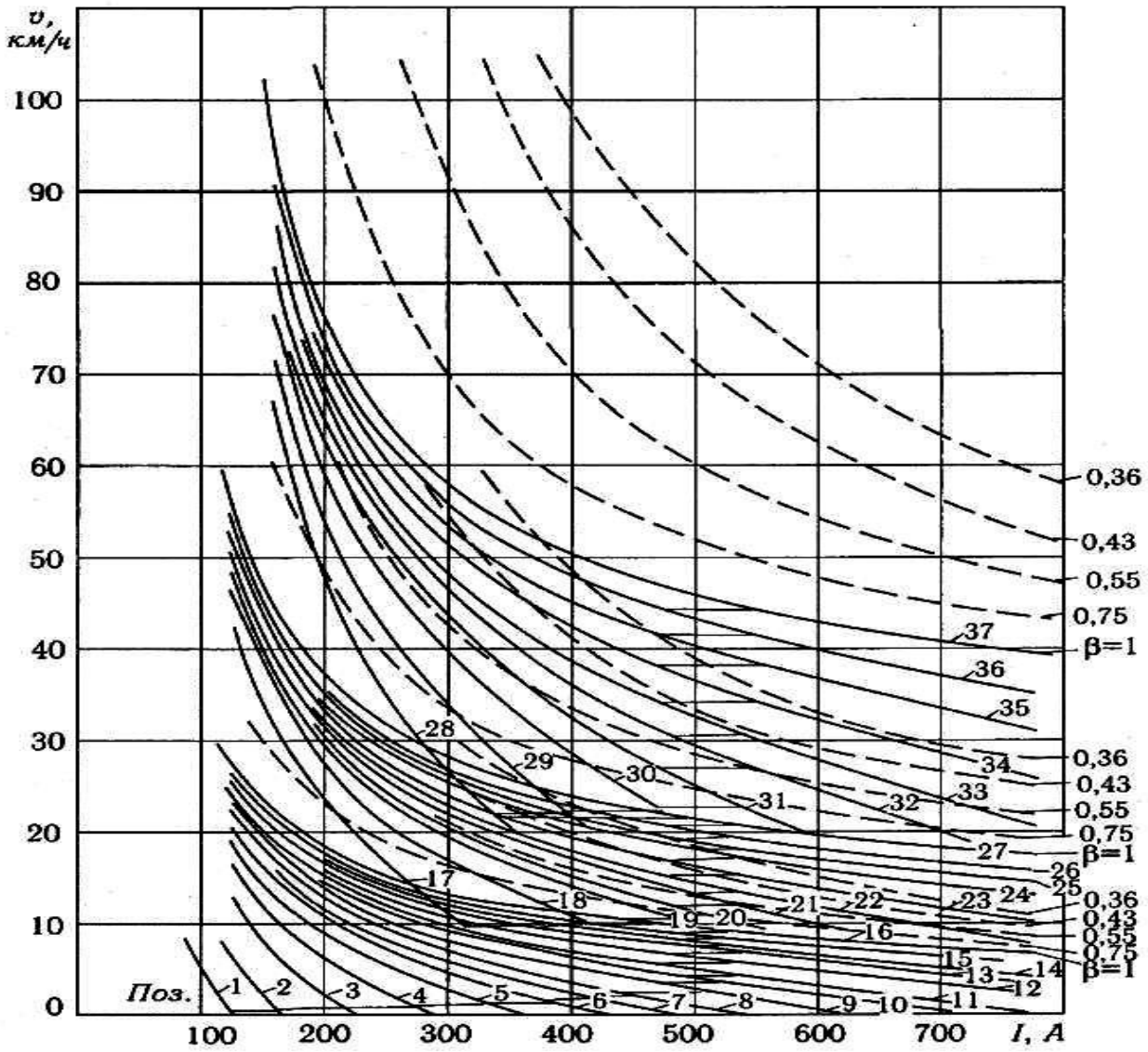


Рис. 3.13. Пусковая диаграмма восьмиосного электровоза ВЛ10

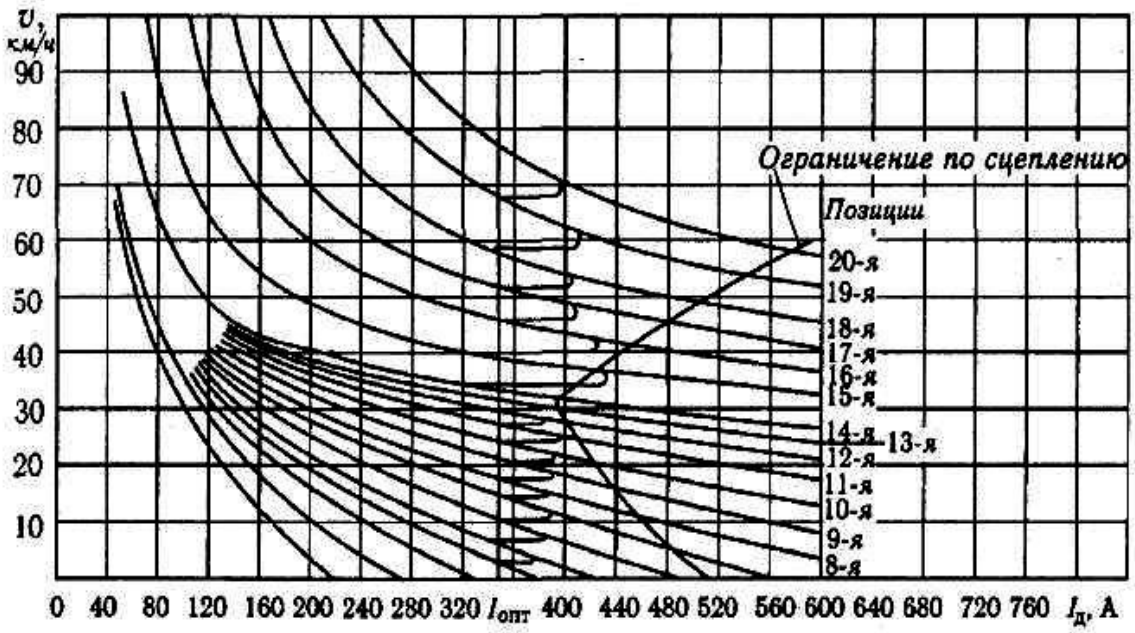


Рис. 3.14. Пусковая диаграмма электропоезда ЭД4

Пусковая диаграмма электропоезда ЭД4 приведена на рис. 3.14. На моторных вагонах поезда установлены тяговые электродвигатели, рассчитанные на напряжение 750 В. Все 4 двигателя включаются последовательно. С 1-й по 14-ю позицию реостатного контроллера выводится пусковой реостат, далее, на позициях 15÷20 включаются ступени ослабления возбуждения. Коэффициент регулирования уменьшается до 0,2 на 20-й позиции. Вывод секций пускового реостата и включение ступеней ОВ вызывает броски тока. В связи с большими ускорениями электропоездов, по сравнению с грузовыми и пассажирскими, скорость за время изменения тока (1...1,5 с) несколько возрастает и броски тока сглаживаются, как показано на рис. 3.14.

3.7. Коэффициент пусковых потерь

Чтобы оценить потери энергии в реостате при пуске, используют ***коэффициент пусковых потерь*** $\kappa_п$, равный отношению потерянной в реостате энергии к электромагнитной энергии тяговых электродвигателей. Для его определения на графике наносят напряжение, ЭДС и падение напряжения в цепи электродвигателей в функции времени (рис. 3.15, а). При пуске с неизменным током напряжение U уравновешивается ЭДС и падением напряжения в реостате и обмотках тяговых электродвигателей. При среднем токе $I_{дп}$:

$$U = E + I_{дп}R + I_{дп}r.$$

Если скорость равна нулю, то ЭДС также равна нулю и

$$U = I_{дп}R + I_{дп}r.$$

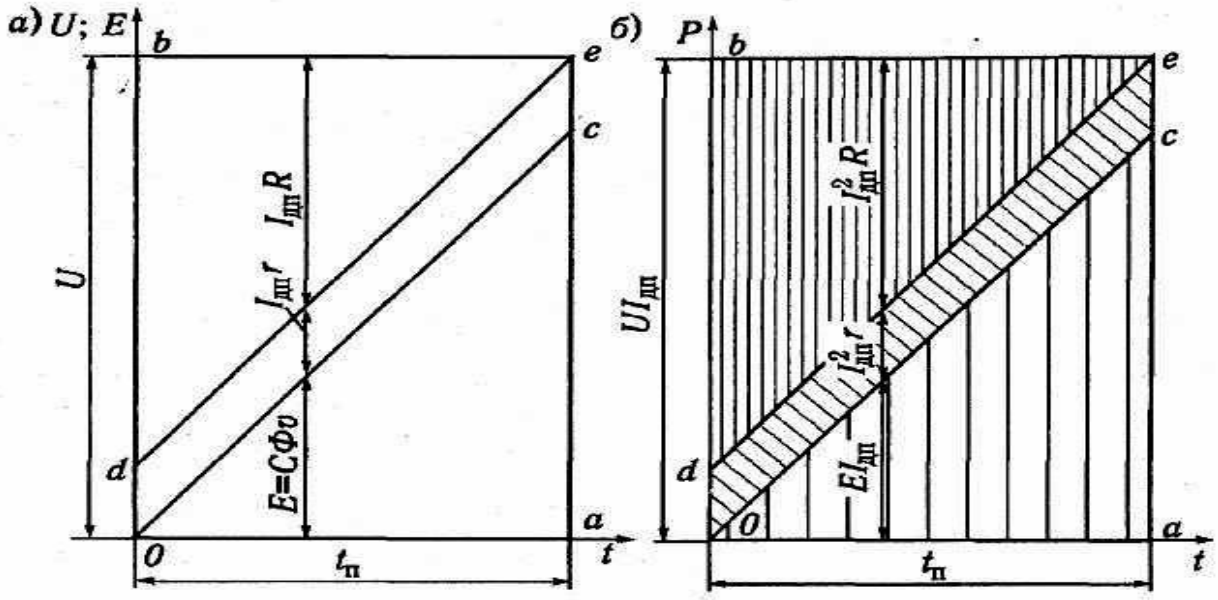


Рис. 3.15. Распределение напряжения (а) и мощности (б) между тяговыми электродвигателями и пусковым реостатом при разгоне

На графике (рис. 3.15, **а)** подведенному напряжению U соответствует ордината **Ob,** падению напряжения в реостате — отрезок **db,** а падению напряжения в обмотках электродвигателя — **Od.**

Пуск электродвигателя с неизменным током $I_{дп}$ происходит с небольшим изменением ускорения, которое можно принять постоянным. При этом скорость **v** будет изменяться по закону прямой линии:

$$v = at_п,$$

где а – ускорение; $t_п$ – время пуска.

Пуск с неизменным по значению током, а следовательно, и магнитным потоком вызовет изменение ЭДС (Е) пропорционально скорости движения, а значит, и времени, т.е. по закону прямой линии. По такому же закону будет возрастать напряжение на тяговом электродвигателе, равное сумме ЭДС и падения напряжения на его обмотках.

По окончании пуска через время $t_п$ реостат будет выведен из цепи, и напряжение на тяговом электродвигателе станет равным подведенному напряжению U – отрезку **ae** на рис. 3.15, а. Если из него вычесть неизменное значение падения напряжения в обмотках $I_{дп}r$ (отрезок **ec = Od**), то оставшийся отрезок **ac** будет равен ЭДС в конце пуска. Следовательно, наклонная линия **Oc** показывает изменение ЭДС в период пуска, а линия **de –** напряжение на тяговом электродвигателе. Падение напряжения на реостате при пуске выразится разностью ординат линий **be** и **de.**

Если ординаты U и E умножить на ток $I_{дп}$, то получим распределение мощностей при пуске тягового электродвигателя, как показано на рис. 3.15, б, где $UI_{дп}$ – подведенная мощность; $I^2_{дп}r$ □ электрические потери мощности в обмотках тягового электродвигателя; $I^2_{дп}R$ □ потери мощности в пусковом реостате; $EI_{дп}$ □ электромагнитная мощность двигателя.

Произведение мощности на время составляет энергию, поэтому площадь треугольника **dbe** в соответствующем масштабе характеризует потери энергии в реостате, площадь четырехугольника **Odec** представляет собой потери электрической энергии в обмотках электродвигателя, а площадь треугольника **aOc** соответствует его электромагнитной энергии. Площадь четырехугольника **Obea** характеризует энергию, затраченную на пуск тягового электродвигателя.

Площадь треугольника **dbe** равна площади треугольника **Oca,** т.е. потери энергии в пусковом реостате в этом случае равны электромагнитной энергии электродвигателя. Тогда коэффициент пусковых потерь определяют так: $S_{\square dbe}$ 1, $^{к}{}_{п}$

□ □

$S_{\square 0ca}$

где S_{Δ} – площадь треугольника.

Рассмотренные диаграммы распределения напряжения и мощности (см. рис. 3.15, а и б) не учитывают механические и магнитные потери в электродвигателе, потери в передаче. Не принималось также во внимание изменение сопротивления движению с увеличением скорости. Однако эти факторы мало влияют на распределение энергии за период пуска, и действительная диаграмма незначительно отличается от построенной. Если все тяговые электродвигатели электроподвижного состава постоянно соединены последовательно или параллельно, потери в реостате, как и в рассмотренном случае, будут равны электромагнитной мощности ($к_п$ = 1) или половине от подведенной энергии. Если же переключить электродвигатели с последовательного на параллельное соединение, то потери в реостате снизятся.

В случае разгона ЭПС, имеющего два тяговых двигателя, каждый из которых рассчитан для работы под напряжением U, на последовательном соединении электродвигателей (рис. 3.16) ток, потребляемый из сети, равен $I_{дп}$, мощность равна $UI_{дп}$. Для упрощения рассуждений примем электрические потери в обмотках электродвигателей равными нулю. Скорость движения на последовательном соединении при выключенном реостате будет равна половине скорости при параллельном соединении электродвигателей, так как напряжение $U_д$ на каждом из них равно U/2. При равноускоренном движении разгон до этой скорости займет половину полного времени разгона – $t_п/2$.

Энергия, затраченная на пуск, изображена прямоугольником **Obac** (рис. 3.17), который прямая **Oa** делит на два треугольника. Площадь треугольника **Oba** соответствует энергии, потерянной в реостате, площадь треугольника **Oac** – электромагнитной энергии при последовательном соединении тяговых электродвигателей.

Далее разгон ЭПС с пусковым током $I_{дп}$ проводится на параллельном соединении электродвигателей с включенным в цепь реостатом, который постепенно выключается. Во вторую половину пускового периода к электроподвижному составу подведена мощность $2UI_{дп}$ (см. рис. 3.16, б). В момент $t_п/2$ ордината **ac** (см.рис. 3.17)

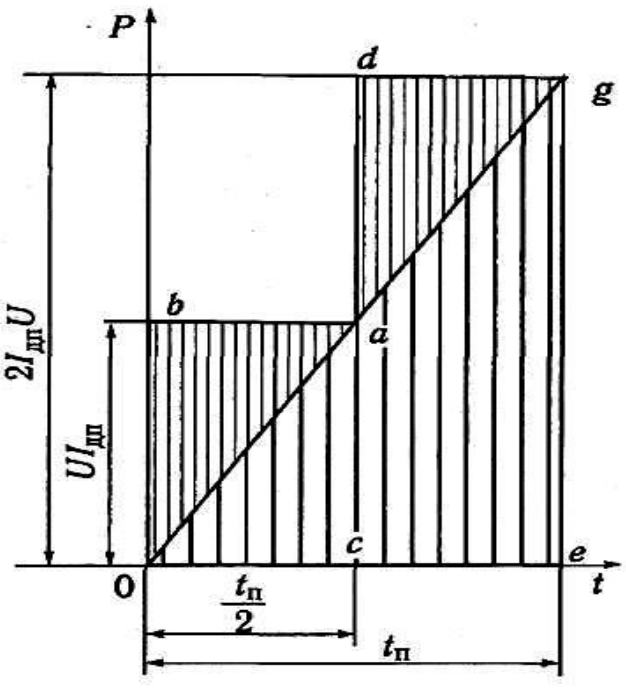


Рис. 3.17. Диаграмма распределения мощности при двухступенчатом пуске

соответствует электромагнитной мощности тяговых машин, а ордината (**ad = cd – ac)**

– потерям мощности в реостате, который включают в цепь тяговых электродвигателей при переключении. В дальнейшем при разгоне потери в реостате снижаются и к концу разгона становятся равными нулю. Следовательно, площадь треугольника **adg** показывает потери энергии в реостате при параллельном соединении электродвигателей, а площадь трапеции **cage** соответственно характеризует их электромагнитную энергию.

Количество энергии, затрачиваемой на пуск электроподвижного состава с переключением тяговых электродвигателей, выражено фигурой **Obadge.** Потери в реостате определяют как сумму площадей треугольников **Oba** и **adg.** Электромагнитной энергии тяговых электродвигателей соответствует площадь треугольника **Oge.**

Таким образом, при пуске ЭПС с переключением электродвигателей потери в реостате меньше и коэффициент пусковых потерь:

$$к_{п} = \frac{S_{0ba} + S_{adg}}{S_{0ge}} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}.$$

В данном случае потери в два раза меньше, чем при пуске без переключения тяговых электродвигателей.

На восьмиосных электровозах, постоянного тока применяют три способа соединения тяговых электродвигателей: последовательное, последовательнопараллельное и параллельное. Диаграмма распределения мощности и энергии при трехступенчатом пуске восьмиосного локомотива приведена на рис. 3.18, а. В этом случае коэффициент пусковых потерь **$к_{п}$** равен приблизительно 3/8, т.е. потери при трехступенчатом пуске восьмиосного электровоза примерно в 2,7 раза меньше, чем при одноступенчатом.

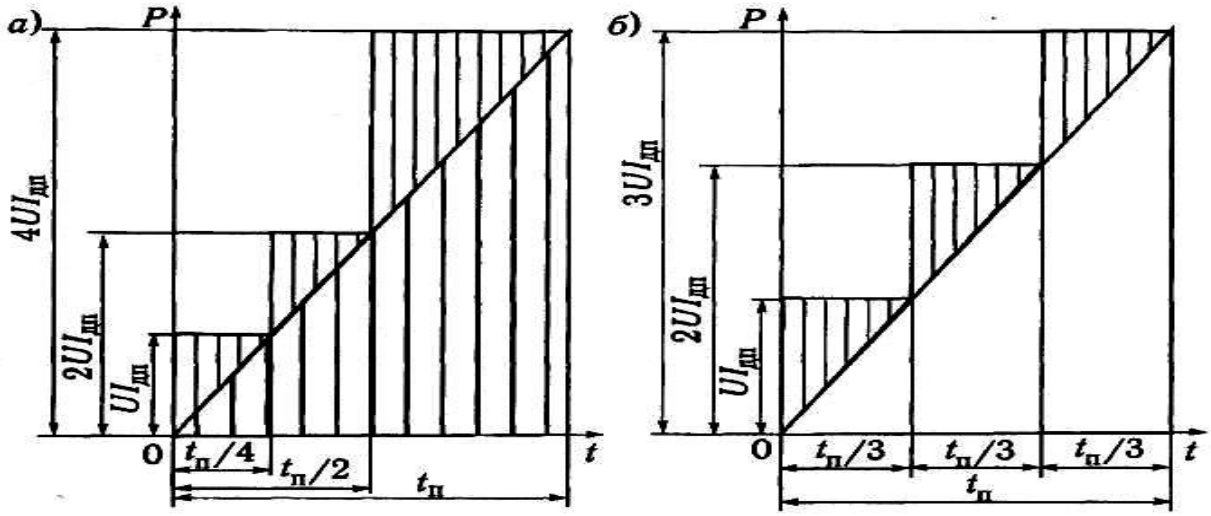


Рис. 3.18. Диаграмма распределения мощности при трехступенчатом пуске восьмиосного (а) и шестиосного (б) электровоза

Аналогичная диаграмма для шестиосного электровоза при трехступенчатом пуске показана на рис. 3.18, б. Нетрудно видеть, что $к_п$ в этом случае равен 1/3.

Таким образом, пуск тяговых электродвигателей с переключением их соединения выгоден из-за уменьшения потерь в реостате. Кроме того, пересоединение электродвигателей дает возможность получить дополнительные ходовые (безреостатные) позиции электроподвижного состава. Однако силовые цепи при этом усложняются. Практически на электровозах предусматривают до трех соединений электродвигателей, а на электропоездах — до двух.

3.8. Понятие об импульсном регулировании напряжения

Включение реостата при пуске приводит к потерям электрической энергии, особенно заметным на электропоездах в пригородном движении при большом числе остановок, где они составляют 12...15 % общих затрат на тягу поездов.

Эти потери можно уменьшить, если использовать систему безреостатного пуска – ***импульсное регулирование*** подведенного к электродвигателям напряжения, среднее значение которого можно плавно изменять. При этом способе на тяговые машины подают полное напряжение контактной сети кратковременными импульсами. (Схема ЭПС с импульсным регулированием рассматривается при изучении устройства электровозов и электропоездов. Поэтому здесь отметим лишь некоторые особенности). В цепь тягового электродвигателя **М** (рис. 3.19) включают индуктивность **L,** в которой должна запасаться энергия, и тиристорный ключ **ТК** – специальное устройство на

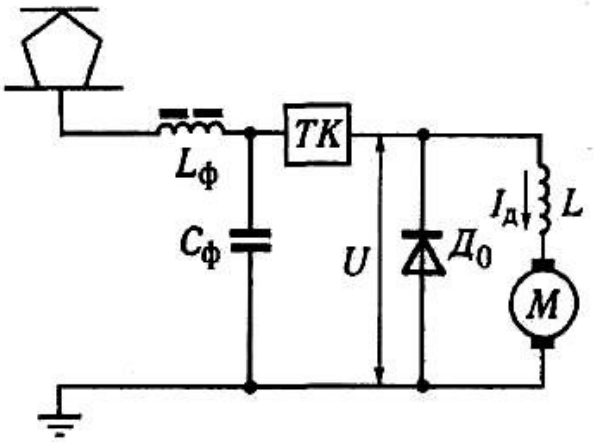


Рис. 3.19. Упрощенная схема импульсного регулирования напряжения

тиристорах, с помощью которого подаются и снимаются кратковременные импульсы напряжение контактной сети. Параллельно тяговому электродвигателю и индуктивности **L** включен полупроводниковый вентиль **$Д_о$.** На входе установлен фильтр, состоящий из индуктивности **$L_ф$** и емкости **$C_ф$.**

Если открыть ключ **ТК,** то по цепи через индуктивность **L** и обмотки тягового электродвигателя пойдет нарастающий ток $I_д$. Если бы при трогании поезда напряжение прикладывалось в течение длительного времени, то ток **$I_д$** достиг бы очень большого значения из-за большого приложенного напряжения и малого сопротивления цепи. Но через короткий промежуток времени напряжение ключом **ТК** снимается, и ток из контактной сети прерывается.

Однако через тяговый электродвигатель ток продолжает протекать за счет электромагнитной энергии, накопленной в индуктивности **L,** замыкаясь через полупроводниковый вентиль **$Д_о$.** Этот ток снижается, и если бы снова не было подано напряжение, он бы упал до нуля. Но через короткий промежуток времени ключ **ТК** снова открывается, и ток **$I_д$** под действием напряжения сети начинает возрастать.

На рис. 3.20. показаны изменения напряжения и тока во времени в каждый период **T.** В течение времени **$t_1 – t_2$** тиристорный ключ открыт, на тяговый электродвигатель и индуктивность **L** подается напряжение, вследствие чего ток $I_д$ возрастает. Затем в течение времени **$t_1 – t_2$** тиристорный ключ **ТК** закрыт, ток $I_д$ снижается. Затем цикл повторяется в следующем периоде.

Сравнивая (рис. 3.20, а и 3.20, б) видим, что среднее напряжение на электродвигателе $U_{дср}$ изменяется в зависимости от соотношения времени открытого ключа **ТК** и периода Т. Чем оно больше, тем больше $U_{дср}$. В пределе, когда ключ **ТК** не будет закрываться, напряжение $U_{дср}$ будет равно напряжению сети (потерями напряжения в тиристорах ключа **ТК** и в катушках индуктивности пренебрегаем).

Следовательно, изменяя время **t_2** выключения цепи, тиристорным ключом **ТК** можно регулировать среднее напряжение на тяговом электродвигателе. Этот метод регулирования напряжения называют ***широтно-импульсным.*** Существует также ***частотно-импульсный*** метод регулирования напряжения, при котором время $t_1 – t_2$ остается неизменным, а изменяется период **T** (или частота).

В связи с тем, что момент времени закрытия **t_2** тиристорного ключа **ТК** можно изменять плавно, среднее напряжение на электродвигателе, а следовательно, и скорость движения электроподвижного состава регулируют также плавно.

В системе импульсного регулирования тяговые электродвигатели работают при пульсирующем токе (см. рис. 3.20). Вследствие большой частоты импульсов эти пульсации невелики.

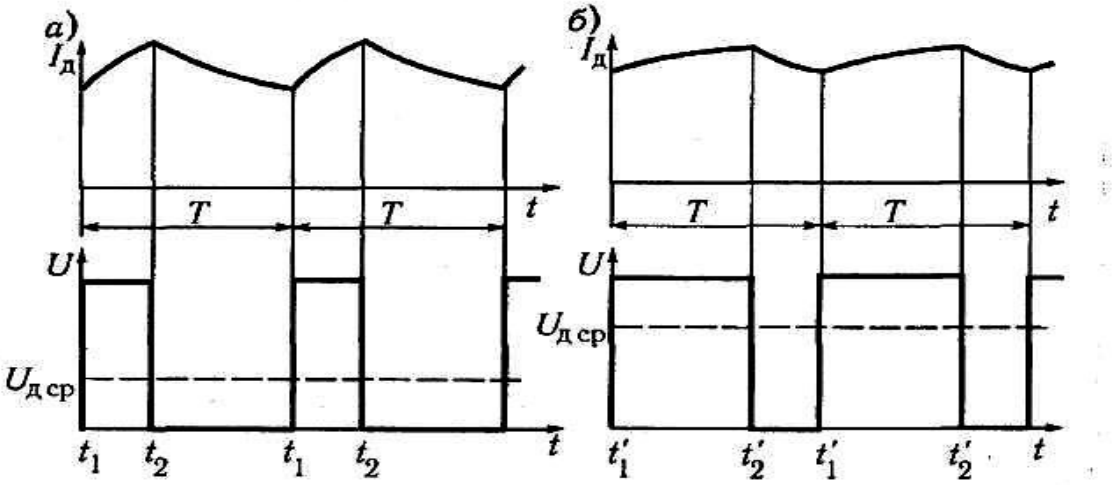


Рис. 3.20. Изменение напряжения и тока при импульсном регулировании: а — при меньшем времени открытого состояния; б — при большем

В отличие от реостатного пуска при импульсном регулировании ток не изменяется от минимального до максимального значения. Он может оставаться постоянным благодаря плавному изменению напряжения. Поэтому на пусковой диаграмме показывают область, в которой располагаются характеристики при любом промежуточном значении напряжения.

Систему импульсного регулирования используют также для плавного изменения сопротивления пускового реостата между ступенями и бесступенчатого регулирования ослабления возбуждения. В первом случае тиристорный ключ включается параллельно ступеням реостата, во втором случае – параллельно обмоткам возбуждения тяговых электродвигателей.

3.9. Электромеханические и тяговые характеристики при разных уровнях напряжения и регулировании возбуждения

Электромеханические характеристики тяговых электродвигателей и тяговые характеристики электроподвижного состава приводят при разных уровнях напряжения на тяговых электродвигателях при полном и всех ступенях ослабления возбуждения, предусмотренных на электровозе или моторном вагоне (ходовые характеристики). Реостатные характеристики на них не показывают.

На тяговые характеристики наносят ограничивающие линии, соответствующие наибольшим допустимым скоростям движения и наибольшим значениям силы тяги по току тяговых электродвигателей (по условиям нормальной коммутации) или по условиям сцепления колес с рельсами.

Электромеханические характеристики электродвигателя ТЛ-2К и тяговые характеристики восьмиосного электровоза ВЛ10 приведены на рис. 3.21 и 3.22. Как видим, эти электровозы имеют по три соединения тяговых электродвигателей, на каждом из которых предусмотрены, кроме полного (ПВ), четыре ступени ослабления возбуждения (ОВ1...ОВ4).

Характеристики в зоне наибольших скоростей движения ограничены конструкционной скоростью (100 км/ч для электровоза ВЛ10). Чтобы более полно использовать мощность и сцепной вес локомотива, нужно развивать по возможности большие силы тяги. На локомотивах ВЛ10 они ограничены сцеплением колес с рельсами. При переходе с одной реостатной позиции на следующую возникают броски тока, а следовательно, и силы тяги от $F_{к\ сц\ min}$ до $F_{к\ сц\ max}$ (рис. 3.22, а). На тяговых характеристиках эти значения при разгоне показаны тонкими линиями, расположенными выше и ниже линии ограничения по сцеплению. В расчетах используют линию **AS,** соответствующую средним значениям силы тяги по сцеплению $F_{к\ сц}$, определяемой по формулам (1.7) и (1.14).

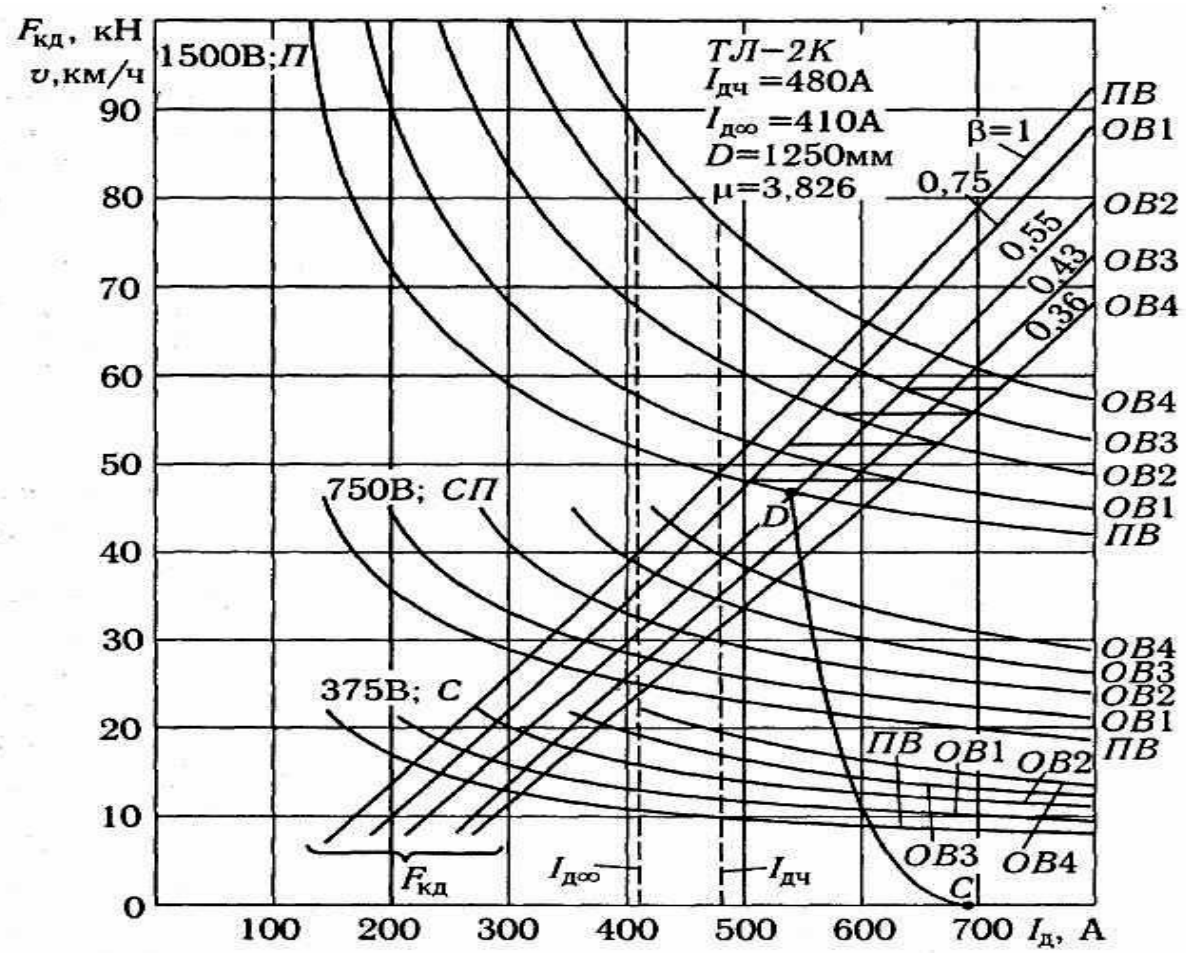


Рис. 3.21. Электромеханические характеристики тягового электродвигателя ТЛ-2К

Если силы тяги $F_{к\ сц}$ при различных скоростях разделить на число тяговых электродвигателей и по кривым $F_{к\ сц}$ ($I_д$) (см. рис. 3.21) определить токи $I_д$, то получим линию СД, характеризующую средние токи электродвигателей при различных скоростях в период разгона.

После выхода в точку **S** (см. рис. 3.22, а) в расчетах учитывают работу по характеристике полного возбуждения с последующим переходом на характеристику ослабленного возбуждения при неизменной скорости движения по вертикальной линии. Если на характеристику **ОВ1** переходить при скорости меньшей, чем в точке **В,** то окажется, что после перехода при неизменной скорости сила тяги будет больше $F_{к\ сц\ max}$ и вероятно возникновение боксования колесных пар.

Наиболее целесообразен переход из точки **В** в точку **С,** соответствующую $F_{к\ сц\ max}$. Переход при большей скорости приведет к недоиспользованию мощности и силы тяги локомотива, так как на характеристике **ОВ1** сила тяги реализуется больше, чем на характеристике **ПВ** (при одинаковых скоростях движения). Далее работа идет по характеристике **ОВ1** на отрезке **CD,** из точки **D** переход на характеристику **ОВ2** в точку **Е** и т.д. до точки **Р.** При более высоких скоростях расчет ведут по характеристике **ОВ3.** Последнюю характеристику **ОВ4** при наименьшем значении в расчетах не учитывают; ее оставляют в резерве для использования машинистом, например при нагоне опоздания.

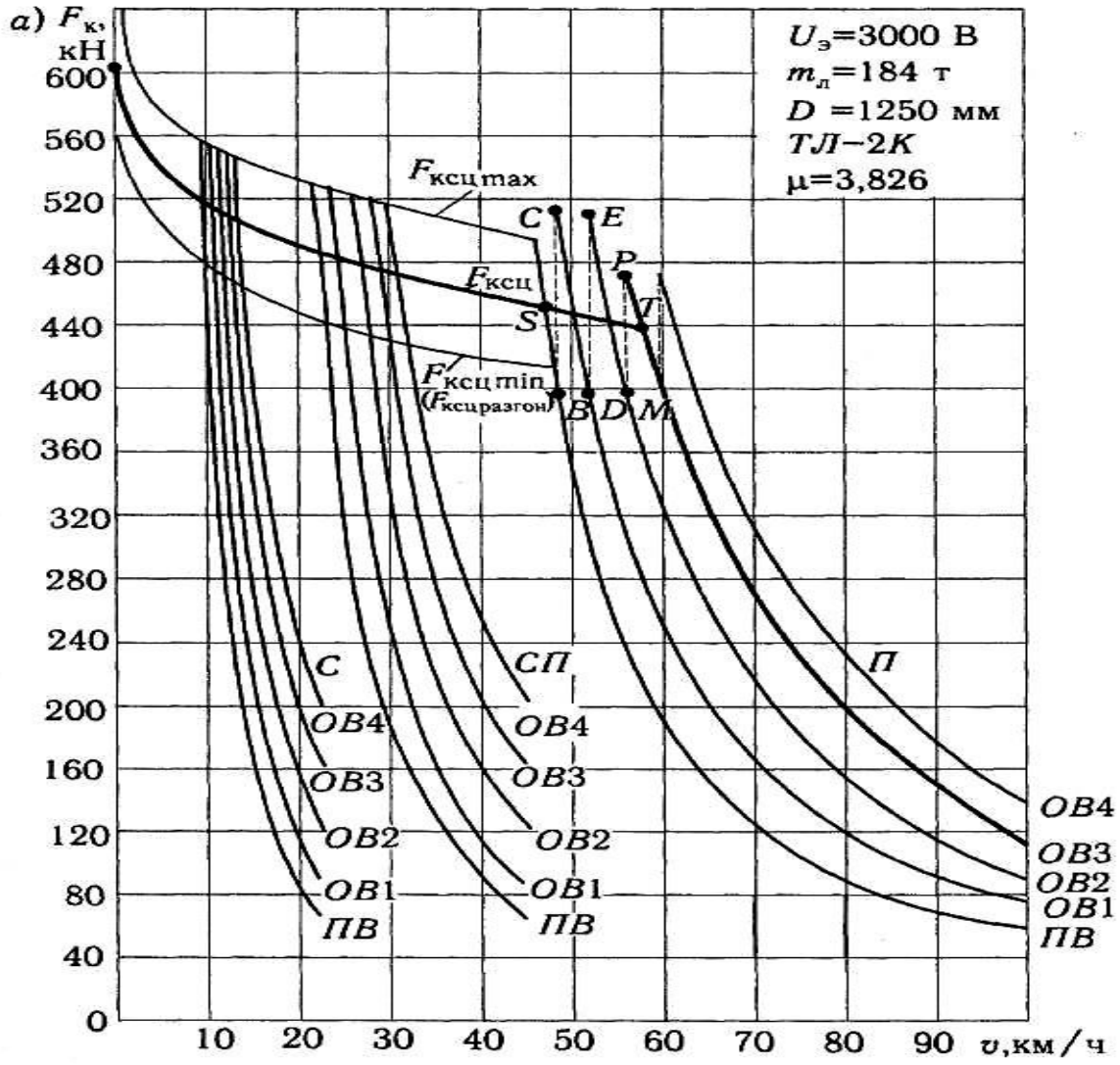


Рис. 3.22. Тяговые характеристики электровозов ВЛ10, ВЛ11М

В расчетах использование ослабления возбуждения на **С-** и **СП-** соединениях также не учитывают, хотя на практике машинисты их широко применяют. Для более точного определения скоростей переходов, сил тяги и токов характеристики дополняют таблицей переходов (табл. 3.1).

В соответствии с ней на скоростные характеристики (см. рис. 3.21) нанесены линии переходов на характеристики **ОВ1 – ОВ4** и изменения при этом тока $I_д$.

Таблица 3.1

Переход	v, км/ч	$F_к$, кН	$I_д$, А
с ПВ на ОВ1	48,5	398,3 … 518,0	492,5 … 620,0
с ОВ1 на ОВ2	52	397,3 … 508,2	515,0 … 667,0
с ОВ2 на ОВ3	56	394,4 … 474,4	567,5 … 695,0
с ОВ3 на ОВ4	59,5	399,3 … 470,9	610,0 … 725,0

Чтобы упростить расчеты, на практике не учитывают изменения силы тяги при переходе на характеристики ослабленного возбуждения, а заменяют их средними значениями (линия **ST** на рис. 3.22). Таким образом, для определения сил тяги используют при разгоне ограничивающую линию **АТ** по сцеплению колес с рельсами до предпоследней тяговой характеристики **ОВ3** параллельного соединения групп тяговых электродвигателей и далее берут силы тяги по этой характеристике. На тяговых характеристиках электровоза ВЛ10У (см. рис. 3.22, б) за счет большей его массы ограничивающая линия расположена выше, чем на характеристиках электровоза ВЛ10 (200 т вместо 184 т).

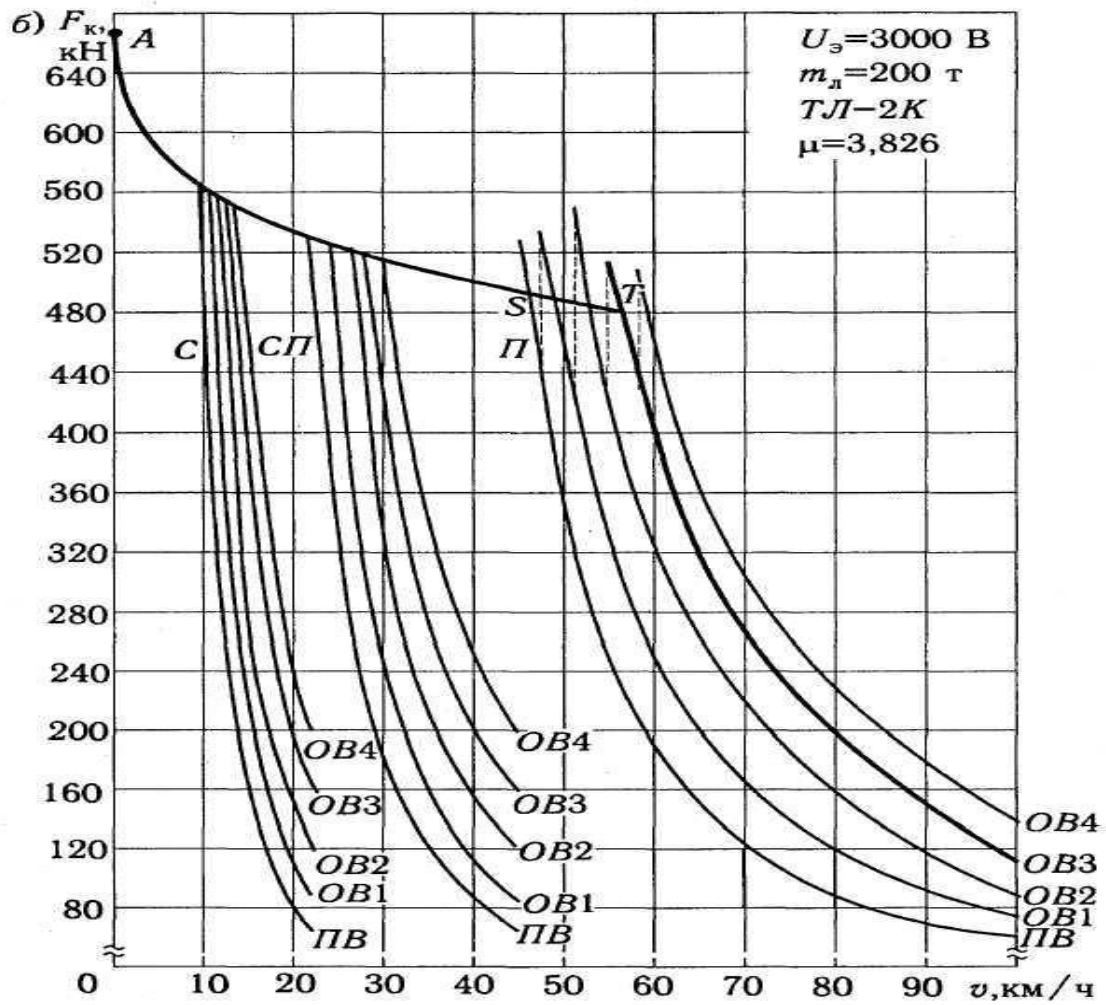


Рис. 3.22. Тяговые характеристики электровоза ВЛ10У

На пассажирских электровозах и электропоездах наибольшая сила тяги ограничивается и током, при котором не нарушается надежная коммутация двигателей. В случае превышения наибольшего допустимого тока $I_{д\ max}$ возможно образование кругового огня по коллектору.

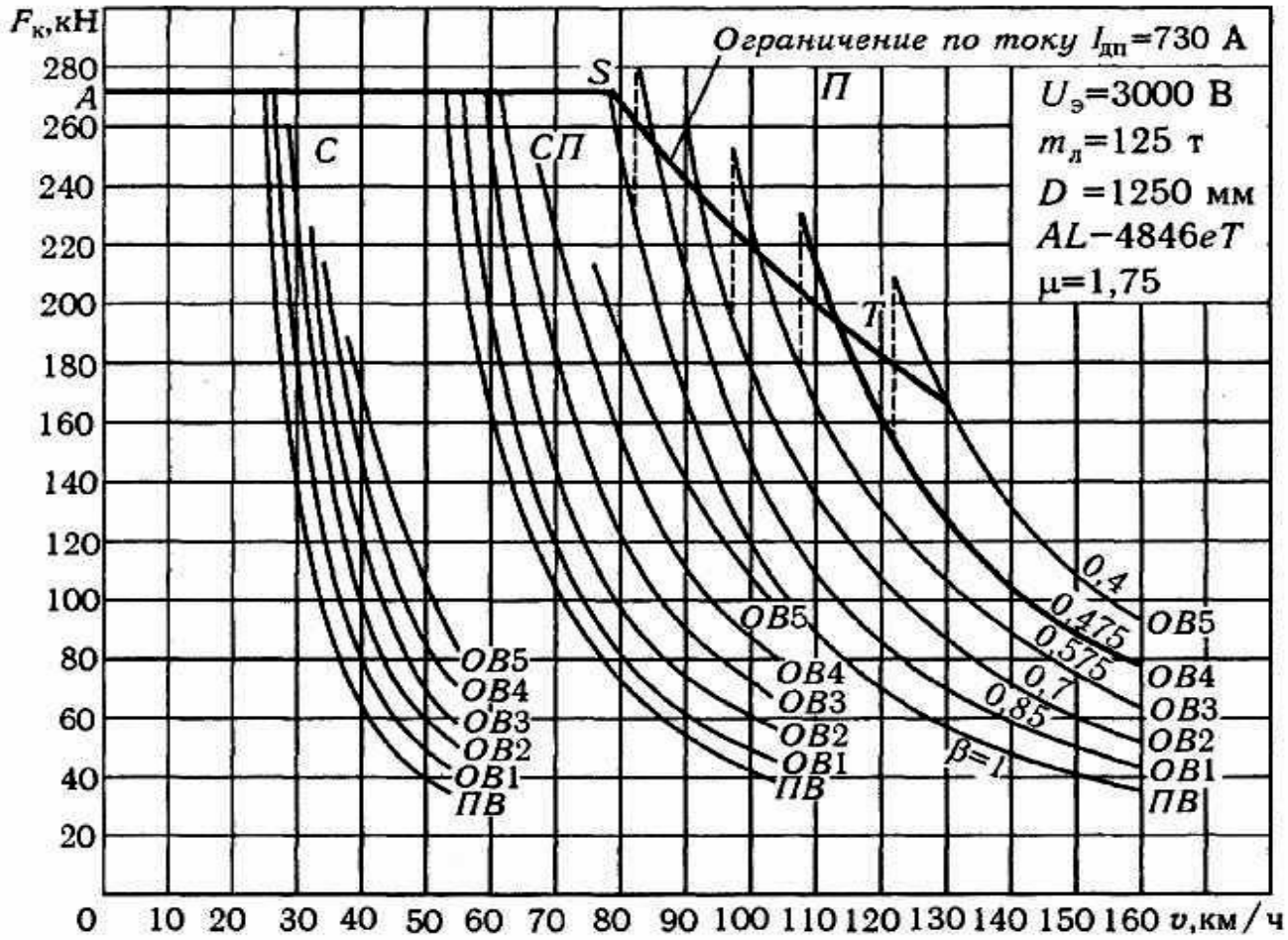


Рис. 3.23. Тяговые характеристики электровоза ЧС2

На рис. 3.23 приведены тяговые характеристики пассажирского шестиосного электровоза ЧС2. Данный локомотив имеет три схемы соединения тяговых электродвигателей и пять ступеней ослабления возбуждения на каждой из них. Средняя сила тяги при пуске ограничивается током $I_{дп}$ = 730 А. При работе с полным возбуждением ограничивающая линия **AS** горизонтальна. Переходы на характеристики ослабленного возбуждения вызывают броски сил тяги до значений, соответствующих току $I_{д\ max}$. С переходом на позиции более глубокого ослабления возбуждения при одинаковых токах $I_{дп}$ снижается сила тяги в связи с уменьшением магнитного потока □$F_{кд}$ □ 3,6□СФ$I_д$ □ □F□. Поэтому току $I_{дп}$ соответствует наклонная линия **ST.** Максимальные значения силы тяги при переходах также снижаются.

На рис 3.24 приведены тяговые характеристики электропоезда ЭД4, состоящего из 10 вагонов (5 моторных, 2 головных и 3 прицепных) с тяговыми электродвигателями ТДЭ235У1. Здесь показаны реостатные характеристики $F_к$(v) с 1-й по 13-ю позиции реостатного контроллера и безреостатные характеристики на 14-й позиции (**ПВ**), 16-й позиции (**ОВ1**), 18-й позиции (**ОВ2**) и 20-й позиции

(**ОВ3**). В зоне больших сил тяги действуют ограничения по току и сцеплению колес с рельсами.

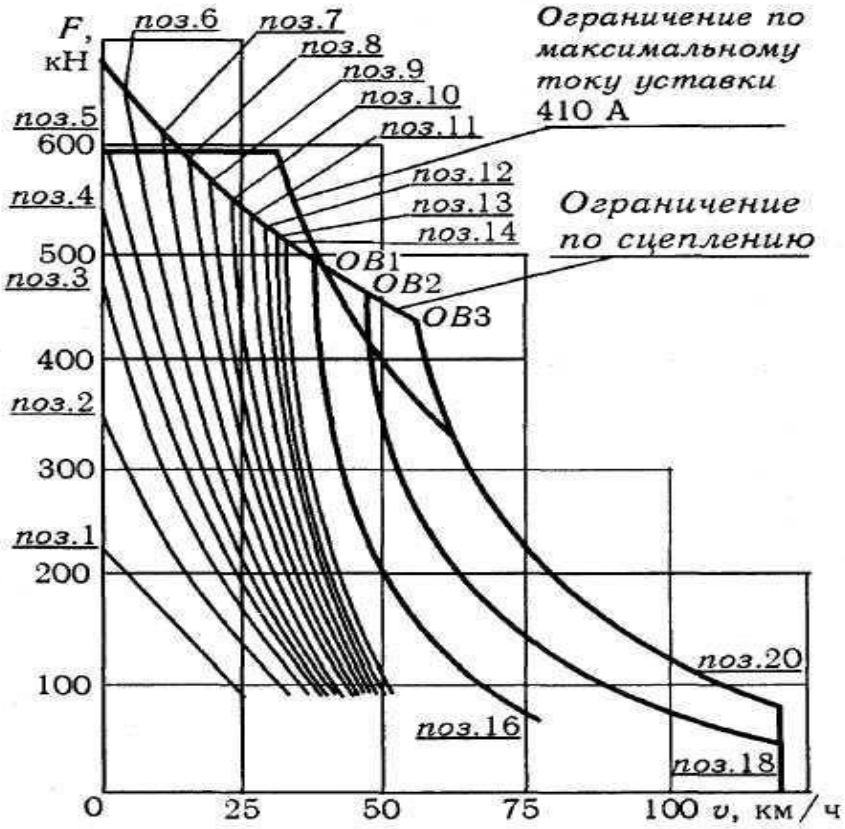


Рис.3.24. Тяговые характеристики электропоезда ЭД4

Электрифицированные линии постоянного тока обслуживают следующие электровозы: на грузонапряженных участках с тяжелым профилем — восьмиосные грузовые электровозы ВЛ10, ВЛ10У с повышенной массой и соответственно большей нагрузкой от осей на рельсы; ВЛ11, ВЛ11М, способные работать в три и четыре четырехосные секции (12 или 16 движущих колесных пар) при управлении с одного поста по системе многих единиц. На электровозах ВЛ11 последовательное соединение тяговых электродвигателей в рабочих режимах не используется. На этих локомотивах установлены тяговые электродвигатели ТЛ-2К номинальной мощностью часового режима 670 кВт.

В дальнем пассажирском движении используют шестиосные электровозы ЧС2Т с шестью тяговыми электродвигателями AL4846dT мощностью часового режима 770 кВт, оборудованные реостатным тормозом, шестиосные электровозы ЧС2 с тяговыми электродвигателями AL4846eT мощностью часового режима 700 кВт и восьмиосные электровозы ЧС7 с тяговыми двигателями AL4846dT.

Находится в эксплуатации скоростной пассажирский восьмиосный электровоз ЧС200 с тяговыми электродвигателями мощностью часового режима 1050 кВт, рассчитанный на наибольшую скорость в эксплуатации 200 км/ч.

В пригородном движении работают электропоезда ЭР2, состоящие из пяти или шести секций, каждая из которых содержит один моторный и один прицепной вагоны длиной по 19,6 м (из которых два головных с кабинами машиниста). На каждом моторном вагоне установлено по четыре тяговых электродвигателя мощностью часового режима 200 кВт каждый, рассчитанные на напряжение 1500 В и включаемые последовательно ($U_д$ = 750 В) и в две параллельных цепи по два двигателя последовательно ($U_д$ = 1500 В).

Из таких же вагонов состоят электропоезда ЭР2Р и ЭР2Т с тяговыми электродвигателями мощностью 240 кВт, а также ЭТ2. Эти электропоезда, кроме механического колодочного тормоза, имеют рекуперативно-реостатное торможение. Находятся в эксплуатации электропоезда ЭД2Т с вагонами длинной 21,5 м и тяговыми электродвигателями мощностью 225 кВт.

В настоящее время выпускаются электропоезда ЭД4, ЭД4М с тяговыми электродвигателями мощностью 235 кВт. Вагоны этих электропоездов так же удлинены до 21,5 м. Все электропоезда с рекуперативно-реостатным торможением имеют тяговые электродвигатели, рассчитанные на напряжение 750 В, которые соединяются только последовательно.

На линии Москва – Санкт-Петербург эксплуатируется скоростной электропоезд ЭР200, рассчитанный на наибольшую скорость 200 км/ч и оборудованный реостатным и электромагнитным тормозами (помимо механического колодочного тормоза). Этот электропоезд оснащен тяговыми электродвигателями 1ДТ001 мощностью 240 кВт.

Тема 4

4. Характеристики электровозов переменного тока при регулировании скорости

4.1. Особенности электрической тяги на переменном токе

Электрификация дорог на постоянном токе с напряжением в контактной сети 3000 В сыграла большую роль в повышении их пропускной и провозной способностей.

В системе тягового энергоснабжения постоянного тока тяговые подстанции располагались на расстоянии 20...25 км. Сечение проводов контактной сети составляют: контактный провод 100 мм^2 и медный несущий тросе 120 мм^2. Однако с ростом грузовых и пассажирских перевозок, повышения мощности электровозов и густоты движения поездов эта система оказалась недостаточно эффективной из-за сравнительно низкого напряжения.

Мощность, потребляемая ЭПС постоянного тока, определяется произведением напряжения контактной сети на потребляемый ток. При

напряжении 3000 В и большой суммарной мощности электроподвижного состава, по проводам контактной сети протекают чрезвычайно большие токи, которые вызывают повышенные потери энергии.

Для их снижения приходится увеличивать сечение проводов, подвешивая два контактных провода вместо одного и располагая на опорах контактной сети с противоположной стороны дополнительных проводов, так называемых усиливающих фидеров сечением 185 мм^2. На наиболее тяжелых участках даже пришлось строить между двумя тяговыми подстанциями новую тяговую подстанцию, уменьшая, таким образом, расстояние между ними до 10... 12 км.

Поэтому в наше время в стране наряду с системой постоянного тока все шире применяют более перспективную систему однофазного переменного тока промышленной частоты 50 Гц с напряжением в контактной сети 25000 В.

Более высокое напряжение в контактной сети позволяет снизить потребляемые токи, а следовательно, и потери электрической энергии. В этой системе расстояние между тяговыми подстанциями увеличено до 45...55 км, а сечение проводов контактной сети уменьшено до минимального: один контактный провод сечением 100 мм^2 и биметаллический несущий трос сечением 95 мм^2.

На ряде участков переменного тока используют систему тягового энергоснабжения 2 х 25 кВ. С этой целью на опорах контактной сети со стороны поля подвешивают еще один провод с напряжением относительно контактной сети 50 кВ и относительно земли 25 кВ. Напряжение между контактным проводом и рельсом составляет 25 кВ. Вдоль железной дороги на расстоянии 8...15 км установлены автотрансформаторы, снижающие напряжение с 50 до 25 кВ. За счет передачи энергии до автотрансформатора под напряжением 50 кВ снижаются ее потери и расстояние между тяговыми подстанциями составляет 100...120 км.

На электроподвижной состав однофазного тока устанавливают специальное оборудование для преобразования напряжения, тока и регулирования напряжения. Наибольшее распространение получил электроподвижной состав со статическими преобразователями и тяговыми электродвигателями постоянного (пульсирующего) тока. На электровозе или моторном вагоне этого типа устанавливают преобразователь, состоящий из трансформатора, понижающего напряжение контактной сети 25000 В до нужного значения, и выпрямителя, преобразующего переменный ток в постоянный пульсирующий, которым и питаются тяговые электродвигатели. В качестве статических преобразователей переменного тока в постоянный используют полупроводниковые вентили.

Линии, электрифицированные на переменном токе, обслуживают электровозы и электропоезда различных серий. На грузонапряженных участках с тяжелым профилем работают двенадцатиосные электровозы ВЛ85 с тяговыми электродвигателями НБ-514 мощностью 835 кВт, а также восьмиосные

электровозы ВЛ80Р, ВЛ80С, ВЛ80Т, ВЛ80К с тяговыми электродвигателями НБ-418К мощностью 790 кВт. Электровозы ВЛ85 и ВЛ80Р имеют рекуперативный электрический тормоз, электровозы ВЛ80С и ВЛ80Т оборудованы реостатным электрическим тормозом. На более легких участках применяют шестиосные электровозы ВЛ60К с тяговыми электродвигателями НБ-412К мощностью 775 кВт.

Для работы с грузовыми и пассажирскими поездами выпускаются шестиосные электровозы ВЛ65 с тяговыми электродвигателями НБ-514. На них предусмотрено рекуперативное торможение.

Дальнее пассажирское движение обслуживают шестиосные электровозы ЧС4Т с реостатным торможением, ЧС4 без электрического торможения. Они оснащены тяговыми электродвигателями AL4442nP мощностью 850 кВт. Применяются так же пассажирские электровозы ВЛ60ПК с тяговыми электродвигателями НБ-412К.

На некоторых стыковых участках постоянного и переменного тока работают грузовые электровозы на два рода тока: восьмиосные ВЛ82 и ВЛ82М. Пригородные линии обслуживают электропоезда переменного тока ЭР9М, ЭР9Е, имеющие одинаковое механическое оборудование с электропоездами ЭР2, а также ЭД9Т и ЭД9М с удлиненным до 21,5 м вагонами.

4.2. Внешние характеристики преобразовательной установки

На рис. 4.1 показана упрощенная схема электроподвижного состава переменного тока. Тяговый трансформатор **Тр** служит для снижения напряжения контактной сети U_C = 25000 В до значения, необходимого для работы тяговых электродвигателей. В выпрямителе **В** переменный ток преобразуется в постоянный пульсирующий ток. Пульсации тока ухудшают коммутацию электродвигателей. Поэтому в цепь выпрямленного тока $I_в$ включают сглаживающий реактор **СР,** уменьшающий их.

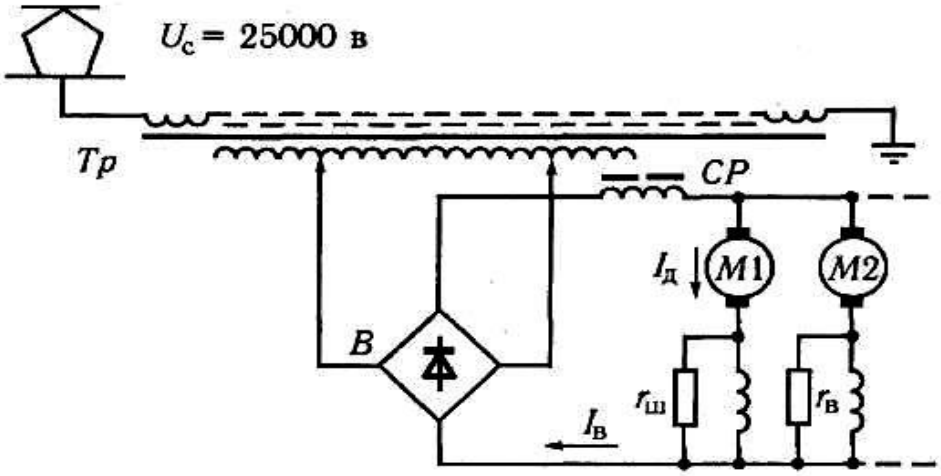


Рис. 4.1. Упрощенная электрическая схема электроподвижного состава переменного тока

Степень сглаживания пульсирующего тока оценивают ***коэффициентом относительной пульсации*** **$к_{по}$,** равным отношению пульсации тока к постоянной составляющей выпрямленного тока. При пульсации тока в пределах ± 0,25 $I_в$ коэффициент $к_{по}$ равен 0,5.

Тяговые электродвигатели **М1, М2** и т.д. на электровозах включают параллельно. На электропоездах используют иногда последовательно-параллельное соединение (например, на электропоездах ЭР9). При этом выпрямленный ток:

$$I_в = a \cdot I_д, \qquad (4.1)$$

где a – число параллельных ветвей ТЭД, подключенных к одной выпрямительной установке.

Кроме сглаживающего реактора, уменьшение пульсации магнитного потока, необходимое для улучшения коммутации тягового электродвигателя и снижения магнитных потерь, достигают снижением пульсации тока в обмотке возбуждения. С этой целью параллельно ей устанавливают резистор $r_ш$, имеющий незначительное индуктивное и большое активное сопротивление.

Если условно разложить пульсирующий выпрямленный ток на переменную и постоянную составляющие, то увидим, что его переменная составляющая замыкается в основном через шунтирующий резистор $r_ш$, имеющий значительно меньшее индуктивное сопротивление, чем обмотка возбуждения, а постоянная составляющая – в основном через обмотку возбуждения, имеющую активное сопротивление значительно меньшее, чем шунтирующий резистор.

Таким образом, резистор $r_ш$ играет роль фильтра. Через обмотку возбуждения проходит в основном постоянная составляющая, вследствие чего и снижаются пульсации тока и магнитного потока.

В связи с включением постоянного резистора $r_ш$ тяговые электродвигатели электроподвижного состава переменного тока работают не при полном

возбуждении, а при так называемом нормальном возбуждении (**НВ**), которому соответствует 0,92 0,97.

Напряжение на электродвигателях регулируют, воздействуя на коэффициент трансформации трансформатора. Для этого ступенями изменяют число витков его обмоток. Такие ступени напряжения на электродвигателях называют ступенями регулирования или позициями главного переключателя ступеней.

На эксплуатируемых грузовых электровозах и моторных вагонах электропоездов используют регулирование на стороне низшего напряжения трансформатора (система низковольтного регулирования), при котором вторичная обмотка трансформатора секционирована. На пассажирских электровозах ЧС4 и ЧС4Т применено регулирование на первичной стороне тягового трансформатора (система высоковольтного регулирования).

Напряжение на преобразовательной установке не остается постоянным, а изменяется в зависимости от тока нагрузки. С увеличением тока тягового электродвигателя, а следовательно, и выпрямленного тока выпрямленное напряжение уменьшается. Это происходит вследствие увеличения периода коммутации тока в вентилях выпрямителя, увеличения падения напряжения в обмотках трансформатора и сглаживающего реактора, а также в вентилях.

Среднее значение напряжения на тяговых электродвигателях или выпрямленное напряжение определяют по формуле:

$$U_в = U_{во} - \frac{2}{\pi} X - R_{об} I_в - \Delta U_{вент}, \qquad (4.2)$$

где $U_{во}$ – выпрямленное напряжение при холостом ходе ($I_в$ = 0); коэффициент, учитывающий влияние пульсации выпрямленного тока на реактивное падение напряжения трансформатора (при $к_{по}$ = 0,5 коэффициент 1,1); X – индуктивное сопротивление обмоток трансформатора; $R_{об}$ – общее активное сопротивление преобразовательной установки, приведенное к вторичной обмотке тягового трансформатора; $\Delta U_{вент}$ падение напряжения в вентилях. Выпрямленное напряжение при холостом ходе:

$$U_{во} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0{,}9U_2, \qquad (4.3)$$

где U_2 – действующее значение напряжения на вторичной обмотке тягового трансформатора.

Индуктивное сопротивление X обмоток трансформатора зависит от индуктивной составляющей напряжения короткого замыкания $U_{хн}$, выражаемой в процентах от номинального напряжения трансформатора, обычно $U_{хн}$ = 10...14 %.

Индуктивное сопротивление:

$$X \approx U_{хн}U_2 / 100I_{вн},$$

где $I_{вн}$ – номинальный выпрямленный ток, равный номинальному току тягового электродвигателя, умноженному на число параллельно соединенных двигателей по формуле (4.1).

Общее активное сопротивление преобразовательной установки при мостовой схеме выпрямления имеет вид:

$$R_{общ} \approx (R_1 / к_{2т} \approx R_2) \cdot к_{эф2} \approx R_{ср}к_{вэф2},$$

где R_1, R_2 – активные сопротивления соответственно первичной и вторичной обмоток трансформатора; $к_т$ – коэффициент трансформации тягового трансформатора:

$$к_т \approx U_с / U_2 \approx 0{,}9U_с / U_{во}; \quad (4.4)$$

$R_{ср}$ – активное сопротивление сглаживающего реактора; – коэффициент, учитывающий, что в период коммутации активное падение напряжения не действует в цепи выпрямленного тока и его составляющая не входит в сумму падения выпрямленного напряжения. В практических расчетах коэффициент принимают независящим от выпрямленного тока и при напряжениях короткого замыкания трансформатора 10...15 %, принимают номинальное значение 0,7; $к_{вэф}$ – коэффициент эффективности выпрямленного тока, равный отношению эффективного (действующего) значения выпрямленного тока к его среднему значению:

$$к_{вэф} \approx I_{вэф} / I_в. \quad (4.5)$$

Он зависит от степени сглаживания выпрямленного тока:

$$к_{вэф} \approx \sqrt{1 \approx 0{,}13(к_{по})^2};$$

при $к_{по}$ = 0,5 коэффициент $к_{вэф}^2$ 1,04; $к_{эф}$ – коэффициент эффективности переменного тока, определяемый отношением эффективного значения тока вторичной обмотки трансформатора к выпрямленному току: $к_{эф} \approx I_2 / I_в$.

Он зависит от коэффициента относительной пульсации: $к_{эф}$ $\approx 0{,}88 \approx 0{,}18(к_{по})$; при $к_{по}$ = 0,5; $к^2_{эф} \approx 0{,}94$.

Падение напряжения $U_{вент}$ на одном силовом полупроводниковом кремниевом вентиле составляет при номинальных нагрузках тяговых электродвигателей 0,9... 1 В.

В связи с тем, что падение напряжения групп последовательно включенных вентилей по сравнению с номинальным напряжением на тяговых электродвигателях незначительно, в расчетах им иногда пренебрегают. В выражении (4.2) величину

$$\square \quad \_X \square R_{об} \square R_э; \qquad (4.6)$$

$\square$

называют ***эквивалентным сопротивлением преобразовательной установки.*** Тогда выражение для выпрямленного напряжения будет иметь вид:

$$U_в \square U_{во} \square R_э I_в \square\square U_{вент}. \qquad (4.7)$$

Для расчета удобно эквивалентное сопротивление преобразовательной установки $R_э$ привести к току одного тягового электродвигателя: $R\square_э \square a\square R_э$. Тогда выпрямленное напряжение:

$$U_в \square U_{во} \square R\square_э I_д \square \square U_{вент}. \qquad (4.8)$$

Если известны параметры трансформатора, сглаживающего реактора и коэффициент трансформации, по формулам (4.2), (4.7) или (4.8) можно определить зависимость изменения выпрямленного напряжения от тока нагрузки тягового электродвигателя или преобразовательной установки. Зависимость выпрямленного напряжения от тока электродвигателя (или от выпрямленного тока) на каждой ступени регулирования при номинальном напряжении контактной сети называют ***внешней характеристикой преобразовательной установки.*** Электроподвижной состав имеет несколько внешних характеристик. Каждая из них пронумерована и соответствует определенной ступени регулирования напряжения – позиции главного переключателя.

Внешнюю характеристику, соответствующую высшей ступени регулирования

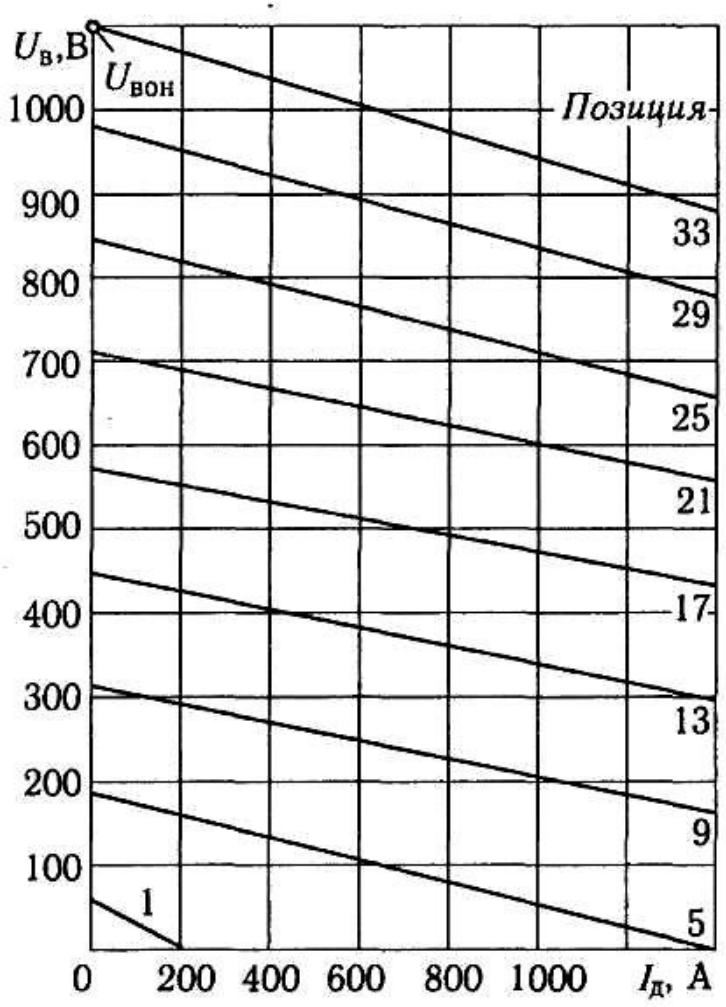


Рис. 4.2. Внешние характеристики преобразовательной установки электровозов ВЛ80^С, ВЛ80^Т, ВЛ80^К

напряжения, называют ***номинальной.*** На этой характеристике находится точка номинального напряжения на тяговых двигателях $U_{вн}$, соответствующая номинальному току нагрузки, и точка напряжения $U_{вон}$ (см. рис. 4.2) при холостом ходе
($I_д = 0$).

Выражения (4.7) или (4.8) показывают, что внешняя характеристика при неизменной величине $R_э$ или $R'_э$ является прямой линией.

Угол ее наклона зависит от эквивалентного сопротивления, на которое наибольшее влияние оказывает индуктивное сопротивление X обмоток тягового трансформатора. В связи с тем, что при регулировании выпрямленного напряжения изменением числа включенных витков обмоток трансформатора величина

$R_э$ или $R'_э$ изменяется, углы наклона внешних характеристик, соответствующих разным ступеням регулирования напряжения, также изменяются.

На отечественных электровозах ВЛ80С, ВЛ80Т, ВЛ80К и ВЛ60К применено регулирование со стороны низшего напряжения и встречно-согласное включение полуобмоток трансформатора. Верхняя и нижняя характеристики (см. рис. 4.2) имеют больший угол наклона, так как на позициях, которым они соответствуют, включены все секции обмотки трансформатора и, следовательно, значения X и $R_{об}$ наибольшие.

Средние характеристики имеют меньший наклон из-за меньшего числа включенных секций обмотки трансформатора. В случае регулирования напряжения со стороны высшего напряжения трансформатора наиболее пологими являются внешние характеристики на начальных и наивысших ступенях регулирования. Характеристики средних позиций имеют больший угол наклона.

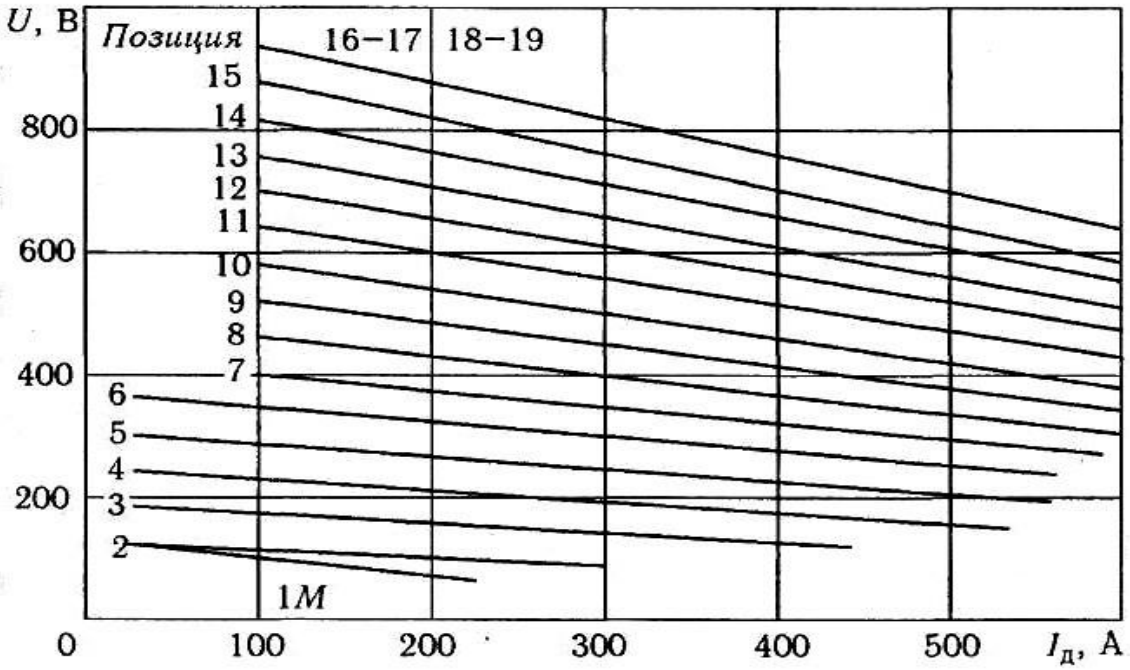


Рис. 4.3. Внешние характеристики преобразовательной установки электропоезда ЭР9П

На электропоездах ЭР9П применено регулирование напряжения на вторичной стороне трансформатора без использования встречно-согласного включения обмоток. Поэтому здесь на более высоких ступенях регулирования задействовано большее число витков обмотки трансформатора, и внешние характеристики (рис. 4.3) имеют больший наклон по сравнению с характеристиками низших ступеней регулирования. Исключение составляет маневровая ступень **1М,** на которой в цепь тяговых электродвигателей включен резистор для ограничения тока, а следовательно, и силы тяги в первый момент пуска (с целью ограничения ускорения поезда).

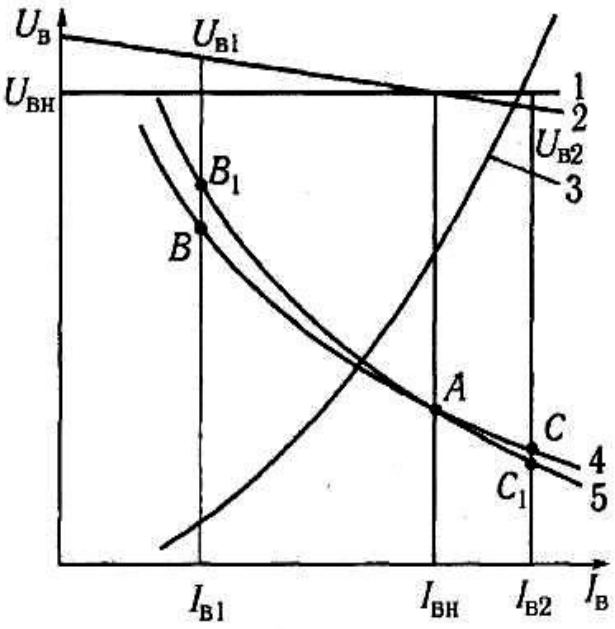


Рис. 4.4. Влияние внешней характеристики преобразовательной установки на характеристики тяговых электродвигателей

4.3. Характеристики тяговых электродвигателей с учетом внешней характеристики

Снижение выпрямленного напряжения с увеличением нагрузки вызывает изменение скоростных характеристик тягового электродвигателя. Только при

номинальном токе электродвигателей подводимое к ним выпрямленное напряжение имеет номинальное значение. При нагрузках меньше номинального напряжение будет выше номинального, а следовательно, будет выше и скорость движения по сравнению со скоростью при номинальном напряжении. При нагрузках выше номинального напряжение и скорость ниже, чем при номинальном напряжении.

В случае параллельного соединения тяговых электродвигателей напряжение $U_д$, подведенное к каждому из них, равно выпрямленному напряжению $U_в$. Если известна скоростная характеристика **4** (рис. 4.4), снятая при неизменном напряжении $U_{вн}$ (прямая **1**) на электродвигателях с учетом постоянного ослабления возбуждения (при нормальном возбуждении), то характеристику при изменяющемся напряжении в соответствии с внешней характеристикой **2** преобразовательной установки строят следующим образом.

При номинальном токе $I_{дн}$, а следовательно, и $I_{вн}$ тяговый электродвигатель находится под напряжением $U_{вн}$, и скоростная характеристика проходит через точку **А.** При токе нагрузки $I_{д1} < I_{дн}$, которому соответствует ток $I_{в1} < I_{вн}$, напряжение $U_{в1}$ оказывается больше, чем $U_{вн}$. В случае более высокого напряжения скорость движения будет выше (точка $\mathbf{B_1}$ вместо точки **В**). При токе $I_{в2}$ (или $I_{д2}$) большем, чем $I_{вн}$, напряжение $U_{в2}$ на внешней характеристике **2** окажется ниже $U_{вн}$ и скорость также будет ниже (точка $\mathbf{C_1}$ вместо **С**).

Аналогично можно найти точки при других токах и через них провести скоростную характеристику (кривая **5**) при изменении напряжения в соответствии с внешней характеристикой **2.** Расчет обычно выполняют аналитически. Скорость движения ЭПС с электродвигателями постоянного тока находят по формуле (2.15). Подставив в нее на параллельном соединении тяговых электродвигателей значение $U_д = U_в$ и, используя выражение (4.8), получим:

$$v = \frac{U^{до} - U^{вент} - R_э - r^1 I_д}{СФ}, \qquad (4.9)$$

где r_1 – сопротивление обмоток тягового электродвигателя с учетом постоянного шунтирования обмотки возбуждения.

В случае последовательно-параллельного соединения тяговых электродвигателей ($U_{во} = n\,U_{до}$) скорость определяют так:

$$v = \frac{U_{до} - U_{вент} - R_э - r_1 I_д}{СФ} \cdot \frac{n}{n}. \qquad (4.10)$$

По известной скорости движения v_1 при номинальном напряжении на электродвигателе $U_{дн} = U_{вн}$ (параллельное соединение) скорость движения v_2 при выпрямленном напряжении, определяемом внешней характеристикой преобразовательной установки, рассчитывают по формуле:

$$v_2 = \frac{U^{до} - U^{вент} - R_э - r^1 I_д}{U_{дн} - I_д r_1} v_1. \qquad (4.11)$$

При последовательно-параллельном соединении тяговых электродвигателей скорость:

$$\frac{U_{до} - U_{вент} - R_э - r_1 I_д}{U_{дн} - I_д r} \; n \; v_2 \; n \; v_1. \qquad (4.12)$$

Сила тяги электродвигателя при каждом токе $I_д$ или $I_в$ не зависит от напряжения, и в случае его питания через преобразовательную установку электротяговая характеристика **3** остается неизменной.

4.4. Регулирование скорости движения при ступенчатом регулировании напряжения

Скорость движения ЭПС однофазного тока со статическими преобразователями регулируют изменением напряжения и ослаблением возбуждения. Пусковой реостат здесь не применяют вследствие его неэкономичности. Число ступеней регулирования напряжения зависит от числа и способа включения секций обмоток трансформатора. Напряжения ступеней определяют по допустимым изменениям силы тяги при пуске, т.е. по значению коэффициента неравномерности пуска.

Сила тяги электроподвижного состава и ток тягового электродвигателя при пуске ограничиваются условиями сцепления или допустимым током электродвигателей по коммутации. Для электровозов переменного тока со ступенчатым регулированием напряжения расчетный коэффициент сцепления определяют по формуле (1.9).

Максимальный ток тяговых электродвигателей $I_{д\,max}$ по условиям коммутации устанавливают (1,4...1,6) $I_{дч}$, соответственно ток $I_{дп}$ будет равен (1,2...1,4) $I_{дч}$.

Пусковую диаграмму, демонстрирующую зависимость скорости движения от тока электродвигателей на различных ступенях регулирования (позиций) с горизонтальными линиями перехода с одной ступени на другую, можно определить несколькими способами в зависимости от заданных условий. Однако обычно ее строят графическим методом. В осях координат $v(I_д)$ наносят

характеристику тягового электродвигателя, построенную с учетом внешней характеристики преобразовательной установки (кривая **1,** рис. 4.5), и проводят вертикальные линии, соответствующие $I_{д\ min}$ и $I_{д\ max}$. По оси абсцисс влево откладывают значение напряжения холостого хода $U_{до}$, а по оси ординат вниз – значение $R'_э$.

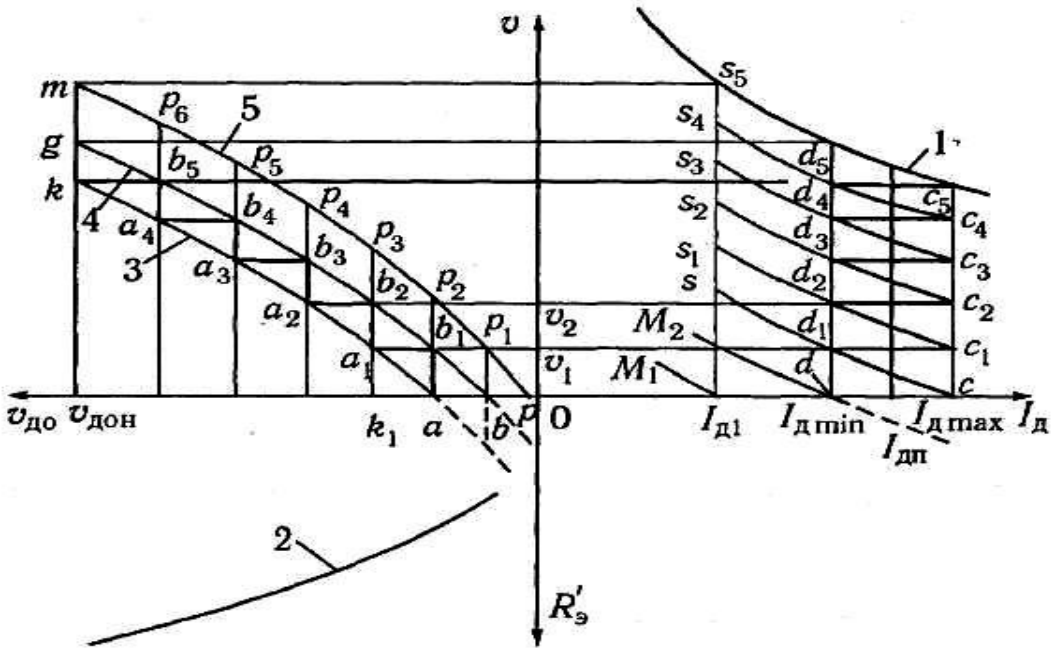


Рис. 4.5. Принцип построения пусковой диаграммы с учетом внешней характеристики преобразовательной установки

В том случае, когда пусковую диаграмму строят для определения ступеней регулирования и значения $R'_э$ неизвестны, можно использовать данные уже построенных трансформаторов для электровозов или электропоездов и взять значения $R'_э$, по аналогии с ними.

Из формулы (4.10) видно, что для каждого значения тока, в том числе и для токов $I_{д\ max}$ и $I_{д\ min}$, можно определить зависимость $v(U_{до})$ по известным значениям $R'_э$, r_1, СФ, $\Delta U_{вент}$ и n. Значение **СФ** можно взять из нагрузочных характеристик тяговых электродвигателей при нормальном возбуждении, значения $R'_э$ определяют по кривым $R'_э(U_{до})$ (кривая **2**).

При скорости выхода на характеристику **1** электродвигатели будут находиться под напряжением высшей ступени регулирования, которой соответствует напряжение холостого хода $U_{д\ он}$ (точки **k** и **g** соответственно при токах $I_{д\ max}$ и $I_{д\ min}$. Пользуясь формулой (4.10), для каждого значения тока $I_д$ (в том числе и для $I_{д\ max}$ и $I_{д\ min}$) можно определить скорость **v** при нескольких (пяти –

шести) значениях напряжения холостого хода ($U_{до}$, в том числе при v = 0). Плавные кривые, соединяющие полученные точки, показаны на рис. 4.5: для тока $I_{д\ max}$ – кривая **3,** для тока $I_{д\ min}$ – кривая **4.**

Необходимо рассмотреть, как будет меняться ток $I_д$ и скорость v при постоянном значении напряжения $U_{до}$. Если под действием тока $I_{д\ max}$ тяговый электродвигатель разовьет силу тяги, и поезд придет в движение, то за счет наведения ЭДС в обмотке якоря ток в электродвигателе будет уменьшаться. При скорости $\mathbf{v_1}$, (отрезок $\mathbf{ab_1}$) ток в нем уменьшится до $I_{д\ min}$, так как точка $\mathbf{b_1}$ находится на кривой **bg,** соответствующей току $I_{д\ min}$. Следовательно, при изменении скорости в пределах $\mathbf{ab_1}$ ток будет изменяться от $I_{д\ max}$ до $I_{д\ min}$. Зависимости $v(I_д)$ соответствует кривая **cd.**

Если при скорости $\mathbf{v_1}$ увеличить напряжение $U_{до}$, то, естественно, возрастет и ток $I_д$. Повышение напряжения при практически неизменной скорости происходит по горизонтальной линии, проведенной влево из точки $\mathbf{b_1}$. Чтобы при этом ток $\mathbf{I_д}$ не превысил величины $I_{д\ max}$, напряжение $U_{до}$ должно быть увеличено на отрезок $\mathbf{b_1a_1}$ и составить величину $\mathbf{0k_1}$; (точка $\mathbf{a_1}$, лежит на кривой **ak,** соответствующей току $I_{д\ max}$). Прирост напряжения вызовет увеличение тока по горизонтальной линии $\mathbf{dc_1}$. Под действием тока и силы тяги скорость будет возрастать дальше, а ток с ее увеличением – снижаться. При скорости $\mathbf{v_2}$, равной отрезку $\mathbf{k_1b_2}$, ток уменьшится до значения $I_{д\ min}$ (точки $\mathbf{b_2}$ и $\mathbf{d_1}$). Следовательно, зависимость $v(I_д)$ представится кривой $\mathbf{c_1d_1}$.

Рассуждая аналогично, определяем необходимые приращения напряжения $\mathbf{b_2a_2}$, затем $\mathbf{b_3a_3}$ и т.д. и характеристики $v(I_д)$ для каждой ступени регулирования — $\mathbf{c_2d_2}$, $\mathbf{c_3d_3}$ и т.д. Таким образом, определение ступеней регулирования сводится к построению вертикальных и горизонтальных линий между кривыми $v(U_{до})$ при $I_{д\ max}$ и $I_{д\ min}$. Последняя горизонтальная линия может не попасть в точку **k,** поэтому построение горизонтальных и вертикальных линий начинают от точки **k** в направлении к точке **a.**

Для построения маневровых характеристик, на которых потребляемый ток электродвигателя меньше пускового, линии $v(U_{до})$ проведены и в зоне отрицательных скоростей. В ней нужно построить такое число ступеней, которое необходимо для получения наименьшего тока на первой маневровой позиции. Ток электродвигателей на первой маневровой ступени определяют по кривым $F_{кд}(I_д)$, как и при системе постоянного тока, исходя из допустимого ускорения ЭПС на горизонтальном прямолинейном пути. Иногда при расчетах допустимо упрощенное определение значения тока на первой позиции: **30 %** от тока часового режима ($I_{д1} = 0{,}3*I_{дч}$ при v = 0).

Таким образом, ступенчатая линия **kb5a4b4a$_3$b$_3$** и т.д. обеспечивает построение кривых v($I_д$) с изменением тока при переходе на каждую последующую позицию в пределах $I_{д\,max} - I_{д\,min}$.

Чтобы построить характеристики v($I_д$) на промежуточных ступенях регулирования, кроме токов $I_{д\ max}$ и $I_{д\ min}$ необходимо задаться еще несколькими значениями тока. На рис. 4.5 показано построение точек при токе $I_{д1}$. Для него строят кривую тем же методом, что и для токов $I_{д\ max}$ и $I_{д\ min}$ (кривая **5**). Пересечения вертикальных линий, соответствующих напряжению $U_{до}$ на каждой ступени регулирования, с кривыми v($U_{до}$) дают скорости движения при данном токе $I_{д1}$ (точки **p$_1$, p$_2$, p$_3$** и т.д.). Перенеся эти точки вправо до пересечения с линией, соответствующей току $I_{д1}$ в первом квадранте, определим точки **s, s$_1$, s$_2$, s$_3$** и т.д. Кривые, проведенные через точки **cds, c$_1$d$_1$s$_1$** и т.д., являются характеристиками тягового электродвигателя на соответствующей ступени регулирования.

На пусковой диаграмме изменение тока при пуске с реализацией наибольших допустимых токов тяговых электродвигателей изображают жирными линиями. Кроме того, на нее наносят характеристики при ослабленном возбуждении, которые строят так же, как и для ЭПС постоянного тока. Подобное построение пусковой диаграммы позволяет получить постоянные броски тока при переключении ступеней трансформатора. Приращения напряжения при этом требуются неодинаковые: в зоне низких скоростей они меньше. Однако для упрощения конструкции трансформатора и снижения числа контакторов переключателя ступеней часто применяют схемы, обеспечивающие равномерные приращения напряжения.

Так, на отечественных электровозах при низковольтном регулировании используют встречно-согласное включение частей обмоток трансформатора. В начале пуска нерегулируемую и регулируемую части обмоток, имеющие небольшую разницу в числе витков, включают встречно. ЭДС регулируемой части вычитается из ЭДС нерегулируемой части, и напряжение на преобразовательной установке получается минимальным. Затем регулируемую часть обмотки ступенями выключают, и выпрямленное напряжение повышается.

Далее регулируемую часть обмотки полностью выводят, и напряжение определяется только нерегулируемой частью. В этот момент регулируемую часть обмотки переключают, чтобы ее ЭДС совпадала по направлению с ЭДС нерегулируемой части. Подсоединение ступеней тех же секций регулируемой обмотки достигают дальнейшего повышения напряжения. Максимальное напряжение получают при включении всех секций регулируемой обмотки. В связи

с этим $R_э$ при низшей и высшей ступенях регулирования имеет большее значение, а при средних ступенях — меньшее.

Зависимость $R_э$ от $U_{во}$ в относительных единицах для низковольтного регулирования при встречно-согласном включении обмоток показана кривой **1** на рис.

4.6. Кривая **2** соответствует изменению этих величин при высоковольтном регулировании. Кривые **1** и **2** могут быть использованы для определения $R_э$ промежуточных ступеней регулирования при расчете пусковых диаграмм электровозов.

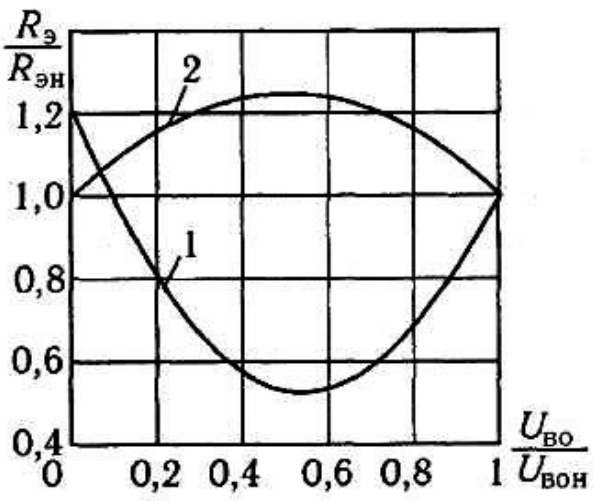


Рис. 4.6. Зависимость $R_э$ от $U_{во}$ в относительных единицах:
1 — при низковольтном регулировании и встречно-согласном включении полуобмоток трансформатора;
2 — при высоковольтном регулировании

Секции трансформатора при встречно-согласном включении обмоток, участвующие в работе в зоне малых, а затем повторно в зоне больших скоростей, дают одинаковые ступени напряжения. При этом броски тока при низких скоростях получаются большими, по мере увеличения скоростей они снижаются. Пусковая диаграмма такого электровоза (ВЛ80С) показана на рис. 4.7.

При переходе с одной ступени регулирования на следующую из-за особенностей способов соединения секций обмоток трансформатора, часть полученных ступеней можно использовать продолжительное время, а часть ступеней – кратковременно (только при разгоне). Характеристики и позиции главного контроллера, на которых допустима длительная езда, называют ходовыми и на пусковых диаграммах выделяют жирными линиями, остальные характеристики и позиции – переходными, их показывают более тонкими (или штриховыми) линиями. Так, на электровозах ВЛ80С, ВЛ80Т, ВЛ80К, ВЛ60К ходовыми характеристиками и позициями служат 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29 и 33-я позиции.

На остальных позициях тяговые электродвигатели должны работать кратковременно, т.к. возникают повышенные потери в трансформаторах и переходных реакторах и увеличиваются пульсации тока электродвигателей.

На электропоездах ЭР9П встречно-согласное включение обмоток не предусмотрено, и ходовыми позициями главного контроллера являются четные. На нечетных позициях возникают повышенные пульсации тока.

Регулирование скорости изменением возбуждения выполняют так же, как и на электроподвижном составе постоянного тока.

Если характеристики электродвигателя снимали при полном возбуждении, то их можно пересчитать на нормальное и ослабленное возбуждение способом так же, как и на электроподвижном составе постоянного тока.

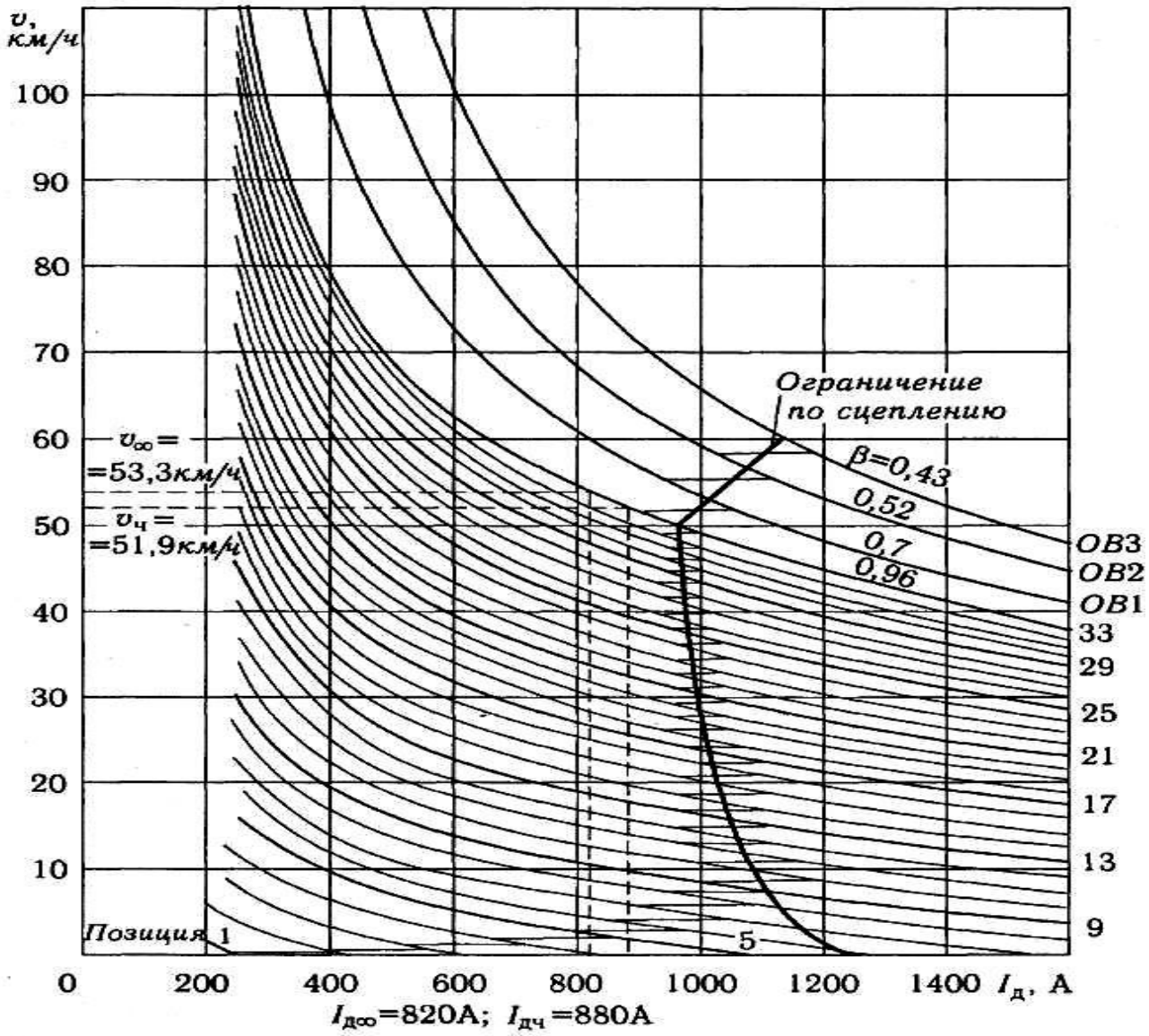


Рис. 4.7. Пусковая диаграмма электровоза ВЛ80^{С}

4.5. Плавное регулирование напряжения

Если вместо неуправляемых полупроводниковых вентилей использовать управляемые – тиристоры, то напряжение, подведенное к тяговым электродвигателям, можно регулировать плавно. Момент открытия тиристора может регулироваться подачей на дополнительный управляющий электрод открывающего импульса. До открытия вентиля напряжение от трансформатора к

тяговым электродвигателям не подводится. С момента отпирания тиристора тяговые электродвигатели находятся под напряжением.

Свойства тиристора таковы, что его нельзя закрыть воздействием на управляющий электрод. Он может закрыться при снижении тока до нуля или в случае приложения обратного напряжения. Поэтому вентиль остается открытым до конца полу периода. Чем позднее будет открыт тиристор, тем меньше времени тяговые электродвигатели будут под напряжением. При этом среднее напряжение на них будет также меньше. При угле отпирания , равном 180° тиристоры вообще открываться не будут, и выпрямленное напряжение будет равно нулю, а при 0 выпрямленное напряжение будет наибольшим.

Таким образом, изменяя угол отпирания тиристоров от 180° до нуля, можно плавно регулировать выпрямленное напряжение, а следовательно, и напряжение на тяговых электродвигателях от нуля до наибольшего значения.

На (рис. 4.8, а) показано синусоидальное изменение во времени напряжения на вторичной обмотке трансформатора на (см. рис. 4.8, б и в) — выпрямленное напряжение $U_в$. При угле, близком к 180° (см. рис. 4.8, б), площадь заштрихованных частей полусинусоид, соответствующих открытым тиристорам, невелика. Следовательно, среднее значение выпрямленного напряжения $U_{в\ ср}$, определяемое как отношение площади заштрихованной части синусоиды за полупериод к площади синусоиды за полупериод $T_п/2$, также мало. С уменьшением угла среднее напряжение возрастает (см. рис. 4.8, в).

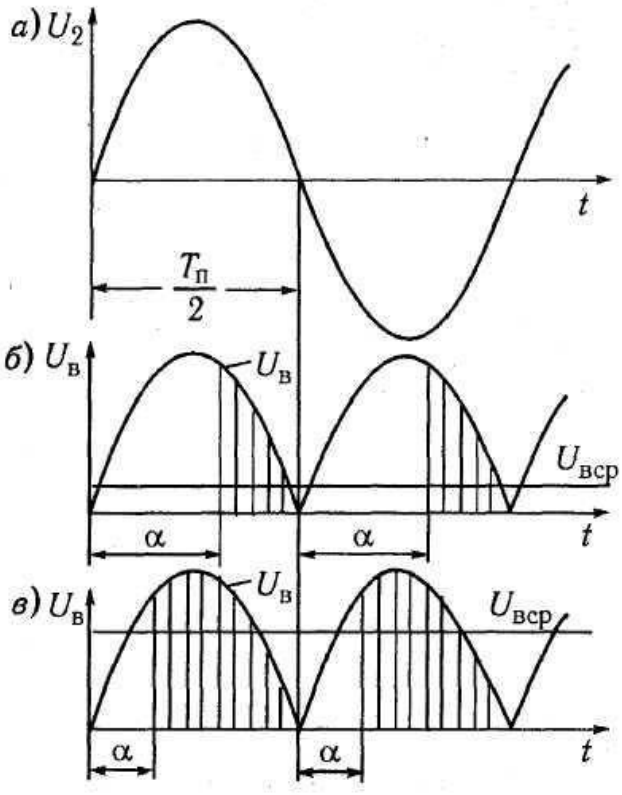


Рис. 4.8. Регулирование выпрямленного напряжения изменением угла открытия вентилей

Однако при плавном регулировании повышается пульсация выпрямленного тока и ухудшается форма кривой тока в первичной обмотке трансформатора, а следовательно, и в контактной сети. Это приводит к снижению коэффициента мощности, увеличению влияния системы электрической тяги на провода связи и возрастанию потерь энергии. Указанные недостатки проявляются при больших значениях угла отпирания вентилей. Чтобы уменьшить угол , плавное регулирование целесообразно использовать между отдельными ступенями напряжения, которые соответствуют различным значениям

коэффициента трансформации трансформатора.

Каждому значению среднего напряжения, т.е. постоянному углу отпирания вентилей, соответствуют скоростные характеристики, имеющие обычный вид. Однако эти характеристики могут занимать любое место в системе координат **v($I_д$)** от нуля до характеристики, соответствующей высшей ступени регулирования, при которой тиристоры открываются в начале каждого полупериода.

Такое регулирование напряжения применено на электровозах ВЛ85, ВЛ65 и ВЛ80Р. Тяговые трансформаторы имеют две одинаковые вторичные тяговые обмотки, от которых через тиристорный преобразователь получают питание два параллельно соединенных тяговых электродвигателя. На электровозе ВЛ80Р каждая обмотка разделена на три секции: две с напряжением по 307,5 В и одна – 615 В. Они позволяют получить четыре одинаковые ступени приращения напряжения (307,5 В; (307,5 + 307,5) = 615 В; (615 + 307,5) = 922,5 В и (615 + 615) = 1230 В).

На электровозах ВЛ85 и ВЛ65 применяют аналогичные секции обмоток трансформатора с напряжением 315, 315 и 630 В. В пределах каждой ступени регулирования угол отпирания тиристоров изменяется от 180° до нуля, и напряжение на тяговых электродвигателях плавно регулируется при сравнительно высоком коэффициенте мощности.

4.6. Характеристики электроподвижного состава со статическими преобразователями

Тяговые электродвигатели постоянного тока последовательного возбуждения электроподвижного состава однофазно-постоянного тока со статическими преобразователями обычно рассчитаны на работу при напряжении 750...1600 В. Электромеханические характеристики $v(I_д)$ и $F_{кд}(I_д)$ тягового электродвигателя НБ418К, установленного на электровозах ВЛ80С, ВЛ80Т, ВЛ80К, приведены на рисунке. (см. рис. 4.9, а при нормальном и трех ступенях ослабления возбуждения). Здесь же показана внешняя характеристика преобразовательной установки $U_д(I_д)$ на позиции 33 главного контроллера при напряжении сети 25 кВ.

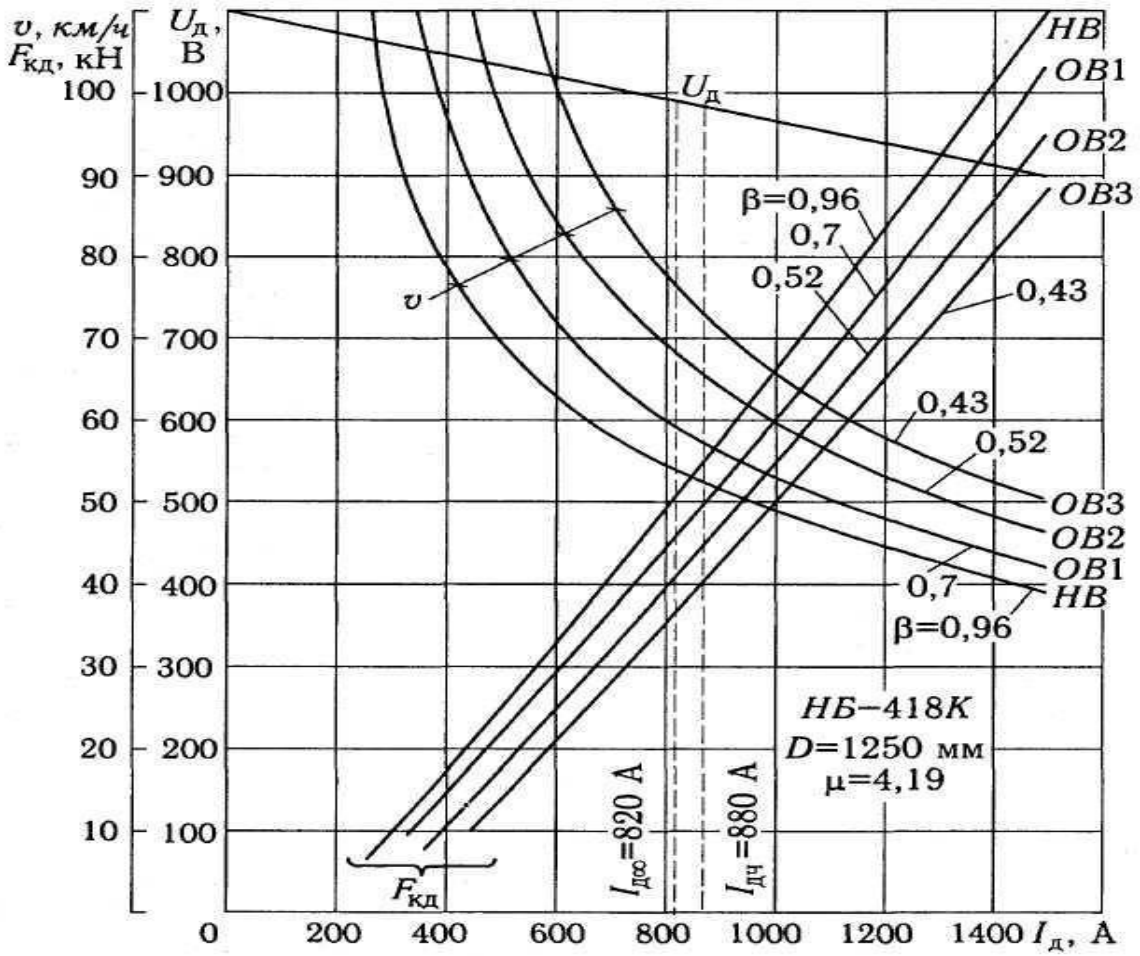


Рис. 4.9а. Электромеханические характеристики тягового электродвигателя НБ418К электровозов ВЛ80^С, ВЛ80^Т, ВЛ80^К на позиции 33 главного контроллера

Аналогичные электромеханические характеристики тягового электродвигателя НБ-514 электровоза ВЛ85 изображены на (рис. 4.9, б) для наибольшего напряжения (4-я зона регулирования). На рис. 4.10 показаны электромеханические характеристики тягового электродвигателя AL-4442nP, установленного на электровозах ЧС4Т и ЧС4.

Характеристики показаны при напряжении в сети 25 кВ, нормальном возбуждении **НВ** и на пяти ступенях ослабления возбуждения **ОВ1...ОВ5.** Скоростные характеристики приведены для высшей ступени регулирования напряжения – 32 позиции переключателя ступеней с учетом внешних характеристик преобразовательной установки $U_д(I_д)$. Эти внешние характеристики также нанесены на рисунок

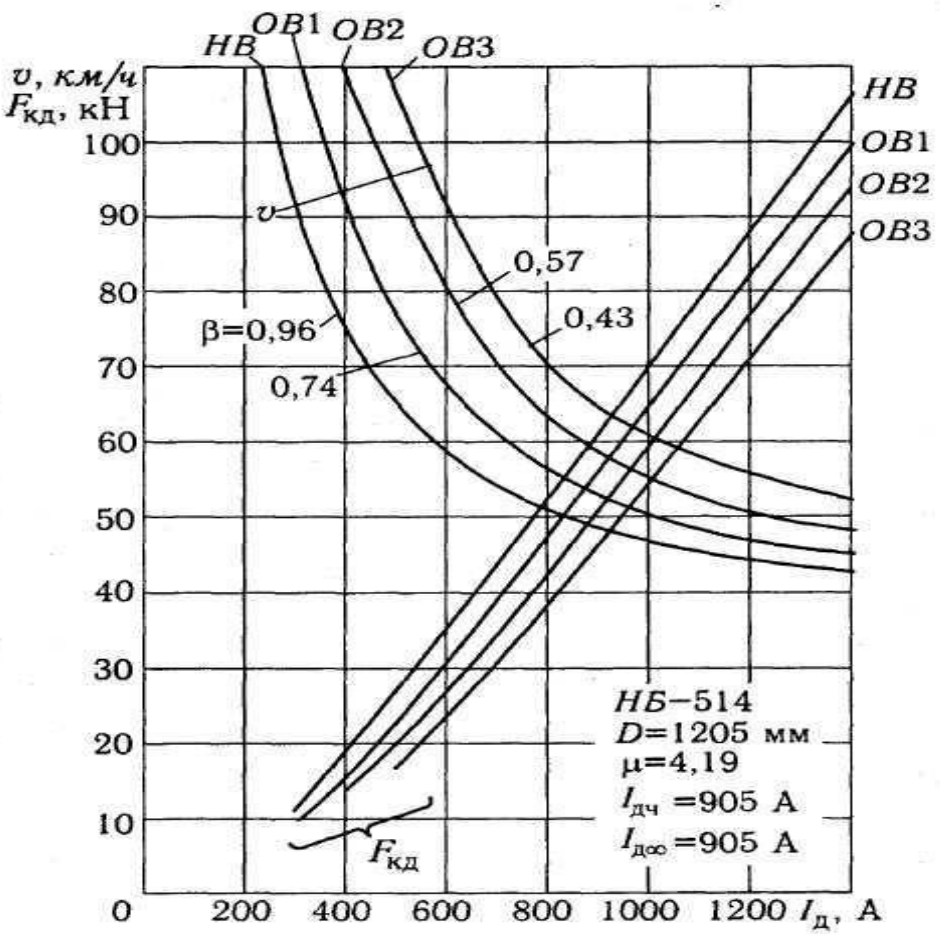


Рис. 4.9б. Электромеханические характеристики тягового электродвигателя НБ514 электровоза ВЛ85 на 4 зоне регулирования

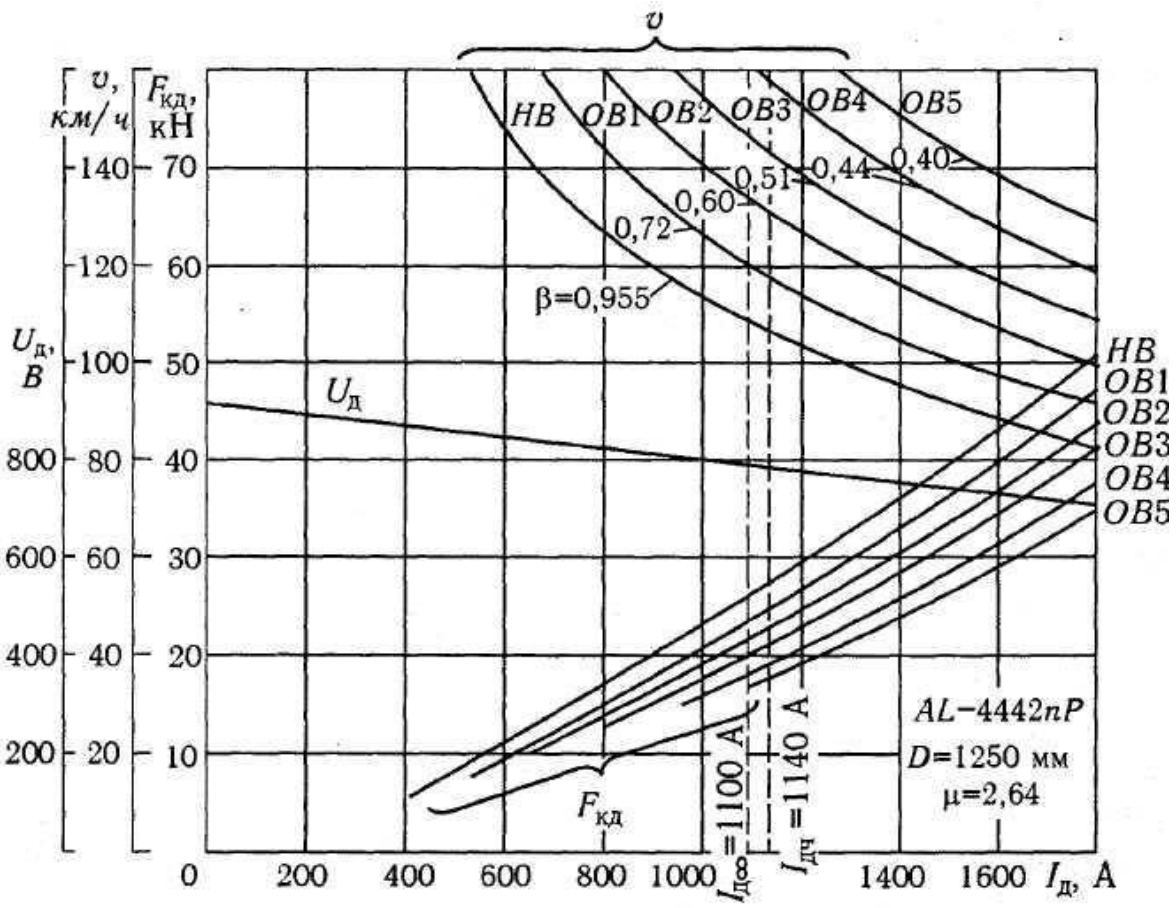


Рис. 4.10. Электромеханические характеристики тягового электродвигателя AL-4442nP электровозов ЧС4^т и ЧС4 на позиции 32 переключателя ступеней

Энергетические показатели ЭПС характеризуют коэффициентом мощности и КПД . При идеальном сглаживании выпрямленного тока ток в первичной обмотке трансформатора имеет прямоугольную форму. Подобная форма тока может быть представлена как результат наложения на основную гармонику синусоидального тока нескольких гармоник высшего порядка. Как известно, сдвиг по фазе между основными гармониками тока и напряжения характеризует cos. Коэффициент мощности учитывает, кроме сдвига по фазе, влияние высших гармонических составляющих несинусоидального тока на нагрузки сети и обмоток трансформатора.

При токе равном нулю (холостой ход) выпрямленное напряжение $U_{во} = 0{,}9U_2$. Если отсутствует сдвиг по фазе между основными гармониками напряжения и выпрямленного тока (cos 1,0), то мощность выпрямителя имеет вид:

$$P_в U_{во}I_в 0{,}9U_2I_в. \qquad (4.13)$$

Заменив напряжение U_2 через напряжение сети $U_с$, получим:$U_2 \approx U_с/к_т$. Тогда мощность равна:

$$P_в \approx 0{,}9U_сI_в/к_т. \quad (4.14)$$

Полная мощность, потребляемая электроподвижным составом из сети:

$$P = U_сI_1, \quad (4.15)$$

где I_1 – ток в первичной обмотке трансформатора.

При идеальном сглаживании выпрямленного тока и угле ≈ 0 можно ток I_1 заменить отношением $I_в/к_т$. Тогда мощность в вольт-амперах равна:

$$P = U_сI_в/к_т. \quad (4.16)$$

Если пренебречь потерями в трансформаторе, коэффициент мощности χ определяют как отношение выпрямленной активной мощности выпрямителя $P_в$ к полной мощности P. Тогда из выражений (4.14) и (4.16) следует:$\chi = P_в/P \approx 0{,}9$. Отсюда видно, что даже при активной нагрузке и $\cos\varphi = 1$ коэффициент мощности электровоза или моторного вагона, имеющих выпрямительные установки, составляет приблизительно 0,9 вследствие несинусоидальной формы тока (при идеальном сглаживании тока). Такое снижение коэффициента χ вызывает увеличение нагрузки контактной сети, оборудования тяговых подстанций, обмоток трансформатора и оказывает вредное влияние на линии связи.

Активная мощность $P_а$, без учета сравнительно малого по значению тока холостого хода трансформатора зависит от выпрямленного напряжения, подведенного к тяговым электродвигателям, выпрямленного тока, падения напряжения в вентилях и общего сопротивления преобразовательной установки:

$$P_а = U_в - U_{вент} - I_в R_{об} I_{в2}.$$

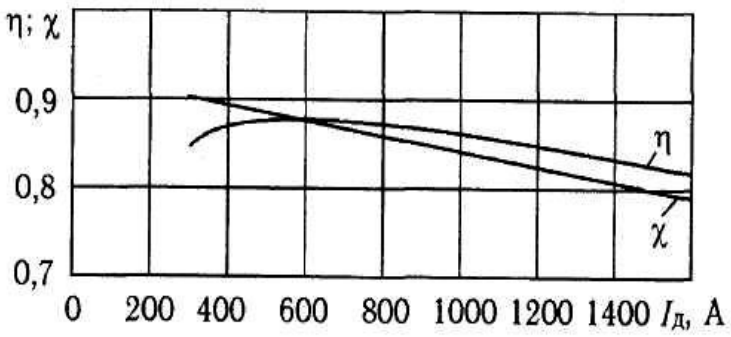


Рис. 4.11. Зависимость КПД и коэффициента мощности от тока электродвигателя электровоза переменного тока.

Полная мощность P при том же условии равна произведению напряжения U_2 на ток I_2. Подставив значение U_2 из выражения (4.3) и учитывая, что $I_2 = I_в к_{эф}$, получим:

$$P \square U_2 I_2 \square U_{во} I_в к_{эф} / 0{,}9. \qquad (4.17)$$

Коэффициент мощности равен:

$$\square \square P_{\underline{a}} \square 0{,}9 \square \frac{\square U_в \square \square U_{вент}}{\square \square I_в \square R_{об} I_{в2}}$$

$$P \qquad U_{во} I_в к_{эф}$$

или

$$\square \square 0{,}9 \square \frac{U^в \square \square U_{вент} \square R_{об} I_в}{U_{во} к_{эф}}, \qquad (4.18)$$

а с учетом формулы (4.8):

$$\square \square 0{,}9 \square \frac{U_{во} \square (R \square_э \square a \square R_{об}) I_д}{U_{во} к_{эф}}, \qquad (4\ 19)$$

Отсюда видно, что с увеличением тока $I_д$ коэффициент мощности уменьшается. Для электроподвижного состава со статическими преобразователями □ равен
0,75...0,9 (см. рис. 4.11). На низших ступенях регулирования (при малых $U_{во}$) коэффициент мощности имеет меньшее значение.

Коэффициент полезного действия преобразователя определяют как отношение мощности на выходе преобразователя к затраченной активной мощности:

$$\square_в \square \frac{U_д I_в \square_2 U_д I_в U_{вент} I_в \square P_{ст}}{R_{об} I_в \square \square},$$

где $P_{ст}$ – потери в стали трансформатора.

Из формулы (4.20) видно, что КПД преобразователя снижается с увеличением активного сопротивления цепей, падения напряжения в вентилях и потерь в стали трансформатора.

КПД электровоза или моторного вагона равен:

$$\square \square \square_в \square_д \square_п. \qquad (4.21)$$

Необходимо иметь в виду, что при прохождении пульсирующего тока по обмоткам тягового электродвигателя возрастают потери в стали, из-за пульсации магнитного потока и потери в меди, из-за увеличения эффективного значения пульсирующего тока по отношению к среднему его значению. Кроме того,

увеличиваются добавочные потери в электродвигателе. Поэтому кривая его КПД при пульсирующем токе располагается несколько ниже, чем при постоянном.

На основе электромеханических характеристик тяговых электродвигателей $v(I_д)$ и $F_{кд}(I_д)$ можно получить тяговые характеристики электровоза или моторного вагона тем же методом, который был использован при построении этих характеристик ЭПС постоянного тока.

Тяговые характеристики электровозов ВЛ80С, ВЛ80Т и ВЛ80К приведены на рис. 4.12. На графике показаны линии ограничения силы тяги по сцеплению колес с рельсами (сплошная линия **AS** для электровоза ВЛ80К массой 184 т и штрихпунктирная $\mathbf{A_1S_1}$ — для электровозов ВЛ80С и ВЛ80Т, имеющих массу 192 т).

Кривые **AS** и $\mathbf{A_1S_1}$ ограничения силы тяги по сцеплению имеют обычный характер, определяемый изменением расчетного коэффициента сцепления. При переключении ступеней трансформатора изменяется ток тягового электродвигателя, а следовательно, и сила тяги ЭПС от минимальной ($F_{ксц\ min}$) до максимальной ($F_{ксц\ max}$) относительно средней величины $F_{ксц}$. На рис. 4.12 ограничения ($F_{ксц\ min}$) и ($F_{ксц\ max}$) показаны для электровоза ВЛ80К штриховыми линиями. Именно линия **AS** зависимости $F_{ксц}$ (v), а не $F_{ксц\ max}$ (v) соответствует формулам (1.8) и (1.14).

Скорости переходов на ступени ослабления возбуждения и изменения силы тяги показаны тонкими (ВЛ80К) и штрихпунктирными линиями (ВЛ80С и ВЛ80Т). Для уточнения этих величин, а также токов при переходах характеристики дополняют таблицами переходов (аналогично электроподвижному составу постоянного тока). В качестве примера приведена табл. 4.1 переходов для электровоза ВЛ80С.

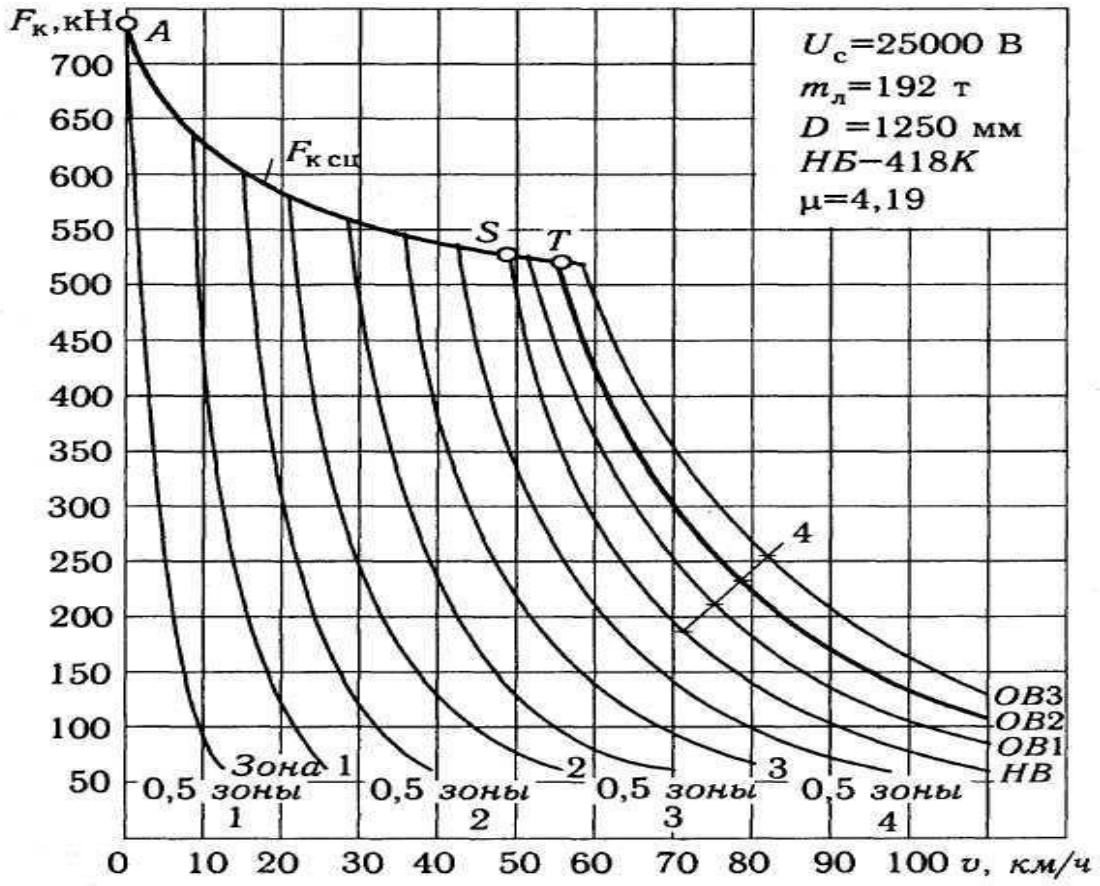


Рис. 4.13. Тяговые характеристики электровоза ВЛ80Р

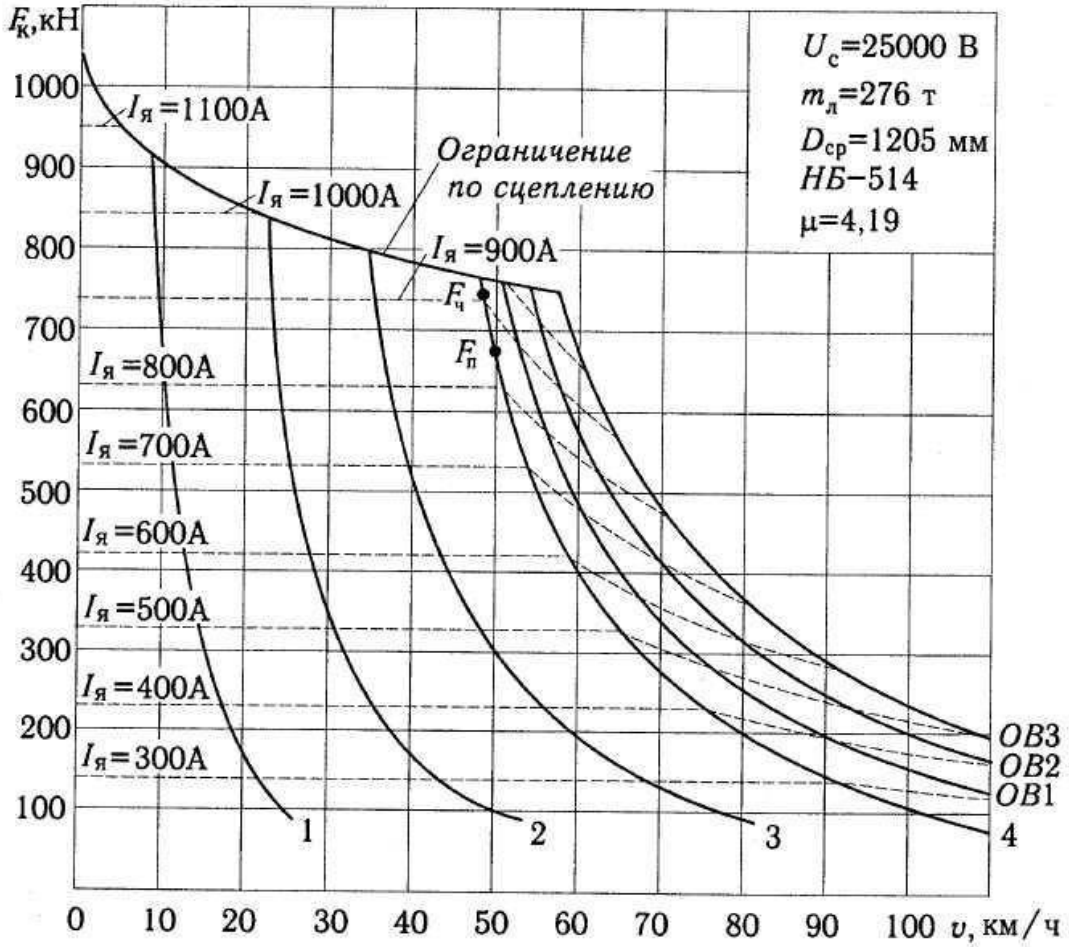


Рис. 4.14. Тяговые характеристики электровоза ВЛ85

Таблица 4.1

Переход	v	$F_к$	$I_д$	Id	Ida
–	км/ч	кН	А	А	А
НВ – ОВ1	51,5	451,3 – 525,8	810 – 1060	344 – 424	284 – 332
ОВ1 – ОВ2	54,5	547,1 – 514,0	860 – 1120	373 – 440	302 – 360
ОВ2 – ОВ3	58,0	461,1 – 500,3	1075 – 1130	400 – 460	330 – 370

Для упрощения расчетов силы тяги в зоне переходов на характеристики ослабленного возбуждения принимают усредненными по линии **ST** или $\mathbf{S_1T_1}$**.**

На рис. 4.13 приведены тяговые характеристики электровоза ВЛ80Р с плавным регулированием напряжения на тяговых электродвигателях для каждой из четырех зон регулирования при полностью открытых тиристорах и при половине напряжения зоны. На самом деле, характеристиками перекрыто все поле графика в связи с плавным изменением напряжения за счет изменения угла открытия тиристоров.

Линия **AST** показывает ограничение силы тяги по сцеплению. Она рассчитывается по формулам (1.8) и (1.14). В связи с плавным регулированием напряжения и отсутствием бросков тока и силы тяги ограничивающая сила $F_{ксц}$ соответствует не средним значениям тока, как показано на рис. 4.12, а находится в зоне предельных значений сил сцепления.

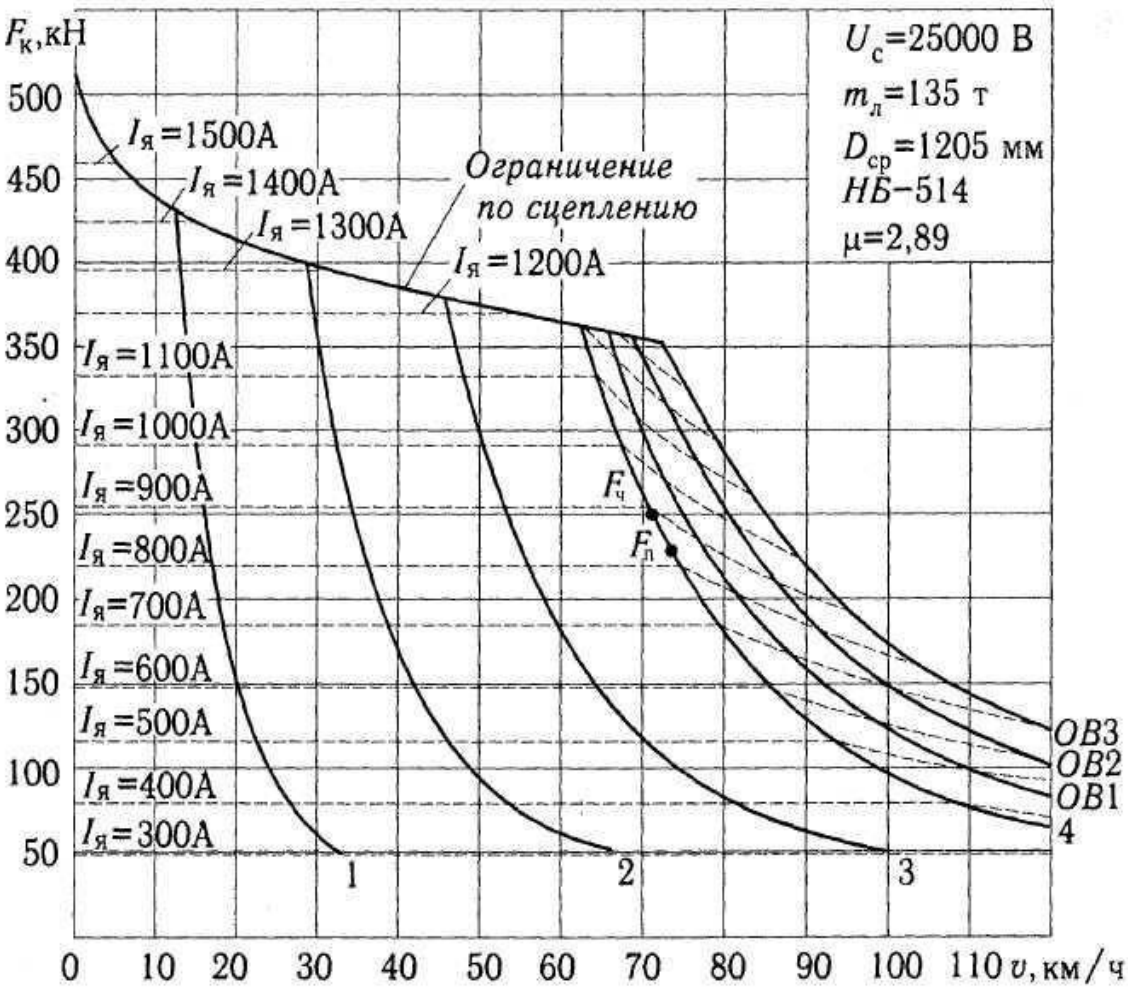


Рис. 4.15. Тяговые характеристики электровоза ВЛ65

На рис. 4.14 изображены тяговые характеристики двенадцатиосного электровоза ВЛ85 на 1, 2, 3 и 4-й зонах регулирования (при полностью открытых тиристорах) и трех ступенях регулирования возбуждения. На графике изображено ограничение силы тяги по сцеплению колес с рельсами. Кроме того, штриховыми линиями показаны токи тяговых электродвигателей от 300 до 1100 А. Точки $F_ч$ и $F_п$ соответствуют часовому и продолжительному режимам работы тяговых двигателей. На рис. 4.15 приведены тяговые характеристики шестиосного электровоза ВЛ65 с нанесенным ограничением по сцеплению и токами тяговых электродвигателей. На рис. 4.16 показаны тяговые характеристики электровозов ЧС4Т и ЧС4 с ограничивающей линией **AS** по току коммутации $I_{дп}$ = 1620 А. Ограничения по току $I_{дmax}$ и $I_{дmin}$ изображены штриховыми линиями ($F_{кп\ max}$ и $F_{кп\ min}$).

При переходах на позиции ослабления возбуждения силы тяги достигают максимальных значений ($F_{кп\ max}$). Для упрощения расчетов силы тяги в зоне переходов на позиции ослабления возбуждения принимают усредненными по линиям **ST** (см. рис. 4.12, 4.15) или $\mathbf{S_1T_1}$ (см. рис. 4.12).

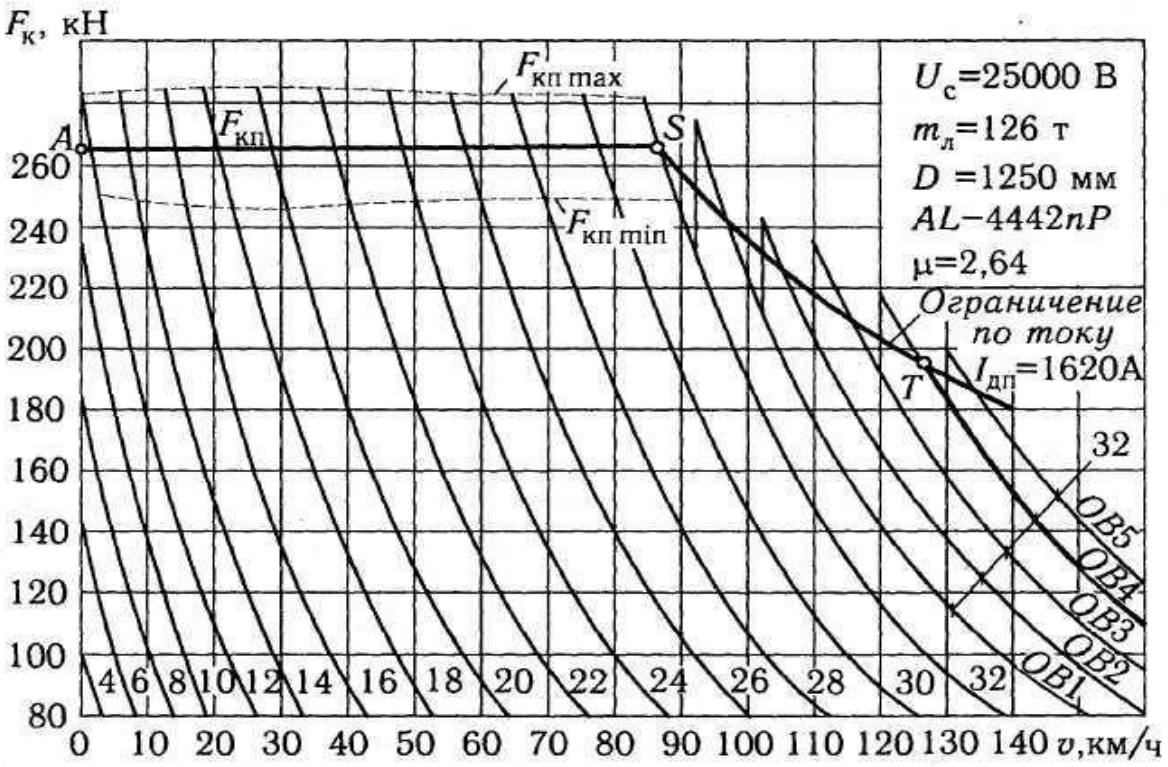


Рис. 4.16. Тяговые характеристики электровозов ЧС4^т и ЧС4

По тяговой характеристике можно построить удельные тяговые характеристики порядком, указанным в разделе 2.6.

Тема 5
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВОЗОВ
5.1. Особенности тяговых свойств

На тепловозе или дизель-поезде первичным двигателем является дизель, превращающий химическую энергию, заключенную в топливе, в механическую работу – вращение коленчатого вала. Для того чтобы дизель начал работать, необходимо вначале за счет принудительного перемещения поршня сжать воздух, находящийся в цилиндре, до давления 3...5 МПа (30...50 кгс/см^2). Он нагревается до температуры 500...600°С, превышающей температуру самовоспламенения дизельного топлива. Впрыскиваемое в этот момент в цилиндр через форсунки дизельное топливо воспламеняется, увеличивая давление приблизительно до 10 МПа (100 кгс/см^2). Под действием этого давления поршень перемещается в обратном направлении, совершая полезную работу (рабочий ход поршня).

Таким образом, для пуска дизеля необходимо вначале затратить энергию на сжатие воздуха в цилиндре от постороннего источника, а затем уже получить на его валу полезную работу. Обычно пуск осуществляют, вращая коленчатый вал дизеля главным генератором или электрическим стартером, получающим питание от аккумуляторной батареи.

Устойчивая работа дизеля по условиям сжатия воздуха и нормального процесса сжигания топлива возможна только, начиная с частоты вращения примерно в два-три раза меньшей номинальной частоты вращения коленчатого вала. Отсюда и диапазон частот вращения оказывается ограниченным, с одной стороны, этой минимальной, а с другой — номинальной частотами вращения. Регулировать давление в цилиндрах в широких пределах нельзя. Поэтому мощность дизеля можно увеличить за счет повышения частоты вращения коленчатого вала.

Условия пуска дизеля, диапазон частот вращения и изменения мощности не позволяют связать его коленчатый вал непосредственно со сцепными колесными парами тепловоза или дизель-поезда. На них вращающий момент должен регулироваться в широких пределах при скоростях движения поезда от нуля до наибольшей. Поэтому между дизелем и движущими колесными парами вводят специальное звено, называемое ***передачей. Передача должна обеспечить:***

♦ разъединение коленчатого вала дизеля и движущих колесных пар тепловоза или дизель-поезда;

♦ изменение соотношения частот вращения колесных пар и вала дизеля, с тем чтобы при неизменной частоте вращения вала дизеля поезд мог двигаться с разными скоростями;

♦ плавное регулирование силы тяги локомотива;

♦ изменение направления движения локомотива;

♦ возможно меньшие потери энергии в передаче.

Кроме того, передача должна обладать возможно меньшими массой и габаритами при высокой надежности работы.

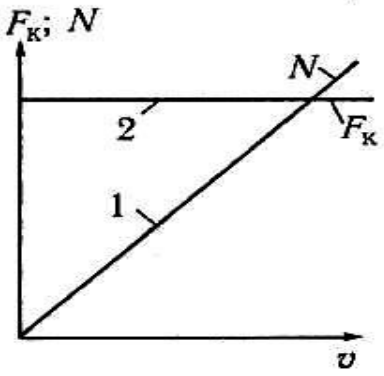


Рис. 5.1. Зависимость мощности от скорости (1) при постоянной силе тяги (2)

Отъединение вала дизеля от колесных пар позволяет вначале запустить дизель, довести вращение его вала до нужной частоты и только после этого включить передачу и передать вращающий момент на движущие колесные пары, чтобы тронуть поезд с места. Во время движения передача должна обеспечивать развитие всей мощности дизеля при различных скоростях.

Наибольшее распространение на магистральных тепловозах получила **электрическая передача,** при которой с валом дизеля соединяют вал якоря или ротора электрического генератора (главного генератора). От него получают электрическую энергию тяговые электродвигатели, связанные с движущими колесными парами тепловоза.

Применяется также (в основном на маневровых тепловозах) **гидравлическая передача,** состоящая из гидротрансформатора и гидромуфты, включаемых между валом дизеля и движущими колесными парами. Если дизели малой мощности (до

300...350 кВт), как правило, на мотовозах и автомотрисах, то используют механическую передачу, имеющую коробку скоростей, в которой находятся зубчатые колеса различных диаметров. Приводя в зацепление пары зубчатых колес с разным соотношением зубьев, получают несколько ступеней изменения силы тяги и скорости движения локомотива. Таким образом, наибольшая сила тяги, развиваемая движущими колесными парами, ограничивается дизелем, передачей и сцеплением колесных пар с рельсами.

5.2. Сила тяги тепловоза по дизелю

По условиям тяги поезда локомотив должен развивать наибольшую силу тяги при трогании и разгоне поезда, а также при движении по тяжелым подъемам. При этом мощность локомотива, равная работе, выполняемой в единицу времени, пропорциональна произведению силы тяги и скорости движения. Следовательно, в период трогания на малых скоростях движения мощность требуется меньше, чем в случае следования по тяжелому подъему с большей скоростью.

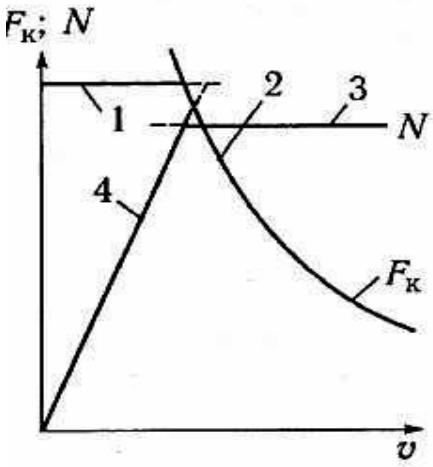


Рис. 5.2. Зависимость силы тяги и мощности от скорости

Если силу тяги поддерживать постоянной на всех скоростях движения (рис. 5.1, линия **2**), то мощность с увеличением скорости движения должна возрастать по линейному закону (линии **1**). Однако при этом наибольшая мощность дизеля будет использоваться только в зоне наибольших скоростей, в зоне меньших скоростей она будет недоиспользована. В том случае, когда локомотив имеет какую-то постоянную мощность (рис. 5.2, линия **3**), при меньших скоростях он может развивать большую силу тяги. С увеличением скорости сила тяги должна снижаться по гиперболе (кривая **2**). Такая зависимость и должна выдерживаться при работе дизеля с постоянной мощностью. В период разгона постоянной силе тяги (прямая **1**) соответствует возрастающая мощность (прямая **4**).

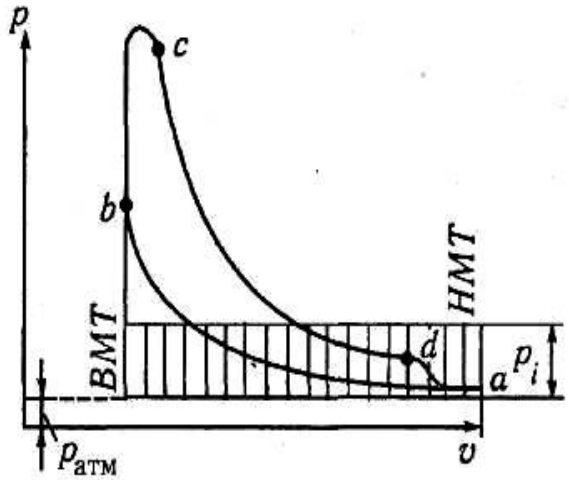


Рис. 5.3. Индикаторная диаграмма двухтактного дизеля тепловоза

Зависимость силы тяги тепловоза от скорости – тяговая характеристика – имеет вид гиперболы. Чтобы определить силу тяги тепловоза, рассмотрим процессы, происходящие в дизеле, с помощью ***индикаторной диаграммы.*** Она показывает, как изменяется давление в цилиндре в зависимости от положения поршня или от объема цилиндра.

Например, если поршень в двухтактном дизеле движется от нижней мертвой точки (**НМТ**) **a** (рис. 5.3) к верхней (**ВМТ**) **b,** вначале цилиндр продувается. В нем находится воздух под небольшим давлением, незначительно превышающим атмосферное $p_{атм}$. Затем идет процесс сжатия, и давление постепенно увеличивается. В точке **b** в сжатый и нагретый воздух впрыскивается топливо, которое воспламеняется, и давление резко повышается.

Процесс горения завершается в точке **c.** Под действием давления газов поршень начинает перемещаться к **НМТ.** От точки **c** до точки **d** происходит расширение газов и совершается полезная работа. При движении от точки **d** к точке **a** происходит продувка цилиндра, т.е. выпуск отработавших газов и наполнение цилиндра воздухом. Далее цикл повторяется.

Как видно из рис. 5.3, при перемещении поршня давление газов, а следовательно, и сила нажатия на поршень изменяются в больших пределах. Площадь диаграммы, очерченной линией **abcda,** соответствует полезной работе газов за один цикл. Определить эту площадь сложно. Поэтому в расчетах используют ***среднее индикаторное давление*** p_i, т.е. постоянное давление, при котором совершается та же работа за цикл, что и действительная работа газов.

Его определяют исходя из заштрихованного прямоугольника, площадь которого равна площади фигуры **abcda,** а одна из сторон – ходу поршня или разнице объемов цилиндра в **НМТ** и **ВМТ.** Среднее индикаторное давление возрастает с увеличением давления в цилиндрах, зависящего от массы воздуха и соответствующего количества топлива в цилиндре. Исходя из среднего индикаторного давления в цилиндре, определяют силу тяги локомотива.

Работу $L_К$ (Дж), выполняемую тепловозом за один оборот колесной пары, можно выразить как произведение силы тяги $F_К$ (Н) на расстояние πD (м), проходимое локомотивом за один оборот колесной пары:

$$L_к = F_к \pi D. \quad (5.1)$$

Работа газа в **n** цилиндрах, совершаемая за один оборот коленчатого вала, выражается силой, действующей на каждый поршень – $p_i \pi D_ц^2 /4$**,** умноженной на ход поршня и число цилиндров. Тогда работа, отнесенная к коленчатому валу дизеля (Дж/об), имеет вид:

$$L_т = p_i \frac{\pi D^2_ц}{4} \frac{2l}{\tau} z \eta_м, \quad (5.2)$$

где p_i – среднее индикаторное давление в цилиндрах; $D_ц$ – диаметр цилиндра; l – ход поршня; τ – тактность дизеля (число ходов поршня за 1 цикл); z – число цилиндров дизеля; $\eta_м$ – КПД дизеля.

При передаче вращающего момента с вала дизеля на колесные пары часть мощности теряется в передаче. Это учитывает КПД передачи $\eta_п$. Кроме того, работа, совершаемая дизелем, частично расходуется на вращение вспомогательных механизмов тепловоза (масляных и водяных насосов, компрессоров, вентиляторов холодильника и др.). Учтем эту работу в виде КПД $\eta_{всп}$.

Отношение частот вращения коленчатого вала дизеля $n_д$ и движущих колес $n_к$ называют ***передаточным отношением*** β. Дизель за β оборотов коленчатого вала с учетом перечисленных потерь выполняет работу, равную работе силы тяги за один оборот колесной пары:

$$L_к = L_т \eta_{всп} \eta_п,$$

или

$$F_к \pi D = p_i \frac{\pi D^2_ц}{4} \frac{2l}{\tau} z \beta \eta_м \eta_{всп} \eta_п. \quad (5.3)$$

Откуда сила тяги тепловоза, развиваемая дизелем, —

$$F_к = \frac{p_i D^2_ц}{2D} \frac{l}{\tau} z \beta \eta_м \eta_{всп} \eta_п. \quad (5.4)$$

Иными словами, сила тяги тепловоза зависит от суммарного объема цилиндров, определяемого $D_ц$, l, z, среднего индикаторного давления p_i, тактности дизеля τ, передаточного отношения β, передачи и диаметров колесных пар D.

Для конкретного тепловоза размеры и число цилиндров, тактность дизеля, диаметры колесных пар постоянны. При неизменной частоте вращения вала дизеля и передаточном отношении передачи силу тяги можно регулировать, изменяя среднее индикаторное давление в цилиндрах, которое зависит от количества поданного в цилиндр воздуха и топлива. Для наиболее полного

сгорания топлива в цилиндре в него необходимо подать определенное количество воздуха.

Теоретически соотношение количества воздуха и топлива определяют, используя закономерности химической реакции горения топлива. Однако из-за неполного перемешивания топлива и воздуха в цилиндре количество воздуха должно быть больше теоретического. Отношение необходимого количества воздуха к теоретическому называют ***коэффициентом избытка воздуха,*** который равен 1,5...2. Отклонение от этого соотношения нецелесообразно.

Так увеличение подачи топлива при постоянном количестве воздуха, выходящее за пределы коэффициента избытка воздуха, приводит к неполному сгоранию топлива и не повышает среднее индикаторное давление в цилиндрах. Отсюда следует, что существует предельное значение среднего индикаторного давления в цилиндре, выше которого поднять его не удается, а значит, нельзя при данной скорости получить силу тяги выше определенного значения. Чтобы увеличить среднее индикаторное давление в цилиндрах, а следовательно, силу тяги и мощность дизеля, повышают массу подаваемого в цилиндры воздуха за счет наддува и соответственно массу впрыскиваемого дизельного топлива.

При наддуве массу поступающего в цилиндры воздуха увеличивают за счет предварительного его сжатия на 0,04...0,2 МПа (0,4...2 кгс/см^2). Поскольку при таком предварительном сжатии воздух нагревается, его перед подачей в цилиндры охлаждают. При этом плотность воздуха возрастает, его масса в том же объеме увеличивается. Благодаря наддуву и охлаждению воздуха перед поступлением в цилиндры мощность дизеля повышается на 50 % и выше.

Так, число цилиндров и их размеры дизеля 2Д100 тепловозов ТЭЗ и дизеля 10Д100 тепловоза 2ТЭ10М одинаковы, а мощности отличаются в 1,5 раза. В результате повышения давления наддува с 0,127 до 0,215 МПа (с 1,3 до 2,2 кгс/см^2) и охлаждения воздуха перед подачей в цилиндры дизель 10Д100 имеет мощность 2210 кВт вместо 1470 кВт у дизеля 2Д100.

Мощность дизеля регулируют изменением частоты вращения коленчатого вала, изменяя подачу топлива в цилиндры. Обычно тепловозы имеют 8...16 ступеней регулирования частоты вращения (положений рукоятки контроллера машиниста).

Режим, соответствующий полной мощности дизеля, называют ***номинальным.***

На массу поступающего в цилиндры дизеля воздуха влияют также температура и атмосферное давление. Повышение температуры воздуха на 1°С уменьшает мощность дизель-генераторной установки примерно на 2 кВт. Понижение атмосферного давления при подъеме на каждые 100 м приводит к снижению мощности дизель-генераторной установки примерно на 5 кВт.

В Правилах тяговых расчетов для поездной работы предусмотрены формулы и таблицы, с помощью которых определяют снижение силы тяги при отклонении атмосферных условий от нормальных (температура + 20° С и атмосферное давление 1013 гПа):

$$F_к = F_{ко}(1-к_t-к_р), \quad (5.5)$$

где $F_к$ – сила тяги в ньютонах при отклонении атмосферных условий от нормальных; $F_{ко}$ – сила тяги в ньютонах при нормальных атмосферных условиях; $к_t$, $к_р$ – коэффициенты, учитывающие снижение мощности дизеля соответственно при увеличении температуры наружного воздуха и уменьшении атмосферного давления, принимаемые по таблице 5.1.

Таблица 5.1

Серия тепловоза	Тип дизеля	Значение коэффициента $к_t$ при температуре окружающего воздуха, $С^О$					Значение коэффициента $к_р$ в зависимости от атмосферного давления, гПа (мм. рт. ст.)				
		20	25	30	35	40	906 (680)	933 (700)	960 (720)	986 (740)	1013 (760)
2ТЭ116	1А-5Д49, 2Д70	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,088	0,066	0,044	0,022	0
2ТЭ10М, 2ТЭ10Л, ТЭ10, ТЭП10, ТЭП60	10Д100, 11Д45, Д50	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,115	0,086	0,057	0,028	0
ТЭ3, ТЭ7	2Д100	0	0,023	0,045	0,068	0,09	0,105	0,078	0,051	0,025	0

Из таблицы 5.1 видно, что, например, для дизеля 10Д100 тепловоза 2ТЭ10М при температуре +30 °С и давлении 933 гПа коэффициенты $к_t$ = 0,05 и $к_р$ = 0,086. Следовательно, сила тяги равна:

$$F_к = F_{ко}(1-0,05-0,086),$$

т.е. она снизится почти на 14 %.

Во время работы дизеля в условиях высоких температур использование полной мощности дизеля определяется охлаждающей способностью холодильника, который должен поддерживать установленную температуру воды и масла. Частота вращения коленчатого вала дизеля не должна превышать номинальную, так как при ее увеличении нарушается нормальное сгорание топлива в цилиндрах, снижается КПД дизеля, повышается износ его деталей.

5.3. Сила тяги в зависимости от типа передачи

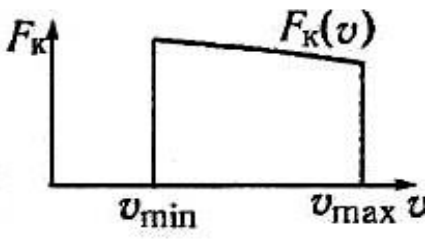


Рис. 5.4. Тяговая характеристика тепловоза при непосредственной передаче

Как видно из формулы (5.4), при неизменных диаметре колесных пар, КПД и постоянном среднем индикаторном давлении силу тяги конкретного дизеля можно регулировать, изменяя передаточное отношение □. Характер изменения □ в зависимости от скорости определяется типом передачи. Сила тяги и тяговая характеристика тепловоза также зависят от него.

Если предположить, что вал дизеля имеет ***непосредственную передачу*** к колесным парам и передаточное отношение □ остается постоянным, то изменять частоту вращения колесных пар можно только регулируя частоту вращения коленчатого вала дизеля $n_д$. Как уже отмечалось, ее можно менять в сравнительно небольших пределах (от минимальной до номинальной), и следовательно, скорость движения будет изменяться в узких пределах. Сила тяги, реализуемая колесными парами, как видно из формулы (5.4), изменяется также в небольших пределах. Поэтому тяговая характеристика будет соответствовать рис. 5.4.

Диапазон скоростей $v_{min}...v_{max}$ соответствует пределам изменения частоты вращения дизеля от минимальной до номинальной. Некоторое снижение силы тяги вызвано изменением КПД дизеля и КПД передачи. При скоростях ниже номинальной дизель не может устойчиво работать и развивать силу тяги. Такая тяговая характеристика для тепловозов, как уже указывалось, непригодна.

В случае использования ***механической передачи*** между коленчатым валом дизеля и колесными парами устанавливают коробку передач, обеспечивающую передачу вращающего момента через разные пары шестерен с различными числами зубьев. Переключая отдельные пары, получают разные передаточные отношения □ (обычно три – четыре ступени) и таким образом влияют на силу тяги тепловоза. В пределах каждой ступени сила тяги изменяется незначительно.

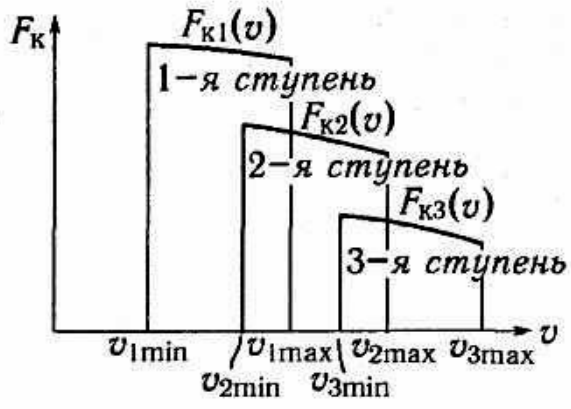


Рис. 5.5. Тяговая характеристика тепловоза при механической трехступенчатой передаче

Каждой ступени передачи соответствует своя тяговая характеристика (рис. 5.5) и диапазон скоростей. За счет

большого передаточного отношения при малых скоростях $v_{1min}...v_{1max}$ получена наибольшая сила тяги, выраженная кривой
$F_{к1}(v)$. После увеличения скорости переходят на передачу с меньшим передаточным отношением, при которой сила тяги при скоростях $v_{2min}...v_{2max}$ имеет меньшее значение – кривая $F_{к2}(v)$. Для работы при более высоких скоростях v3mm...v3max используют наименьшее передаточное отношение. Сила тяги при этом реализуется меньшая – кривая $F_{к3}(v)$.

Механическая передача, позволяющая развивать наибольшие силы тяги в зоне малых скоростей и в последующем их уменьшать с увеличением скорости, по сравнению с непосредственной передачей более полно удовлетворяет требованиям тяги поездов. Коробка передач имеет простую конструкцию и сравнительно малые потери при передаче вращающего момента. Все это и привело к использованию в некоторых случаях механической передачи при небольших мощностях дизелей — на мотовозах, автомотрисах и некоторых дизель-поездах.

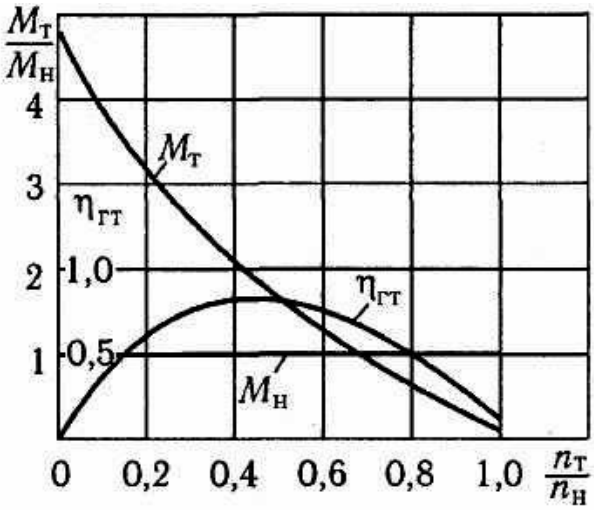


Рис. 5.6. Характеристики одноступенчатого гидротрансформатора

Для более гибкой связи коленчатого вала дизеля с колесными парами тепловоза иногда применяют ***гидравлическую передачу,*** включающую в себя гидротрансформаторы и гидромуфты.

Гидротрансформатор работает следующим образом. От дизеля вращение передается на центробежное насосное колесо, создающее в замкнутом объеме, наполненном рабочей жидкостью, динамический напор. Через направляющий аппарат он передается на турбинное колесо, связанное с колесными парами. Под напором рабочей жидкости, в качестве которой используют минеральное масло, турбинное колесо, а значит, и колесные пары приводятся во вращение.

Обычно насосное колесо гидротрансформатора соединяют с валом дизеля через повышающую зубчатую передачу. При более высоких частотах вращения гидравлическая передача конструктивно имеет меньшие габаритные размеры, чем при малых частотах вращения. При постоянных частоте вращения $n_п$ и вращающем моменте $M_н$ насосного колеса вращающий момент $M_т$ на турбинном колесе снижается после увеличения частоты его вращения $n_т$. Из характеристик одноступенчатого гидротрансформатора (рис. 5.6) видно, что с повышением частоты вращения турбинного колеса (при постоянной частоте вращения насосного колеса) вращающий момент $M_т$ уменьшается.

Отношение момента турбинного колеса $M_т$ к моменту насосного колеса $M_н$ при остановленном турбинном колесе ($n_т = 0$) называют ***коэффициентом трансформации момента.*** В частности, для случая, представленного на рис. 5.6, этот коэффициент равен 4,7. На эту величину вращающий момент на турбинном колесе превышает вращающий момент на насосном колесе. Практически коэффициент трансформации момента может быть в пределах 2...11.

Таким образом, ***гидравлическая передача*** обеспечивает при трогании с места тепловоза наибольшую силу тяги и уменьшение ее с возрастанием скорости, что важно для тяги поезда. Другими словами, гидротрансформатор работает с плавно изменяющимся передаточным отношением □.

При работе гидравлической передачи масло встречает сопротивление из-за ударов, трения, движения по искривленным каналам. Эти потери вызывают нагревание масла. Чтобы его температура не превышала 80...90°С, часть масла отводят в холодильник, который должен быть рассчитан на нормальную работу гидравлической передачи при номинальной мощности дизеля. КПД гидротрансформатора, как видно из рис. 5.6, изменяется в широких пределах. Однако наиболее экономичная работа дизеля охватывает сравнительно узкую зону при соотношении частот вращения $n_т/n_н$ 0,3...0,6 и не перекрывает всего диапазона скорости движения тепловоза. В период трогания и движения с повышенными скоростями гидротрансформатор имеет очень низкий КПД.

Гидромуфта имеет только насосное и турбинное колеса. Из-за отсутствия направляющего аппарата вращающий момент на насосном колесе равен моменту на турбинном. Характеристики гидромуфты, показывающие зависимость относительной частоты вращения насосного колеса $n_н/n_{н\ ном}$ и КПД гидромуфты $□_{гм}$ от относительной частоты вращения турбинного колеса $n_т/n_{н\ ном}$ при постоянном номинальном вращающем моменте М ($M/M_{ном} = 1$), приведены на рис. 5.7.

Частота вращения турбинного колеса $n_т$ меньше частоты вращения насосного колеса $n_н$. Отношение разности частот вращения $n_н □ n_т$, к частоте вращения насосного колеса $n_н$ называют ***скольжением гидромуфты:*** $s □ (n_н □ n_т)/n_н$.

Скольжение при малых частотах вращения велико. С увеличением частоты вращения оно уменьшается и

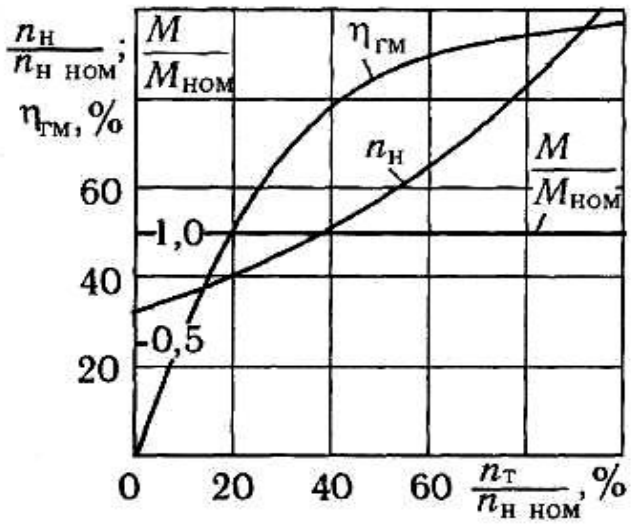


Рис. 5.7. Характеристики гидромуфты

при номинальной частоте $n_{н\ ном}$ составляет 0,03...0,04. КПД гидромуфты, как видно из рис. 5.7, возрастает с увеличением частоты вращения $n_т$ и при наибольшей частоте вращения составляет 0,96...0,97. Характеристики гидротрансформаторов и гидромуфт не полностью отвечают требованиям, предъявляемым к тяговым характеристикам тепловоза. Гидротрансформатор позволяет увеличить силу тяги при трогании и малых скоростях движения, но при высоких скоростях он работает при малом КПД. Гидромуфта, наоборот, обеспечивает экономичную работу в зоне высоких скоростей, но не может изменить силу тяги. Поэтому в гидравлических передачах используют в различных комбинациях несколько гидротрансформаторов с различными параметрами и гидромуфт, включая их в работу поочередно. Напомним, что гидравлические передачи установлены на некоторых сериях маневровых тепловозов (ТГМ3, ТГМ4, ТГМ4А, ТГМ6А и др.).

Наибольшее распространение на магистральных тепловозах получила **электрическая передача,** при которой дизель передает вращение на главный генератор, преобразующий механическую энергию в электрическую. От него получают энергию тяговые электрические двигатели, валы которых связаны через зубчатую передачу со сцепными колесными парами тепловоза. Тяговые электродвигатели преобразовывают электрическую энергию в механическую.

Мощность главного генератора $N_г$ меньше эффективной мощности дизеля N_e вследствие расхода мощности на привод вспомогательных устройств тепловоза (компрессора, вентиляторов и т.д.). На это в среднем затрачивается 8...12 % мощности и потерь в генераторе:

$$N_г = N_e \eta_{всп} \eta_г,$$

где $\eta_{всп}$ – условный КПД, учитывающий затрату энергии на работу вспомогательных устройств; $\eta_г$ – КПД генератора.

Мощность, отнесенную к колесным парам тепловоза, $N_к$ можно выразить через мощность генератора $N_г$ с учетом потерь в тяговых электродвигателях и в редукторе при передаче вращающего момента с зала двигателя на колесные пары:

$$N_к = N_г \eta_д \eta_п,$$

где $\eta_д$ – КПД тягового двигателя; $\eta_п$ – КПД редуктора.

Так как $N_г = U_г I_г$, то мощность равна:

$$N_к = U_г I_г \eta_д \eta_п. \quad (5.6)$$

Механическая мощность, затрачиваемая на движение поезда, пропорциональна произведению силы тяги на скорость:

$$N_к = F_к v/3{,}6. \quad (5.7)$$

где v – скорость движения; $F_к$ – сила тяги тепловоза.

Из равенства левых частей выражений (5.6) и (5.7) получают силу тяги:

$$F_к = \frac{3{,}6\, U_г I_г \eta_д \eta_п}{v} \quad (5.8)$$

Как видно из формулы (5.8), сила тяги при электрической передаче определяется напряжением и током главного генератора, скоростью движения, КПД электродвигателей и передачи. При неизменной мощности генератора ($U_г I_г$) с возрастанием скорости сила тяги должна снижаться. Для того чтобы выяснить, как получить такую зависимость, необходимо рассмотреть характеристики главного генератора и тяговых электродвигателей.

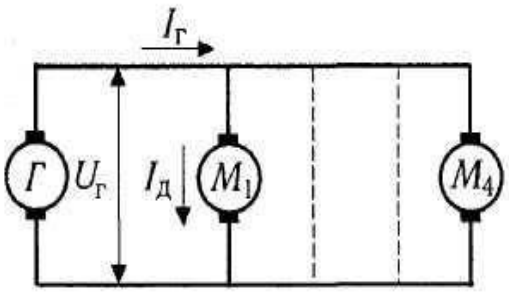


Рис. 5.8. Схема параллельного подсоединения тяговых электродвигателей М1...М4 к главному генератору Г

5.4. Внешние характеристики главных генераторов

Из анализа характеристик тяговых электродвигателей постоянного тока, следует, что при неизменном подведенном напряжении $U_д$ с увеличением силы тяги возрастает потребляемый ток $I_д$ (это видно из выражения $F_{кд} = 3{,}6СФ\, I_д - \Delta F$), а следовательно, и потребляемая мощность, равная $U_д I_д$. Если главный генератор при различных силах тяги будет поддерживать неизменное напряжение, то с возрастанием силы тяги от дизеля потребуется большая мощность. Для того чтобы он в широком диапазоне изменения силы тяги работал с одинаковой мощностью, нужно с увеличением тока электродвигателя снижать в той же степени напряжение UA. Например, при увеличении тока в два раза напряжение на электродвигателе должно уменьшаться также в два раза.

Если при электрической передаче постоянного тока тяговые электродвигатели соединены параллельно под напряжение главного генератора $U_г$ (рис. 5.8), то напряжения на них равны, а ток главного генератора $I_г$ равен сумме токов тяговых электродвигателей $I_д$ или

$$I_г = a\, I_д,$$

где а – число параллельно соединенных тяговых электродвигателей.

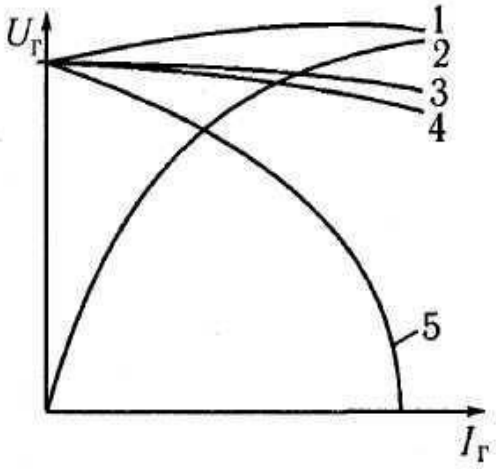


Рис. 5.9. Внешние характеристики генераторов при различных системах возбуждения

Поскольку напряжение на электродвигателях определяется тяговым генератором, необходимо, чтобы с увеличением тока $I_г$ соответственно уменьшалось напряжение $U_г$. Зависимость напряжения от тока нагрузки называют ***внешней характеристикой генератора.***

На рис. 5.9 приведены внешние характеристики генераторов при независимом (**3**), параллельном (**4**), последовательном (**2**) возбуждении, а также при смешанном возбуждении с согласным (**1**) или встречным (**5**) включением обмоток параллельного и последовательного возбуждения. Характеристики **1 – 4** приводят к увеличению мощности генератора N и росту тока $I_г$, а характеристика **5,** хотя и дает снижение напряжения с увеличением тока, однако закон изменения не соответствует постоянству мощности. Такое постоянство мощности будет при гиперболической внешней характеристике генератора (отрезок **bc** на рис. 5.10), когда $U_г I_г$ = const. Гиперболическую внешнюю характеристику главного генератора получают за счет автоматического регулирования возбуждения. С изменением напряжения на тяговом электродвигателе почти пропорционально изменится скорость движения локомотива. При увеличении силы тяги потребляемые токи $I_д$, а следовательно, и $I_г$ будут возрастать. Благодаря гиперболической внешней характеристике генератора напряжение на нем и на электродвигателях будет уменьшаться, вследствие чего и скорость движения тепловоза будет снижаться. При снижении нагрузки напряжение $U_г$ будет возрастать и вызывать увеличение скорости движения.

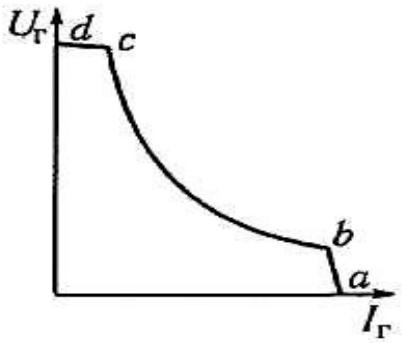


Рис. 5.10. Внешняя характеристика главного генератора при постоянной потребляемой мощности

Таким образом, внешняя характеристика **bc** обеспечивает изменение сил тяги и скорости движения в широких пределах при неизменной мощности дизеля.

На тепловозах используют несколько внешних характеристик генератора, каждая из которых соответствует определенной мощности дизеля.

В период трогания и разгона тепловоз развивает наибольшую силу тяги, тяговые электродвигатели работают с наибольшими токами. При трогании (точка **a**) ЭДС электродвигателя равна нулю. Подведенное от главного генератора напряжение должно быть небольшим, так как оно уравновешивается только падением напряжения в обмотках электродвигателей и в соединительных кабелях.

При разгоне тепловоза, когда якоря тяговых электродвигателей начинают вращаться, в их обмотках наводится ЭДС. Напряжение на главном генераторе должно быть больше, чтобы уравновешивать не только падение напряжения, но и ЭДС электродвигателей. Разгон с неизменным током вызовет неизменный магнитный поток, и ЭДС двигателей будет пропорциональна скорости движения ($E = C\Phi_v$). Примерно также должно изменяться и напряжение генератора $U_г$.

В результате главный генератор работает с возрастающей мощностью ($N_г = U_г I_г$) вплоть до номинальной, которую он получает от дизеля. В этом случае машинист перемещает рукоятку контроллера до последнего положения, увеличивая подачу топлива в цилиндры и повышая частоту вращения вала дизеля и генератора. Номинальная мощность дизеля достигается в точке **b.** Таким образом, на отрезке **ab** развивается наибольшая сила тяги тепловоза, ограниченная наибольшим допустимым током или сцеплением колес с рельсами.

Дальнейшее увеличение напряжения на генераторе при неизменном токе $I_г$ привело бы к перегрузке дизеля. Поэтому после точки **b** напряжение генератора должно возрастать только при снижении тока $I_г$ или токов $I_д$. Чтобы дизель развивал номинальную мощность от точки **b** до зоны максимальной скорости, частота вращения электродвигателей и скорость движения должны возрасти в 4...5 раз. Примерно во столько же раз должно увеличиваться и напряжение на главном генераторе.

Однако регулированием магнитного потока из-за насыщения магнитной системы напряжение $U_г$ можно изменить только не более, чем в 2,5 раза. При этом размеры и масса главного генератора становятся завышенными и неприемлемыми для тепловоза. Из-за ограниченных габаритов тепловоза регулирование напряжения генератора можно использовать только в пределах 1,5 и менее. Чтобы обеспечить гиперболическую внешнюю характеристику главного генератора во всем диапазоне скоростей от точки **b** до точки **c,** воздействуют на тяговые электродвигатели, применяя ослабление

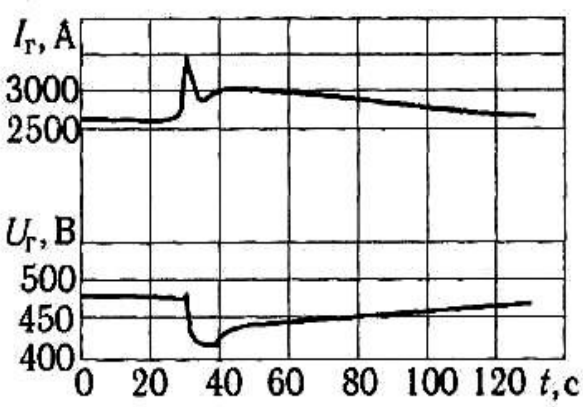


Рис. 5.11. Изменение тока и напряжения генератора при включении ослабления возбуждения тягового электродвигателя

их возбуждения или разные схемы их подсоединения к генератору. Так, при достижении наибольшего напряжения (в точке **с** на рис. 5.10) скорость еще не доходит до половины максимальной.

Для того чтобы была снова использована гиперболическая часть **bc** внешней характеристики генератора, необходимо при приближении к точке с увеличить ток $I_г$. Это достигается использованием ступени ослабления возбуждения тяговых электродвигателей, при которой изменяются токи и магнитные потоки. В первый момент, когда обмотка возбуждения тягового электродвигателя шунтируется резистором, ток якоря возрастает за счет уменьшения сопротивления цепи двигателя, а ток возбуждения и магнитный поток изменяются незначительно.

На рис. 5.11 приведена осциллограмма тока и напряжения генератора тепловоза 2ТЭ10М. В верхней части показано увеличение тока генератора $I_г$ с 2600 до 3400 А, вызванное повышением токов якорей тяговых электродвигателей. Увеличение тока /г приводит к снижению напряжения на генераторе с 480 до 420 В (показано в нижней части рис. 5.11). В свою очередь это вызывает уменьшение тока тяговых электродвигателей и генератора с 3400 до 2850 А. Снижение тока приводит к уменьшению магнитного потока тяговых электродвигателей, а следовательно, и их ЭДС, что в свою очередь приводит к некоторому увеличению тока с 2850 до 3000 А.

Перечисленные процессы протекают в течение нескольких секунд. В результате ослабления возбуждения тяговые электродвигатели и генератор работают с большими токами и меньшими магнитными потоками. Степень ослабления возбуждения подобрана таким образом, чтобы сила тяги тепловоза до и после ослабления возбуждения была примерно одинаковой. При большем токе $I_г$ генератор снова будет работать на характеристике **bc** (см. рис. 5.10).

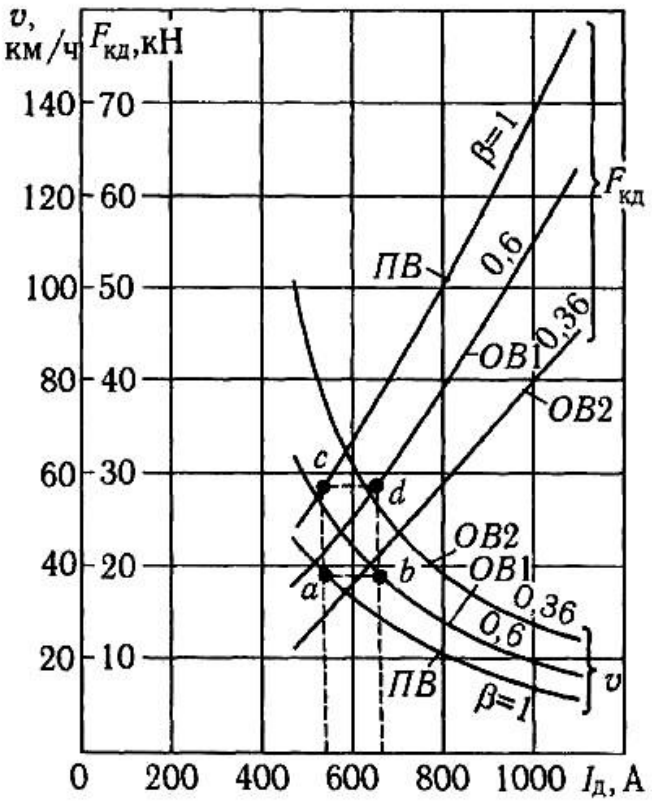


Рис. 5.12. Электромеханические характеристики тягового электродвигателя ЭД-118А

В случае дальнейшего увеличения скорости движения токи тяговых электродвигателей и генератора уменьшаются ($I_г$ снижается с 3000 до 2600 А), а напряжение генератора $U_г$ возрастает. Если напряжение снова повысится и приблизится к точке с, включится вторая ступень ослабления возбуждения, вызывающая новое увеличение токов $I_д$ и $I_г$, и новое

возвращение на гиперболическую часть внешней характеристики.

Обычно двух ступеней ослабления возбуждения достаточно для использования гиперболической части характеристики до максимальной скорости движения. В том случае, когда при подходе к точке **c** ток $I_г$ не будет увеличен, с возрастанием скорости движения и снижении токов $I_д$ и $I_г$ работа будет проходить по отрезку **cd.** При этом резко снижается мощность.

Чтобы разобраться с процессами в тяговом электродвигателе при включении ступени ослабления возбуждения, на рис. 5.12 приведены электромеханические характеристики электродвигателя
последовательного возбуждения ЭД-118А при изменении напряжения по гиперболической внешней характеристике генератора для полного и двух ступеней ослабления возбуждения. Скоростные характеристики $v(I_д)$ в зоне больших токов проходят ниже, чем при работе с неизменным напряжением. Электротяговые $F_{кд}(I_д)$ характеристики при любых напряжениях остаются без изменения, так как сила тяги от напряжения практически не зависит, а определяется током и магнитным потоком ($F_{кд} = 3{,}6СФ\ I_д – ΔF$).

Из этих зависимостей видно, что, например, при переходе со скоростной характеристики полного возбуждения на характеристику **OB1** при скорости 38 км/ч (из точки **a** в точку **b**) ток изменяется с 540 до 660 А, а сила тяги $F_{кд}$ остается практически одинаковой (точки **c** и **d**). Неизменная сила тяги сохраняется и при переходах на ступень ослабления возбуждения **OB2,** и при обратных переходах.

Ток генератора $I_г$ при подходе к точке **c** (см. рис. 5.10) можно также увеличить, переведя тяговые электродвигатели с последовательного на последовательно-параллельное соединение, т.е. вследствие увеличения числа параллельных ветвей электродвигателей (тепловозы ТЭ2, ТЭ1).

По две ступени ослабления возбуждения без переключения тяговых электродвигателей применяют на тепловозах 2ТЭ116, 2ТЭ10М, 2ТЭ10В, 2ТЭ10Л, ТЭ10, ТЭ3, ТЭП70, ТЭП60, ТЭП10.

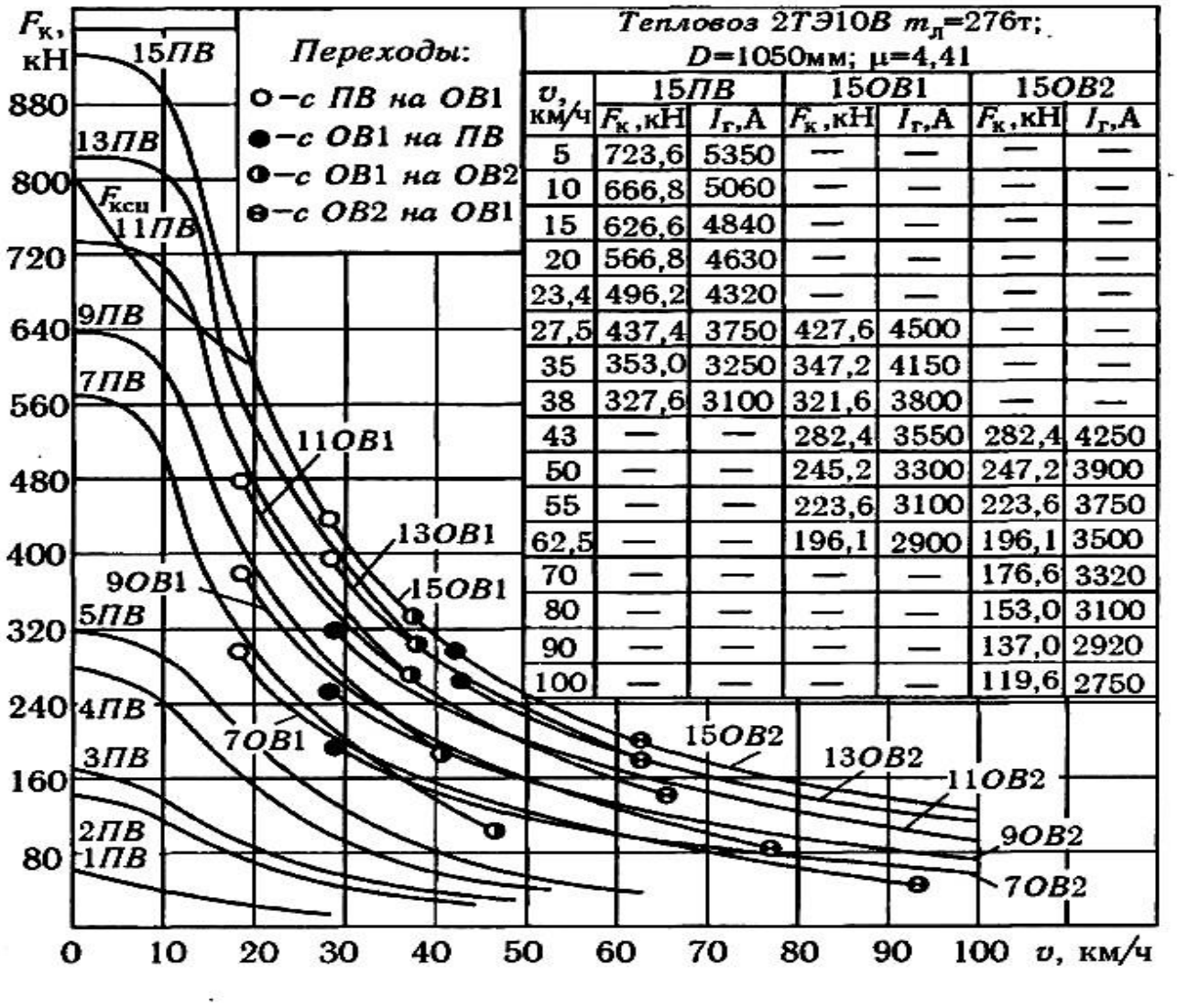
Наибольшая сила тяги, развиваемая тепловозом с электрической передачей, может ограничиваться нагреванием электрических машин – главного генератора или тяговых электродвигателей.

5.5. Тяговые характеристики и их ограничения

Чтобы определить силу тяги тепловоза (или дизель-поезда) при различных скоростях движения, используют тяговые характеристики $F_к(v)$. На рис. 5.13 показаны соответствующие зависимости для тепловозов 2ТЭ10В и 2ТЭ10М с электрической передачей на ряде промежуточных (частичных) положений рукоятки контроллера машиниста; и на последнем 15-м положении. Каждому

положению рукоятки соответствует определенная частота вращения коленчатого вала дизеля:
от 400 об/мин на 1-м до 850 об/мин на 15-м положении, когда дизель работает с номинальной мощностью 2210 кВт. Эта мощность поддерживается постоянной в зоне скоростей после разгона до максимальной. В период разгона сила тяги ограничивается сцеплением колес с рельсами. Силу тяги по сцеплению определяют по формулам (1.12), (1.13) или (1.15) при массе локомотива 276 т (по 23 т, приходящихся на каждую колесную пару).

Для поддержания постоянной мощности в зоне рабочих скоростей и неоднократного использования гиперболической части внешней характеристики главного генератора тяговые электродвигатели работают в зоне малых скоростей при полном возбуждении, в зоне более высоких скоростей с использованием ослабленного возбуждения **ОВ1,** а затем **ОВ2.** Переход на **ОВ1** происходит при скорости 38 км/ч, на **ОВ2** — при 62,5 км/ч. Обратные переходы с **ОВ2** на **ОВ1** и с **ОВ1** на **ПВ** после снижения скорости движения реле выполняют при скоростях на 10...20 км/ч ниже, чем при прямых переходах. Это расхождение скоростей необходимо для устранения частых повторных включений и отключений контакторов ослабления возбуждения при движении в зоне скоростей переходов.



Тепловоз 2ТЭ10В $m_л$=276т; D=1050мм; μ=4,41

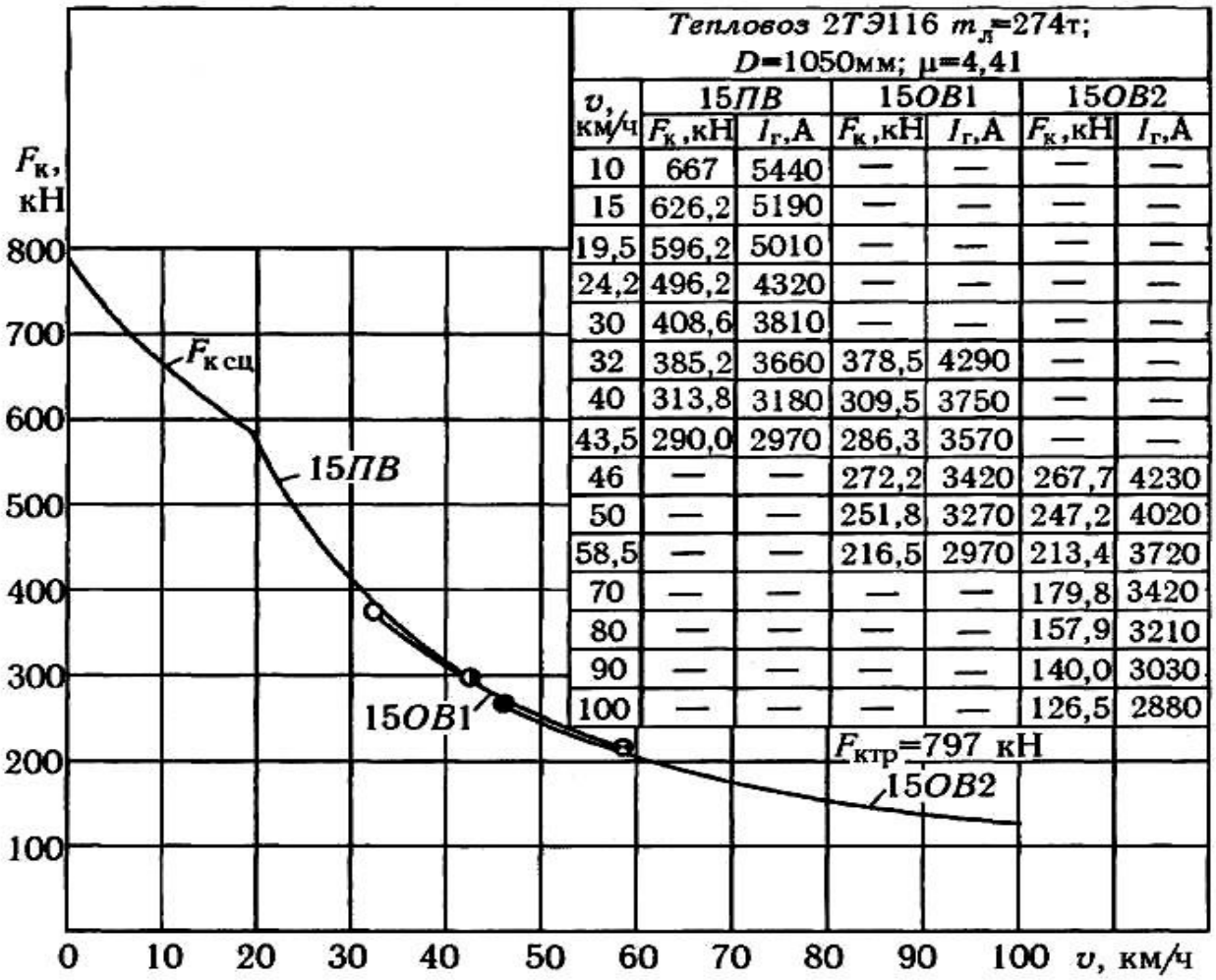
v, км/ч	15ПВ		15ОВ1		15ОВ2	
	$F_к$, кН	$I_г$, А	$F_к$, кН	$I_г$, А	$F_к$, кН	$I_г$, А
5	723,6	5350	—	—	—	—
10	666,8	5060	—	—	—	—
15	626,6	4840	—	—	—	—
20	566,8	4630	—	—	—	—
23,4	496,2	4320	—	—	—	—
27,5	437,4	3750	427,6	4500	—	—
35	353,0	3250	347,2	4150	—	—
38	327,6	3100	321,6	3800	—	—
43	—	—	282,4	3550	282,4	4250
50	—	—	245,2	3300	247,2	3900
55	—	—	223,6	3100	223,6	3750
62,5	—	—	196,1	2900	196,1	3500
70	—	—	—	—	176,6	3320
80	—	—	—	—	153,0	3100
90	—	—	—	—	137,0	2920
100	—	—	—	—	119,6	2750

Рис. 5.13. Тяговые характеристики тепловозов 2ТЭ10В и 2ТЭ10М

На тепловозе 2ТЭ10М скорости обратных переходов таковы: с ОВ2 на 0В1 — при v = 43 км/ч, с **ОВ1** на **ПВ** – при v = 27,5 км/ч. Скорости при включении и отключении ступеней ослабления возбуждения на разных положениях рукоятки контроллера помечены на графиках условными значками. Тяговые характеристики дополнены таблицами с указанием скоростей, сил тяги и токов главного генератора на номинальной характеристике (15-е положение рукоятки).

В зоне скоростей между прямыми и обратными переходами на ступени ослабления возбуждения силы тяги могут несколько отличаться (например, на 13-м положении рукоятки). При расчетах в данном случае можно пользоваться тяговыми характеристиками с учетом направления изменения скорости или для упрощения брать средние значения силы тяги при движении с увеличением и уменьшением скорости движения (т. е. при **ПВ** и **ОВI, ОВ1** и **ОВ2**). При движении на промежуточных характеристиках дизель и тепловоз работают с меньшей мощностью. Каждому положению рукоятки контроллера машиниста

соответствует определенная частота вращения вала дизеля, задаваемая специальными механизмами, воздействующими на регулятор частоты вращения.



Тепловоз 2ТЭ116 $m_л$=274т; D=1050мм; μ=4,41

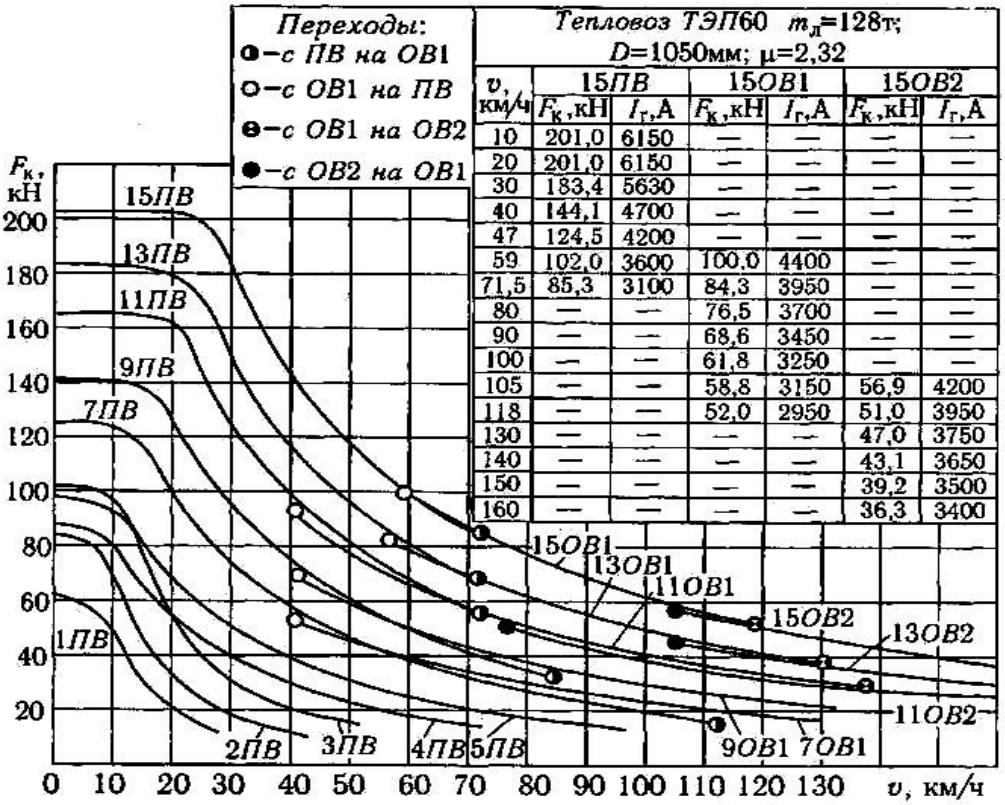
v, км/ч	15ПВ		15ОВ1		15ОВ2	
	$F_к$,кН	$I_г$,А	$F_к$,кН	$I_г$,А	$F_к$,кН	$I_г$,А
10	667	5440	—	—	—	—
15	626,2	5190	—	—	—	—
19,5	596,2	5010	—	—	—	—
24,2	496,2	4320	—	—	—	—
30	408,6	3810	—	—	—	—
32	385,2	3660	378,5	4290	—	—
40	313,8	3180	309,5	3750	—	—
43,5	290,0	2970	286,3	3570	—	—
46	—	—	272,2	3420	267,7	4230
50	—	—	251,8	3270	247,2	4020
58,5	—	—	216,5	2970	213,4	3720
70	—	—	—	—	179,8	3420
80	—	—	—	—	157,9	3210
90	—	—	—	—	140,0	3030
100	—	—	—	—	126,5	2880

Рис. 5.14. Тяговые характеристики тепловоза 2ТЭ116

Тяговая характеристика тепловоза 2ТЭ116 на 15-м положении рукоятки контроллера машиниста приведена на рис. 5.14. Как видно, она незначительно отличается от характеристики тепловоза 2ТЭ10М. Скорость при переходе на ступень ослабления возбуждения **ОВ1** тяговых электродвигателей здесь составляет 43,5 км/ч, на ступень **ОВ2** – 58, 5 км/ч. Обратные переходы происходят с **ОВ2** на **ОВ1** при скорости 46 км/ч, с **ОВ1** на **ПВ** — при скорости 32 км/ч. (Условные значки переходов аналогичны рис. 5.13).

На рис. 5.15 и 5.16 представлены тяговые характеристики пассажирских тепловозов ТЭП60 и ТЭП70. Эти локомотивы имеют меньшие силы тяги и большие скорости движения.

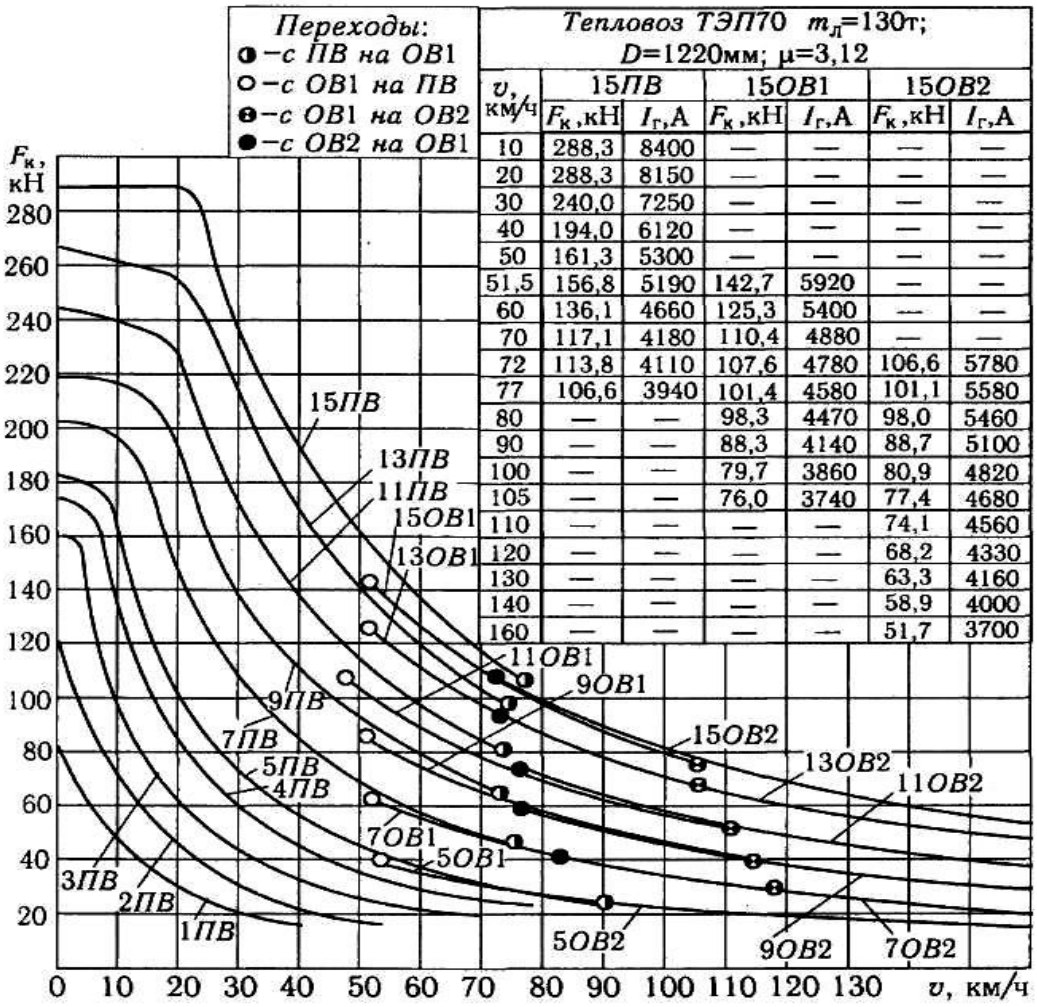
На основании тяговых характеристик строят удельные тяговые характеристики в порядке, изложенном в разделе 2.6, построение которых рассмотрим на примере.



Тепловоз ТЭП60 $m_д$=128т; D=1050мм; μ=2,32

v, км/ч	15ПВ		15ОВ1		15ОВ2	
	$F_к$, кН	$I_г$, А	$F_к$, кН	$I_г$, А	$F_к$, кН	$I_г$, А
10	201,0	6150	—	—	—	—
20	201,0	6150	—	—	—	—
30	183,4	5630	—	—	—	—
40	144,1	4700	—	—	—	—
47	124,5	4200	—	—	—	—
59	102,0	3600	100,0	4400	—	—
71,5	85,3	3100	84,3	3950	—	—
80	—	—	76,5	3700	—	—
90	—	—	68,6	3450	—	—
100	—	—	61,8	3250	—	—
105	—	—	58,8	3150	56,9	4200
118	—	—	52,0	2950	51,0	3950
130	—	—	—	—	47,0	3750
140	—	—	—	—	43,1	3650
150	—	—	—	—	39,2	3500
160	—	—	—	—	36,3	3400

Рис. 5.15. Тяговые характеристики тепловоза ТЭП60



Тепловоз ТЭП70 $m_л$=130т; D=1220мм; μ=3,12

v, км/ч	15ПВ		15ОВ1		15ОВ2	
	$F_к$, кН	$I_г$, А	$F_к$, кН	$I_г$, А	$F_к$, кН	$I_г$, А
10	288,3	8400	—	—	—	—
20	288,3	8150	—	—	—	—
30	240,0	7250	—	—	—	—
40	194,0	6120	—	—	—	—
50	161,3	5300	—	—	—	—
51,5	156,8	5190	142,7	5920	—	—
60	136,1	4660	125,3	5400	—	—
70	117,1	4180	110,4	4880	—	—
72	113,8	4110	107,6	4780	106,6	5780
77	106,6	3940	101,4	4580	101,1	5580
80	—	—	98,3	4470	98,0	5460
90	—	—	88,3	4140	88,7	5100
100	—	—	79,7	3860	80,9	4820
105	—	—	76,0	3740	77,4	4680
110	—	—	—	—	74,1	4560
120	—	—	—	—	68,2	4330
130	—	—	—	—	63,3	4160
140	—	—	—	—	58,9	4000
160	—	—	—	—	51,7	3700

Рис. 5.16. Тяговые характеристики тепловоза ТЭП70

Пример. Рассчитать и построить удельные тяговые характеристики тепловоза 2ТЭ116 массой 276 т при работе с составом массой 5000 т (при скорости от 0 до 100 км/ч).

Решение. 1. Силу тяги тепловоза находим из тяговых характеристик и заносим в таблицу 5.2. В зоне скоростей между прямыми и обратными переходами на различные ступени возбуждения силу тяги будем определять как средние значения. Так при v = 32 км/ч, $F_{к\,пв}$ = 385,2 кН; $F_{к\,сц}$ = 378,5 кН. Следовательно $F_к$ = =(385,2 + 378,5)/2 = 381,9 кН.

2. Зная массу поезда m = 5276 т, определяем удельные силы тяги по формуле (1.2):

$$f_к = \frac{F_к}{mg} = \frac{797000}{5276 \cdot 9.81} = 15{,}4$$

Н/кН. при v = 0 км/ч $F_к$ = 797,0 кН; тогда $f_к$ =

Результаты расчетов сведены в таблицу 5.2 и приведены на рисунке 5.17.

Таблица 5.2

v, км/ч	$F_к$, кН	$f_к$, Н/кН	v, км/ч	$F_к$, кН	$f_к$, Н/кН

0	797,0	15,40	46	270,0	5,22
10	667,0	12,89	50	249,8	4,83
19,5	596,2	11,52	58,5	215,0	4,15,
24,2	496,2	9,59	70	179,8	3,47
32	381,9	7,38	80	157,9	3,05
40	311,7	6,02	90	140,0	2,71
43,5	288,2	5,57	100	126,5	2,44

Тепловозы 2ТЭ116, ТЭ109, ТЭП75, ТЭП70 оборудованы электрической передачей переменно-постоянного тока. Здесь с дизелем соединен ротор синхронного главного генератора, преобразующего механическую энергию дизеля в электрическую энергию переменного шестифазного тока, имеющего частоту до 100 Гц. Переменный ток преобразовывают с помощью полупроводниковых выпрямителей в постоянный. Цепь возбуждения главного генератора получает питание от однофазного синхронного возбудителя через управляемый тиристорный мост, выпрямляющий переменный ток и изменяющий выпрямленный ток возбуждения регулированием угла открытия тиристоров. Система автоматического регулирования тока возбуждения главного генератора позволяет получить необходимую гиперболическую внешнюю характеристику с ограничением тока при разгоне и ограничением напряжения при высоких скоростях движения.

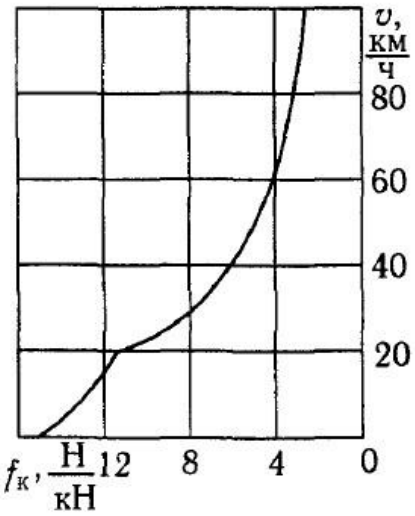


Рис. 5.17. Удельные тяговые характеристики тепловоза 2ТЭ116 с составом массой 5000 т

Использование синхронных главного генератора и возбудителя позволяет снизить габаритные размеры и массу машин, достичь большую надежность в работе. Применение тиристорных регуляторов способствует также повышению точности и устойчивости системы регулирования.

Тема 6
СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПОЕЗДА
6.1. Силы основного сопротивления движению поезда

Общие сведения. К силам сопротивления движению поезда относят внешние неуправляемые силы, направленные, как правило, против движения поезда. Как и силы тяги, они приводятся к точкам касания колес с рельсами. Силы сопротивления движению делят на ***основные,*** действующие при движении поезда всегда, и ***дополнительные,*** возникающие только при движении по отдельным

участкам пути или в отдельные периоды времени. Сумму сил основного и дополнительного сопротивлений называют ***общим сопротивлением движению поезда*** $W_к$.

Силы сопротивления движению поезда складываются из сил сопротивления движению локомотива W□ и состава W□□. В свою очередь силы сопротивления движению состава являются суммой сил сопротивления движению вагонов.

В расчетах используют удельные силы сопротивления движению, т.е. силы, выраженные в ньютонах, отнесенные к 1 кН веса поезда.

Силы основного сопротивления движению W_o, действующие при движении по прямолинейному горизонтальному пути, обусловлены в основном трением в подшипниках подвижного состава, взаимодействием колесных пар с рельсами и сопротивлением воздушной среды при отсутствии ветра.

Сила трения в подшипниках подвижного состава.

На рис. 6.1 показан подшипник трения скольжения. Под воздействием нагрузки на шейку оси ПС q_{o1} и вращении колесной пары по часовой стрелке возникает сила трения, равная произведению силы q_{o1} на коэффициент трения □. Очевидно, сила q_{o1}□, умноженная на радиус шейки оси d/2, дает момент сопротивления вращению: M_1 □ q_{o1}□□d2.

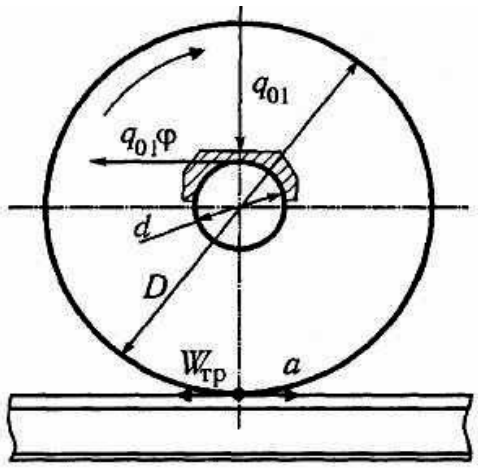


Рис. 6.1. Образование силы сопротивления движению от трения в буксовых подшипниках

Заменим этот момент сопротивления равным ему моментом $\mathbf{M_2}$ с приложением силы **a** в точке касания колеса и рельса:

$$M_2 □ a □D2.$$

Момент M_2 действует также против направления вращения колеса. Сила a, являющаяся внутренней относительно поезда, вызывает равную ей внешнюю (относительно поезда) горизонтальную реакцию рельса $W_{тр}$, действующую против движения поезда, — силу сопротивления движению поезда, вызванную трением в подшипнике, которая препятствует движению. Из равенства сил $W_{тр}$ и **a** и моментов M_1 и M_2 получим:

$$W_{тр} □ a □ q_{o1}□d/D.$$

Как видно из этой формулы, на силу сопротивления движению влияют нагрузка на шейку оси, коэффициент трения и отношение диаметра шейки оси к диаметру колеса.

Силу сопротивления движению поезда от трения в буксовых подшипниках можно определить суммированием сил $\mathbf{W_{тр}}$ всего поезда. Если пренебречь

разницей между нагрузкой от колес на рельсы и нагрузкой на шейку оси (определяемую весом колесной пары), то удельная сила сопротивления движению: $w_{тр}$ □1000 □□d/D.

Поскольку отношение d/D колеблется для вагонных колесных пар в небольших пределах, удельная сила сопротивления движению от трения в буксовых подшипниках зависит от коэффициента трения □**.** Он изменяется в зависимости от вязкости смазки, ее физико-химических свойств, силы нажатия на единицу площади подшипника, частоты вращения шейки и температуры наружного воздуха. С понижением температуры возрастает вязкость смазки и увеличивается коэффициент трения.

На рис. 6.2 приведены зависимости коэффициентов трения □ буксовых подшипников от скорости движения **v,** из которых видно, что роликовые подшипники имеют значительно меньшие значения □ по сравнению с подшипниками скольжения. Большой разброс точек объясняется разными нагрузками на колесные пары и отклонениями в вязкости смазки. Зона больших коэффициентов трения соответствует малым нагрузкам на ось и большей вязкости смазки. С увеличением этой нагрузки и уменьшением вязкости смазки коэффициент □ снижается.

При трогании с места □ имеет большую величину из-за выжимания смазки с контактной поверхности подшипника и отсутствия масляной пленки. Это особенно заметно у подшипников скольжения. По мере вращения оси в зоне контакта появляется смазка, и коэффициент трения снижается. В дальнейшем при наличии смазки и увеличения скорости движения коэффициент трения возрастает.

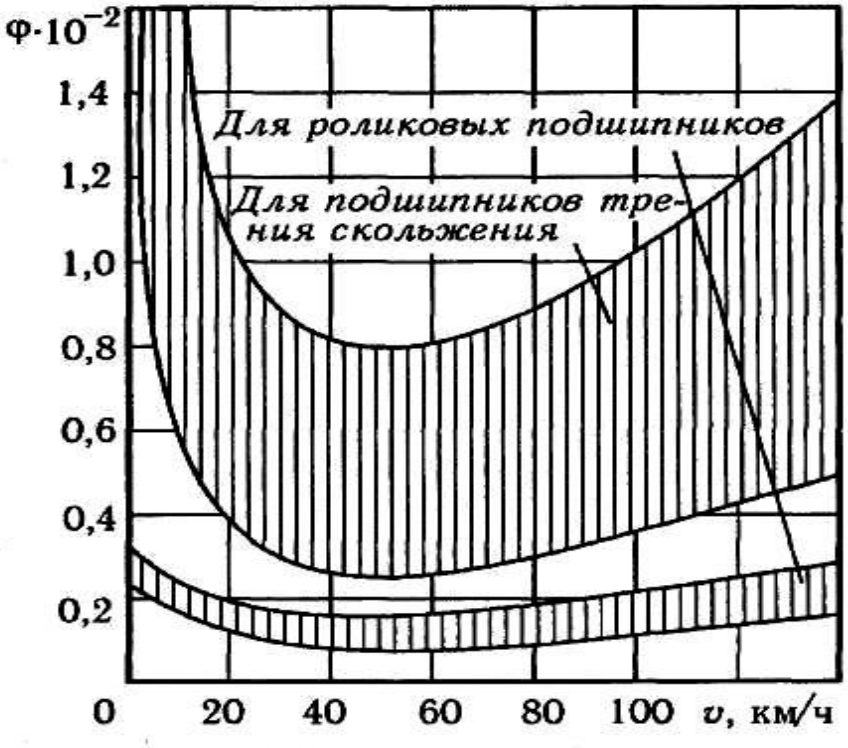


Рис. 6.2. Зависимость коэффициента трения буксовых подшипников от скорости движения

Можно считать, что удельное сопротивление движению за счет трения в подшипниках скольжения составляет в среднем 0,5...1 Н/кН, а при роликовых подшипниках – 0,1...0,2 Н/кН. Поэтому на отечественных дорогах занимались переводом буксовых подшипников скольжения на роликовые. В настоящее время подавляющее большинство подвижного состава работает на роликовых подшипниках. Кроме уменьшения сопротивления движению роликовые подшипники позволили упростить уход за ними в эксплуатации и уменьшить расход смазки.

В случае движения локомотивов на выбеге или при механическом торможении (на холостом ходу без тока) в силы сопротивления движению от трения $W_{трх}$ входят также силы трения в элементах передачи, моторно-осевых подшипниках (опорно-осевое подвешивание) или подшипниках редуктора (опорно-рамное подвешивание). При работе в режиме тяги или электрического торможения силы трения в моторно-якорных подшипниках учитывают во вращающем моменте, а силы трения в зубчатой передаче и моторно-осевых или редукторных подшипниках — при пересчете момента на валу тягового электродвигателя (или момента дизеля) в касательную силу тяги. Поэтому в силы сопротивления движению локомотива

$W_{тр}$ в режиме тяги или электрического торможения их не включают. Таким образом получается, что $W_{тр\,х} > W_{тр}$.

Сила трения качения колес по рельсам. Эта сила возникает вследствие деформации опорных поверхностей колес, рельсов и просадки пути. На рис. 6.3, а показано колесо в состоянии покоя. Под действием его нагрузки на рельс q_o деформируются и колесо, и рельс. В результате они соприкасаются по площадке, имеющей форму эллипса с длинной осью, равной **АВ.** На силу q_o со стороны рельса по всей площадке возникают симметричные относительно вертикальной оси силы реакции. Равнодействующая этих сил R направлена вертикально и уравновешивает силу q_o.

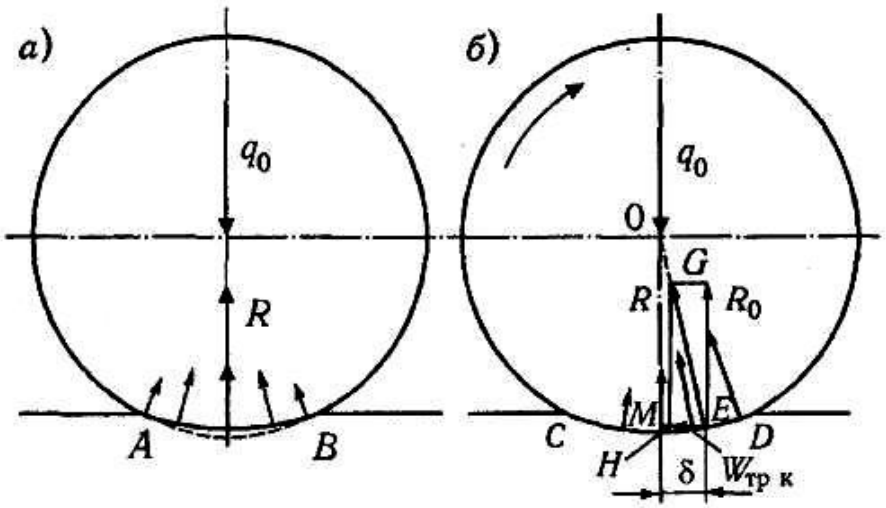


Рис. 6.3. Деформация колеса и рельса:
а — в статическом положении;
б — при движении поезда с образованием силы трения качения колеса по рельсу

В случае качения колеса по рельсу (рис. 6.3, б) силы реакции со стороны рельса перераспределяются: в набегающей части колеса они больше, а в сбегающей части – меньше, как показано стрелками на длине **CD.** Равнодействующая этих сил R, приложенная в точке **E** и направленная перпендикулярно поверхности колеса и рельса, оказывается наклоненной в сторону, противоположную направлению движения. Если силу R, внешнюю относительно поезда, разложить на вертикальную и горизонтальную составляющие, то вертикальная сила R_o уравновесит силу q_o, а горизонтальная сила $W_{тр\ к}$, направленная против движения, создаст силу трения качения колеса по рельсу. Силу $W_{тр\ к}$ (кН), можно определить, предположив, что сила R направлена к центру колеса **O.** Тогда из подобия треугольников **EHG** и **EMO** получим:

$$HG/MO = EH/EM.$$

Вследствие малой деформации колеса по сравнению с его радиусом примем $MO = D/2$.

Учитывая, что $R_o = q_o$, можно записать:

$$\text{~~}q_o\text{~~} \square \text{~~}W_{тр\ к}\text{~~},$$

D/2

где плечо трения качения.

Откуда горизонтальная сила:

$$W_{тр\ к} = 2 \cdot 1000 \cdot q_o \cdot /D,$$

где 1000 – переводной коэффициент силы q_o, кН, в Н.

Силу сопротивления движению от трения качения колес по рельсам определяют суммированием сил $W_{тр\ к}$ всех колес. Удельная сила сопротивления от трения качения колес по рельсам: $w_{тр\ к} = 2 \cdot 1000 \cdot /D$.

С увеличением твердости материала колеса и рельса отрезок уменьшается. На величину$W_{тр\ к}$ аналогично влияет и жесткость пути. Таким образом, сопротивление движению от трения качения снижается с уменьшением нагрузки от колесных пар на рельсы, увеличением диаметра колес, твердости материала колес, рельсов и жесткости пути. Удельная сила сопротивления движению от трения качения колес в среднем составляет 0,2...0,4 Н/кН.

Сила трения скольжения колес по рельсам. Качение колес по рельсам сопровождается их проскальзыванием, вызывающим силу трения скольжения между колесами и рельсами. Проскальзывание вызвано конусностью рабочих поверхностей бандажей колесных пар и отклонением их диаметров (см. рис. 1.3). Отклонениями колесных пар от перпендикулярного к оси пути положения из-за нарушения размеров при сборке тележек вагонов и локомотива, а также вследствие виляния кузовов, тележек и колесных пар, создающих колебания в горизонтальной плоскости при их движении по прямолинейному пути. Эти колебания уменьшаются при натянутых автосцепках, под действием силы тяги локомотива, например в случае движения поезда по подъему. Удельная сила сопротивления от трения скольжения колес по рельсам составляет 0,15...0,4 Н/кН.

Сила сопротивления от ударов на неровностях пути. При прохождении стыков и неровностей пути возникают удары, которые вызывают силы, действующие против направления движения поезда (рис. 6.4). Под действием нагрузки q_o от колеса на рельс он, несмотря на накладки, прогибается, и колесо наезжает на следующий рельс в точке **А**. На колесо действует внешняя сила R, направленная перпендикулярно его поверхности.

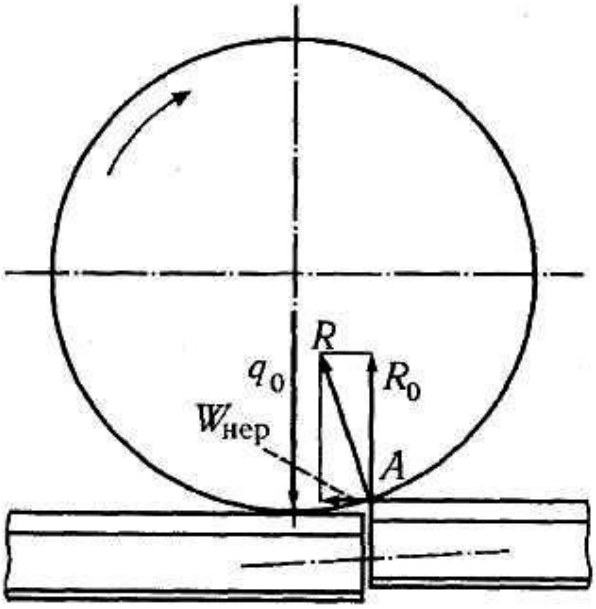


Рис. 6.4. Схема действия сил при прохождении колесом стыка

Если эту силу разложить на вертикальную и горизонтальную составляющие, то горизонтальная сила $W_{нер}$, направленная против движения, явится силой сопротивления движению от стыка.

Аналогичная картина возникает и при прохождении других неровностей пути. Эта сила зависит от скорости движения, нагрузки от колес на рельсы, расстояния между стыками, зазора в стыке. Сила сопротивления движению от стыков уменьшается при длинных и более тяжелых рельсах и щебеночном балласте. Наибольший эффект дает применение бесстыкового пути. В среднем сила сопротивления движению поезда от ударов на неровностях пути составляет 0,05...0,5 Н/кН.

Силы сопротивления воздушной среды. При движении поезда перед его лобовой частью образуется зона сжатого воздуха, который оказывает встречное давление на лобовую стенку локомотива. Боковые поверхности и крыши подвижного состава соприкасаются со струями скользящего по ним воздуха, увлекают часть его за собой, создавая поток воздуха и трение части воздуха о стенки подвижного состава. В междувагонном пространстве и у выступающих частей образуются завихрения.

Под подвижным составом часть воздуха увлекается поездом, создаются завихрения и поток, соприкасающийся с верхним строением пути. За последним вагоном поезда образуется разрежение. Эти явления вызывают внешние силы, действующие на поезд, направленные против движения. Их называют силами сопротивления воздушной среды. Данные силы зависят от площади поперечного сечения поезда, его длины, взаимного расположения разных типов вагонов в составе, формы лобовой части локомотива и задней стенки хвостового вагона, наличия выступающих частей у подвижного состава и от скорости движения.

Сила сопротивления воздушной среды примерно пропорциональна квадрату скорости и имеет важное значение при скоростном движении. Наименьшим сопротивлением обладает поезд, имеющий обтекаемую «сигарообразную» форму с выпуклой лобовой и хвостовой стенками без выступов и неровностей на подвижном составе.

Требованиям обтекаемости в большей мере удовлетворяют высокоскоростные электропоезда. Так, высокоскоростной электропоезд ЭР200, рассчитанный на движение со скоростью до 200 км/ч, имеет закругленную в плане и скошенную верхнюю часть головного и хвостового вагонов, убранные внутрь вагонов поручни и другие выступающие части.

6.2. Формулы для расчета сил основного удельного сопротивления движению

Рассмотренные составляющие сил сопротивления движению зависят от большого числа факторов, в том числе случайных, учет которых чрезмерно усложняет расчеты. Поэтому основное удельное сопротивление движению каждого вида подвижного состава определяют по эмпирическим формулам, полученным ВНИИЖТом на основании обработки результатов испытаний.

Эти формулы приводят в ПТР и справочниках отдельно для звеньевого (стыкового) и бесстыкового пути, а для локомотивов, электро- и дизель-поездов — в режиме тяги или электрического торможения (под током) и на холостом ходу (выбег или механическое торможение). Ниже приведены формулы для некоторых видов подвижного состава дорог.

1. При движении по звеньевому (стыковому) пути. Для электровозов и тепловозов:

при движении под током –

$$w_o = 1{,}9 + 0{,}01v + 0{,}0003v^2; \quad (6.1)$$

при движении без тока –

$$w_x = 2{,}4 + 0{,}011v + 0{,}00035v^2. \quad (6.2)$$

В случае необходимости более точного учета основного удельного сопротивления локомотивов можно использовать кривые, приведенные в ПТР.

Для электропоездов ЭР1, ЭР2, ЭР2Р, ЭР2Т, ЭР9М, ЭР9Т: при движении под током – $w_o = 1{,}1 + 0{,}012v + 0{,}000267v^2$; (6.3)

при движении без тока – $w_x = 1{,}24 + 0{,}02v + 0{,}000267v^2$. (6.4)

Для электропоездов ЭР22, ЭР22М:

при движении под током – $w_o = 1{,}1 + 0{,}012v + 0{,}000247v^2$; (6.5)

при движении без тока – $w_x = 1{,}22 + 0{,}018v + 0{,}000247v^2$. (6.6)

Для других серий электропоездов:

при движении под током – $w_o = 0{,}6 + 0{,}03v + 0{,}00008v^2$; (6.7)

при движении без тока – $w''_x = 1{,}1 + 0{,}02v + 0{,}00023v^2$. (6.8)

Для дизель-поездов ДР1, Д1, Д:

при движении под током – $w''_o = 1{,}1 + 0{,}012v + (0{,}000217 + 0{,}000461/n_в)v^2$; (6.9)

при движении на выбеге и при механическом торможении –

$$w''_x + w''_o + w_з, \quad (6.10)$$

здесь

$$w_з = (0{,}47 + 0{,}14v)n_м/n_в, \quad (6.11)$$

где $n_в$, $n_м$ – соответственно общее число вагонов и число моторных вагонов в дизель-поезде.

Для груженых шестиосных вагонов на роликовых подшипниках и четырехосных вагонов на подшипниках скольжения с массой, приходящейся на одну ось $m_{во} > 6$ т, в составе поезда:

$$w''_o = 0{,}7 \cdot (8 + 0{,}1v + 0{,}0025v^2)/m_{во}. \quad (6.12)$$

Для груженых четырехосных вагонов на роликовых подшипниках и четырехосных вагонов рефрижераторных поездов с массой, приходящейся на одну ось $m_{во} > 6$ т, в составе поезда:

$$w''_o = 0{,}7 \cdot (3 + 0{,}1v + 0{,}0025v^2)/m_{во}. \quad (6.13)$$

Для груженых восьмиосных вагонов на роликовых подшипниках с массой, приходящейся на одну ось $m_{во} > 6$ т, в составе поезда:

$$w''_o = 0{,}7 \cdot (6 + 0{,}038v + 0{,}0021v^2)/m_{во}. \quad (6.14)$$

Для порожних шестиосных и четырехосных вагонов на подшипниках скольжения ($m_{во} \leq 6$ т):

$$w''_o = 1{,}5 + 0{,}045v + 0{,}00027v^2. \quad (6.15)$$

Для порожних шестиосных и четырехосных вагонов на роликовых подшипниках ($m_{во} \leq 6$ т):

$$w''_o = 1{,}0 + 0{,}044v + 0{,}00024v^2. \quad (6.16)$$

Для пассажирских цельнометаллических вагонов на роликовых подшипниках (в составе поезда**)** для скоростей движения до 160 км/ч:

$$w''_o = 0{,}7 \cdot (8 + 0{,}18v + 0{,}003v^2)/m_{во}. \quad (6.17)$$

2. При движении по бесстыковому пути. Для электровозов и тепловозов:

при движении под током – $w''_o = 1{,}9 + 0{,}008v + 0{,}00025v^2$; (6.18)

при движении без тока –

$$w''_x = 2,4 + 0,009v + 0,00035v^2. \quad (6.19)$$

В случае необходимости более точного учета основного удельного сопротивления локомотивов можно использовать кривые, приведенные в ПТР.

Для электропоездов ЭР1, ЭР2, ЭР2Р, ЭР2Т, ЭР9М, ЭР9Т:

при движении под током – $w'_o = 1,1(0,01v + 0,000227v^2)$; (6.20)

при движении без тока – $w''_x = 1,24 + 0,018v + 0,000227v^2$. (6.21)

Для электропоездов ЭР22, ЭР22М:

при движении под током – $w'_o = 1,1(0,01v + 0,000207v^2)$; (6.22)

при движении без тока – $w''_x = 1,22 + 0,016v + 0,000207v^2$. (6.23)

Для других серий электропоездов:

при движении под током – $w'_o = 0,6 + 0,027v + 0,00005v^2$; (6.24)

при движении без тока – $w''_x = 1,1(0,017v + 0,0002v^2)$. (6.25)

Для дизель-поездов ДР1, Д1, Д:

при движении под током – $w'_o = 1,1(0,01v + (0,000167 + 0,000461/n_в)v^2)$; (6.26)

при движении на выбеге и при механическом торможении их следует брать по формулам (6.10) и (6.11) для звеньевого пути.

Для груженых шестиосных вагонов на роликовых подшипниках и четырехосных вагонов на подшипниках скольжения с массой, приходящейся на одну ось $m_{во} > 6$ т, в составе поезда:

$$w'_o = 0,7(8 + 0,08v + 0,002v^2)/m_{во}. \quad (6.27)$$

Для груженых четырехосных вагонов на роликовых подшипниках и четырехосных вагонов рефрижераторных поездов с массой, приходящейся на одну ось $m_{во} > 6$ т, в составе поезда:

$$w'_o = 0,7(3 + 0,09v + 0,002v^2)/m_{во}. \quad (6.28)$$

Для груженых восьмиосных вагонов на роликовых подшипниках с массой, приходящейся на одну ось $m_{во} > 6$ т, в составе поезда:

$$w'_o = 0,7(6 + 0,026v + 0,0017v^2)/m_{во}. \quad (6.29)$$

Для порожних четырехосных вагонов на подшипниках скольжения ($m_{во}$ ≤ 6 т):

$$w_0 = 1{,}5 + 0{,}042v + 0{,}00018v^2. \quad (6.30)$$

Для порожних шестиосных и четырехосных вагонов на роликовых подшипниках ($m_{во}$ ≤ 6 т):

$$w_0 = 1{,}0 + 0{,}042v + 0{,}00016v^2. \quad (6.31)$$

Для пассажирских цельнометаллических вагонов на роликовых подшипниках (в составе поезда**)** для скоростей движения до 160 км/ч:

$$w_0 = 0{,}7 + (8 + 0{,}16v + 0{,}0023v^2)/m_{во}. \quad (6.32)$$

В зоне скоростей 0…10 км/ч основное удельное сопротивление движение принимают неизменным, рассчитанным по приведенным формулам при v =10 км/ч.

Из приведенных формул видно, что основное удельное сопротивление движению возрастает с увеличением скорости, причем в зоне высоких скоростей за счет квадратичной составляющей, отражающей сопротивление воздушной среды, сопротивление движению растет интенсивнее по сравнению с малыми скоростями. У грузовых груженых вагонов основное удельное сопротивление движению увеличивается при снижении массы, отнесенной к одной колесной пары вагона. Бесстыковой путь способствует снижению сопротивления движению поезда. На рис. 6.5 приведены значения основного удельного сопротивления для некоторых видов подвижного состава при движении по звеньевому и бесстыковому пути.

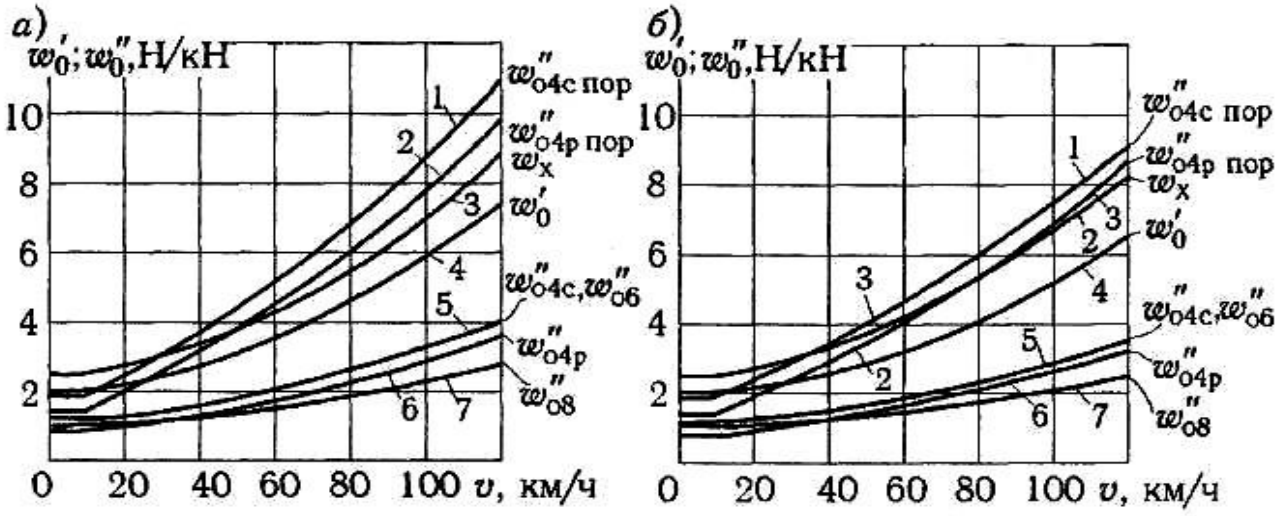


Рис. 6.5. Зависимость основного удельного сопротивления движению от скорости для локомотивов и вагонов в случае движения по звеньевому пути (а) и бесстыковому пути (б);
1 — порожние четырехосные вагоны на подшипниках скольжения; 2 — порожние четырехосные вагоны на роликовых подшипниках;
3 — локомотивы при движении на холостом ходу (на выбеге или при механическом торможении);
4 — то же при движении под током (в режиме тяги или при электрическом торможении);
5 — груженые четырехосные вагоны с подшипниками скольжения или шестиосные вагоны на роликовых подшипниках ($m_{во}$ = 17,5 т);
6 — груженые четырехосные вагоны на роликовых подшипниках; 7 — груженые восьмиосные вагоны на роликовых подшипниках ($m_{во}$ = 20 т)

6.3. Основное удельное сопротивление движению поезда

Приведенные эмпирические формулы позволяют определить силы основного удельного сопротивления каждого вида подвижного состава. Основное сопротивление движению равно произведению удельной силы сопротивления движению локомотива или вагона на их вес.

Поскольку сопротивление движению локомотивов в зависимости от режима работы рассчитывают по разным формулам, целесообразно вначале определить сопротивление движению состава, а затем локомотива в нужном режиме.

Основное сопротивление движению состава в ньютонах определяют как сумму сопротивлений движению каждого типа вагонов:

$$W_o = w_{o1} m_1 g + w_{o2} m_2 g + \ldots + w_{on} m_n g, \qquad (6.33)$$

где w_{o1}, w_{o2}, ..., w_{on} – основное удельное сопротивление каждого типа вагонов, входящих в состав; m_1, m_2, …, m_n – сумма масс соответствующих типов вагонов, входящих в состав; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с^2.

Основное удельное сопротивление движению состава:

$$w_o = \frac{W_o}{mg} = \frac{w_{o1}m_1 + w_{o2}m_2 + \ldots + w_{on}m_n}{m_c g} = \frac{m_1 + m_2 + \ldots + m_n}{m},$$

где m_c – масса состава в тоннах, равная сумме масс вагонов.

Если соотношение вагонов различных типов в составе задают в процентах по массе вагонов, то основное удельное сопротивление движению:

$$w_o = w_{o1}\frac{p_1}{100} + w_{o2}\frac{p_2}{100} + \ldots + w_{on}\frac{p_n}{100}, \quad (6.35)$$

где p_1, p_2, ..., p_n – процентное соотношение масс вагонов различных типов.

Основное сопротивление движению локомотива:

$$W_o = w_o m_л g,$$

где $m_л$ – масса локомотива.

Основное сопротивление движению поезда W_o определяют как сумму основных сопротивлений движению локомотива и состава. При движении в режиме тяги или электрического торможения (под током):

$$W_o = W_o + W_o. \quad (6.37)$$

Основное удельное сопротивление движению поезда:

$$w_o = \frac{W_o}{mg} = \frac{W_o + W_o}{mg} = w_o m_л + w_o m_c.$$

(6.38) mg m

Аналогично при движении поезда в режиме холостого хода (выбега или механического торможения) основное сопротивление движению поезда имеет вид:

$$W_{ox} = W_x + W_o, \quad (6.39)$$

а основное удельное сопротивление движению поезда: $w_{ox} = \frac{w_x m_л + w_o m_c}{m}$.

(6.40)

Необходимо отметить, что удельные силы сопротивления движению поезда определяют не как сумму удельных сил каждого вагона и локомотива, а как средневзвешенную величину.

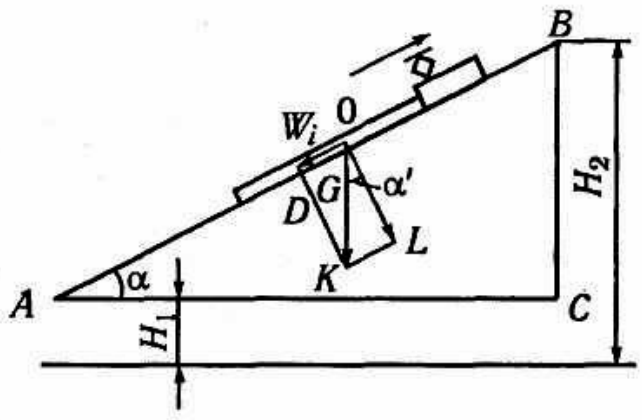


Рис. 6.6. Схема сил, действующих на поезд на уклоне

6.4. Дополнительное сопротивление движению

К силам дополнительного сопротивления движению $W_д$ относят силы сопротивления, возникающие от уклонов, при движении в кривых участках пути, трогании с места; силы

сопротивления, создаваемые подвагонными генераторами в пассажирских поездах, а также силы сопротивления, возникающие при низких температурах наружного воздуха, действие встречного или бокового ветра.

Дополнительное сопротивление от уклонов. Эта сила создается составляющей веса поезда, действующей на подъеме против движения поезда, а на спусках — по направлению движения.

Крутизна подъема определяется углом (рис. 6.6). На железнодорожном транспорте крутизну подъемов i измеряют в тысячных долях (‰), равных отношению высоты подъема **BC** к его длине **AB,** умноженному на 1000:

$$i = 1000 \sin\alpha \approx 1000 BC/AB. \quad (6.41)$$

Если известны высоты точек **A** и **B** H_1 и H_2 над уровнем моря, то крутизна:

$$i = 1000 (H_1 - H_2)/s_{эл}, \quad (6.42)$$

где $s_{эл}$ — длина элемента профиля пути.

Иными словами, крутизна показывает высоту подъема в метрах на каждый километр пути. Например, на подъеме 5 ‰ поезд поднимается на 5 м на каждый километр пути. В случае спуска перед уклоном ставят знак минус.

На рис. 6.6 показана схема сил, действующих на подвижной состав, находящийся на уклоне. Вертикальную силу тяжести **G** поезда, отложенную в масштабе в виде вектора **OK,** можно разложить на две составляющие. Сила **OL,** направленная перпендикулярно к рельсам, не влияет на движение поезда, а сила **OD,** действующая при движении по подъему против движения, является силой сопротивления движению от подъема $\mathbf{W_i}$. Из этого рисунка видно, что сила $\mathbf{W_i}$ равна: $W_i = G \sin\alpha$.

Для поезда массой m, сила G = 1000 mg, тогда сила $\mathbf{W_i}$ равна:

$$W_i = 1000 mg \sin\alpha. \quad (6.43)$$

Треугольники **CAB** и **LOK** подобны, так как имеют взаимно перпендикулярные стороны. Следовательно, $\alpha = \alpha$ и $\sin\alpha = \sin\alpha$. Подставив в выражение (6.43) значение $\sin\alpha$ из формулы (6.41), получим:

$$W_i = mgi. \quad (6.44)$$

Поскольку удельная сила дополнительного сопротивления движению от подъема равна силе W_i, разделенной на вес поезда, получим:

$$w_i = \frac{W_i}{mg} = i. \quad (6.45)$$

Таким образом, удельная сила дополнительного сопротивления от подъема, численно равна подъему в тысячных долях. Например, при движении поезда по

подъему в 9 ‰ он будет испытывать удельное дополнительное сопротивление движению в 9 Н/кН. При движении по спуску такой же крутизны удельная сила сопротивления движению от уклона будет иметь то же значение, но действовать она будет по направлению движения поезда.

Дополнительное сопротивление при движении поезда в кривой. При движении поезда в кривых участках пути колеса гребнем прижимаются к наружному рельсу. Сила реакции рельса вынуждает поезд двигаться криволинейно. Между гребнями колес и боковой поверхностью головки рельса возникает трение. При движении в кривых увеличивается также проскальзывание колес из-за разной длины наружного и внутреннего рельсов, несмотря на конический профиль рабочих поверхностей колес. При входе в кривые и выходе из них или при изменении радиуса кривой тележки поворачиваются относительно кузова, и появляется трение в опорах и боковых скользунах.

Перечисленные силы трения, приведенные к ободам колесных пар, создают силы дополнительного сопротивления движению от кривизны пути.

Они возрастают с уменьшением радиуса кривой, а также зависят от скорости движения, вида подвижного состава, состояния пути и степени возвышения наружного рельса, боковых зазоров между рельсами и гребнями колес, степени износа колесных пар и их разбегов. Из-за большого числа факторов и сложных зависимостей сил сопротивления движению от условий эксплуатации дополнительное удельное сопротивление движению от кривых w_r на эксплуатируемых дорогах определяют по эмпирическим формулам в зависимости только от радиуса:

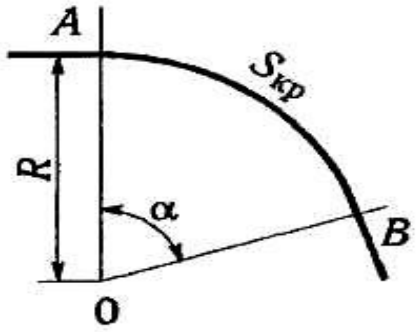


Рис. 6.7. Схема криволинейного участка пути

$$w_r = 700/R, \qquad (6.46)$$

где R – радиус кривой (см. рис. 6.7).

Кривые участки пути, кроме радиуса R и длины $s_{кр}$, могут быть заданы центральным углом □ и длиной $s_{кр}$. Тогда формулу (6.46) преобразуют следующим образом. Окружность имеет центральный угол 360°, ее длина $s_{окр} = 2\pi R$. Длина кривой в метрах с центральным углом □ (в градусах) равна:

$$s_{кр} = \frac{s_{окр} \cdot \square}{360} = \frac{2\pi R \cdot \square}{360},$$

Подставив значение R в формулу (6.46), получим:

$$360 s^{кр}$$

$$R = \frac{\quad}{2\alpha}. \qquad (6.47)$$

При расчетах, требующих повышенной точности и проектировании железных дорог дополнительное удельное сопротивление от кривой принимают по формуле:

$$w_r = \frac{200}{R}(1,5),$$

где α абсолютное значение непогашенного ускорения в кривой, определяемого по формуле:

$$\alpha = \frac{v^2}{g}\left(\frac{h}{S}; 13R\right)$$

здесь: h – возвышение наружного рельса; S – расстояние между кругами катания подвижного состава (для широкой колеи S = 1600 мм); g – ускорение под действием силы тяжести, равное 9,81 м/с^2.

Если вместо радиуса кривой задается ее центральный угол, то расчет w_r проводят по формуле:

$$w_r = 3,5\frac{\beta}{s_{кр}}(1,5).$$

В том случае, когда длина кривой меньше длины поезда, выражение w_r умножается на отношение $s_{кр}/l_п$. Тогда формула (6.46) будет иметь вид:

$$w_r = \frac{700}{R}\cdot\frac{s^{кр}}{l_п}, \qquad (6.49)$$

а формула (6.48):

$$w_r = 12,2/l_п. \qquad (6.50)$$

Дополнительное сопротивление при движении в кривой заменяют равным ему значением сопротивления от подъема и называют фиктивным подъемом. Например, в кривой радиусом 700 м поезд испытывает дополнительное удельное сопротивление w_r = 1 Н/кН. С учетом (6.45) его заменяют прямолинейным движением по фиктивному подъему 1‰.

Суммарное дополнительное удельное сопротивление от уклонов и кривых при расчетах заменяют так называемым приведенным подъемом $i_к$. С учетом изложенного:

$$i_к = w_r - i. \qquad (6.51)$$

Дополнительное сопротивление при трогании с места. Из рис. 6.2 видно, что силы трения в подшипниках при трогании поезда оказываются выше, чем при движении. В меньшей степени на сопротивление движению при трогании влияют: повышенное трение качения колеса из-за больших деформаций колес и рельсов при стоянке по сравнению с деформациями при качении колес, нагрузки от колесных пар на рельсы, температура окружающего воздуха, качество применяемого масла.

Особенно большая разница в силах сопротивления при трогании и движении проявляется в подшипниках скольжения; у роликовых подшипников она значительно меньше. После трогания сила сопротивления движению резко снижается, так как трущиеся поверхности нагреваются и в зону трения попадает смазка (у подшипников скольжения при повороте колеса примерно на половину оборота).

Силы удельного сопротивления при трогании состава (основного и дополнительного) определяют по эмпирическим формулам, рекомендованным ПТР, Н/кН:

для подвижного состава на подшипниках скольжения —

$$w_{тр}^{ск} = \frac{142}{m_{во} + 7}; \quad (6.52)$$

для подвижного состава на роликовых подшипниках —

$$w_{тр}^{р} = \frac{28}{m_{во} + 7}, \quad (6.53)$$

где $m_{во}$ – масса, приходящаяся на одну ось.

В том случае, когда в составе находятся разнотипные вагоны с различными массами, приходящимися на одну ось, удельную силу $w_{тр}$ определяют как средневзвешенную величину.

Дополнительное сопротивление движению от подвагонных генераторов. Подвагонные генераторы обеспечивают пассажирские вагоны электрической энергией, необходимой для освещения, зарядки аккумуляторной батареи, работы электродвигателей вентиляционного агрегата и других установок, а также бытовых электрических приборов. Якорь генератора приводится во вращение от колесной пары вагона через редукторно-карданный или ременный привод, создавая дополнительное сопротивление движению вагона. Дополнительное удельное сопротивление движению от подвагонных генераторов $w_{пг}$, определяют исходя из мощности генераторов по формуле: 136 P

$$w_{пг} = \frac{}{m_{во} v},$$

где P' – средняя условная мощность подвагонного генератора, приходящаяся на один вагон поезда:

$$P = P_{пг} n_{бк} + P_{пг} + P_{гк} n_{кв}$$

, $n_в$

где $P_{пг}$ – фактическая мощность подвагонного генератора, которая расходуется на нужды вагона, за исключением кондиционирования воздуха, принимаемая для среднесетевых условий равной 2 кВт; $n_{бк}$ – число вагонов без кондиционирования воздуха, но имеющих подвагонные генераторы; $P_{гк}$ — фактическая мощность подвагонного генератора, расходуемая на кондиционирование воздуха (средняя за время работы кондиционера), принимаемая равной 9 кВт; $n_{кв}$ – число вагонов с кондиционированием воздуха; $n_в$ – общее число вагонов в поезде.

Дополнительное сопротивление движению $w_{пг}$ учитывают при скоростях движения 20 км/ч и выше. При низких скоростях это сопротивление в расчетах не учитывают.

Дополнительное сопротивление движению при низких температурах окружающего воздуха. При низких температурах возрастает вязкость смазки. Следовательно, повышаются коэффициенты трения в буксовых и моторно-осевых подшипниках и передаче подвижного состава, что приводит к увеличению сил сопротивления движению. Возрастает также и сопротивление воздушной среды вследствие повышения плотности воздуха при пониженных температурах. Степень увеличения основного удельного сопротивления движению в данном случае определяют в соответствии с рекомендациями ПТР коэффициентом $к_{нт}$, на который умножают основное сопротивление движению:

$$w_{онт} = w_о к_{нт}. \quad (6.54)$$

Дополнительное удельное сопротивление движению при низких температурах: $w_{нт} = w_о (к_{нт} - 1)$.

Дополнительное сопротивление движению от ветра. Ветер изменяет силы сопротивления движению воздушной среды. При встречном ветре они возрастают за счет увеличения относительной скорости воздушного потока, которая равна сумме скоростей поезда и встречного ветра. Под действием бокового ветра подвижной состав смещается в сторону и возникает трение гребней колесных пар о боковую поверхность рельса подобно тому, что происходит при проследовании кривого участка пути. Попутный ветер уменьшает силы сопротивления движению поезда.

Увеличение основного удельного сопротивления движению поезда от действия встречного и бокового ветра шов учитывают коэффициентом $к_в$, на который умножают основное удельное сопротивление движению поезда $w_о$:

$$w_{ов} = w_о к_в. \quad (6.55)$$

Коэффициент $к_в$ зависит от скорости ветра и скорости движения поезда.

Дополнительное удельное сопротивление движению поезда от ветра: $w_в$

$$ w_o(к_в - 1). $$

При скорости ветра более 12 м/с его влияние учитывают на период особо неблагоприятных погодных условий по номограммам, приводимым в ПТР.

При действии нескольких составляющих дополнительного сопротивления движению их удельные значения складывают:

$$ w_д = w_i + w_r + w_{нг} + w_{нт} + w_в. \quad (6.56) $$

6.5. Общее сопротивление движению поезда

При движении поезда на него действует алгебраическая сумма сил основного и дополнительного сопротивлений, которую называют ***общим сопротивлением движению поезда*** $W_к$. При работе локомотива под током в режиме тяги или электрического торможения общее сопротивление:

$$ W_к = W_o + W_д. \quad (6.57) $$

Аналогично определяют общее удельное сопротивление движению поезда:

$$ w_к = w_o + w_д. \quad (6.58) $$

В случае работы локомотива на холостом ходу (выбег или механическое торможение) общее удельное сопротивление движению поезда имеет вид:

$$ w_к = w_{ох} + w_д. \quad (6.59) $$

Общее сопротивление при движении поезда не остается постоянным в результате изменения режимов и скоростей движения, профиля пути, атмосферных условий.

6.6. Мероприятия по снижению сил сопротивления движению поездов

Как известно, локомотив совершает работу, направленную на преодоление сил основного и дополнительного сопротивлений движению, действующих против движения поезда. Если эти силы будут меньше, то локомотив совершит на перемещение поезда меньшую работу, а следовательно, будет расходовать меньше электроэнергии или топлива. При меньшем сопротивлении движению можно повышать массу состава и скорости движения поездов. Поэтому на железнодорожном транспорте проводят крупные фундаментальные работы, направленные на уменьшение сопротивления движению поезда, принимают также меры по его снижению в эксплуатации.

К ним относятся перевод грузовых вагонов с буксовых подшипников скольжения на роликовые подшипники, дающие снижение сопротивления движению на 10...20 %, а при трогании с места в 4...5 раз. Замена звеньевого пути на бесстыковой, а также укладка в путь более тяжелых рельсов на щебеночном основании, уменьшающих просадку верхнего строения пути, приводят к уменьшению сопротивления движению поездов, наиболее заметному при высоких скоростях.

Снижение массы тары вагонов позволяет увеличить полезную массу груза и снизить удельное сопротивление движению на единицу перевозимого груза. Придание обтекаемой формы подвижному составу, особенно при движении с высокими скоростями, приводит к уменьшению сопротивления движению воздушной среды.

При проектировании и постройке новых дорог желательно предусматривать меньшие по значению уклоны для снижения дополнительного сопротивления от подъемов. Подобные работы иногда проводят и при реконструкции пути. Удлинение станционных путей на участках, где их длина ограничивает массу поезда, позволяет увеличить массу поезда и снизить удельные силы сопротивления его движению.

Чтобы уменьшить дополнительное сопротивление от сильных боковых ветров, дующих на открытых равнинных местах, вдоль железнодорожных линий сажают ветрозащитные лесные полосы, которые одновременно уменьшают количество снега, попадающего на путь.

Перевозка грузов в поездах нормальной или повышенной массы позволяет работать при меньших удельных сопротивлениях движению поезда. Этому помогает и полная загрузка вагонов. Поезда с массой меньше нормальной, сформированные из не полностью загруженных вагонов, обладают повышенным удельным сопротивлением движению. Правильное формирование состава, при котором крытые вагоны, полувагоны и платформы сосредоточиваются в отдельных группах, позволяет снизить основное сопротивление движению воздушной среды. Этому же способствует движение вагонов с закрытыми дверьми и люками, создающими меньшее сопротивление воздушному потоку.

Исправное состояние ходовых частей подвижного состава и пути, своевременное устранение повышенных износов деталей делают более плавным ход вагонов и локомотивов, снижают виляние тележек и кузовов подвижного состава. Уменьшение трения в узлах подвижного состава и трения скольжения колес относительно рельсов способствует снижению сопротивления движению.

Содержание тормозной системы поезда в исправном состоянии, исключающее самоторможение отдельных вагонов и касания колодок о колеса в отторможенном положении, способствует снижению сил сопротивления движению. Своевременный сезонный переход на зимние и северные смазки буксовых подшипников скольжения обеспечивает меньший коэффициент трения, а значит, и меньшее основное сопротивление движению. Чтобы уменьшить работы по преодолению сил сопротивления при трогании, необходимо делать меньше остановок и снижать продолжительность стоянок поездов.

Опыт передовых депо и машинистов показывает, что при выполнении перечисленных мер по снижению удельных сил сопротивления движению поезда

возможно повышение масс составов. Эти мероприятия в числе прочих были использованы при подготовке и осуществлении мер по эксплуатации длинносоставных поездов повышенных масс (до 6... 15 тыс. т и более).

Тема 7
ТОРМОЗНЫЕ СИЛЫ ПОЕЗДА
7.1. Общие сведения

Тормозными силами называют управляемые внешние силы, действующие против движения поезда для снижения скорости движения или поддержания ее на спуске. От значения тормозных сил зависит безопасность движения поездов. Поэтому должна быть обеспечена высокая надежность и эффективность тормозов.

В зависимости от принципа создания тормозных сил применяют ***механическое*** или ***электрическое торможение.*** При ***механическом торможении*** тормозная сила образуется в результате трения тормозных колодок о поверхности катания колес или о тормозные диски, специально укрепленные на колесных парах некоторых типов пассажирских вагонов и вагонов электропоездов. Тормозные силы создаются на ободах всех колесных пар подвижного состава, имеющих тормозные колодки.

Управление механическими тормозными силами может быть ***пневматическим (воздушным) или электропневматическим.*** В первом случае машинист управляет торможением, изменяя давление в тормозной магистрали поезда. Его снижение приводит к включению тормозов. В связи с неодновременным понижением давления с помощью крана машиниста локомотива тормоза головной части поезда срабатывают раньше, чем в хвостовой части, что вызывает продольные динамические силы в поезде.

В пассажирских поездах используют электропневматические тормоза, в которых снабжение вагонов сжатым воздухом идет через тормозную магистраль, а управление воздухораспределителями вагонов осуществляется по электрическим проводам. Вследствие этого тормозной эффект всех вагонов поезда возникает практически одновременно.

Электрическое торможение основано на использовании принципа обратимости электрических машин. Тяговые электродвигатели переводят в генераторный режим, при котором потенциальная энергия поезда, движущегося с постоянной скоростью по спуску, или кинетическая энергия поезда при замедлении превращается в электрическую энергию. Возникающие при этом электромагнитные силы используют для получения тормозной силы.

Электрическое торможение подразделяют на ***реостатное и рекуперативное.*** При ***реостатном торможении*** электрическая энергия в реостате преобразуется в тепловую, рассеиваемую в окружающей среде. При ***рекуперативном торможении,*** свойственном только электроподвижному

составу, электрическая энергия не рассеивается, а отдается в контактную сеть для полезного использования. Естественно, что тормозные силы при электрическом торможении можно получить на ободах только движущих колесных пар.

В грузовых и пассажирских поездах при тяге локомотивом, имеющем небольшое число сцепных осей, получить большие тормозные силы при электрическом торможении нельзя. Поэтому его используют чаще всего для поддержания примерно постоянной скорости движения по спуску. На электропоездах, имеющих значительно большее число сцепных осей, электрическое торможение успешно применяют и для снижения скорости перед остановками.

При механическом торможении поезда в создании тормозных сил участвует значительно большее число колесных пар (локомотива и вагонов), создающих соответственно большие тормозные силы. Часть вагонов и локомотивы оборудуют также ручными тормозами, используемыми в основном для удержания подвижного состава на путях в нерабочем состоянии.

Рис. 7.1. Образование тормозной силы

7.2. Образование тормозной силы при механическом торможении и ее ограничение

Сила нажатия колодок на колесные пары при механическом торможении образуется за счет давления сжатого воздуха в тормозных цилиндрах. Под действием силы, развиваемой сжатым воздухом, поршень тормозного цилиндра со штоком смещается. Через механическую рычажную передачу, состоящую из тяг и рычагов, он передает силу на каждую колодку. Если каждая колодка прижимается к вращающемуся колесу (рис. 7.1) с силой K_1, то в месте контакта возникает сила трения $K_1\varphi_к$, противодействующая вращению колеса ($\varphi_к$ – коэффициент трения колодки о колесо).

Эта сила передается в точку **С** контакта колеса и рельса. Обе силы являются внутренними относительно поезда и не могут повлиять на характер его движения. Если колесо будет прижато к рельсу с силой q_o, то в результате сцепления колеса с рельсом сила $K_1\varphi_к$, приложенная от колеса к рельсу и стремящаяся сдвинуть рельс по направлению движения, вызовет реакцию рельса В, равную силе $K_1\varphi_к$ и противоположно направленную. Эта сила является внешней по отношению к поезду и называется ***тормозной силой.*** Она действует против движения и создает необходимый колесу упор. Тормозная сила, развиваемая колесной парой:

$$B = 1000 K \varphi_к. \qquad (7.1)$$

где К – суммарная сила нажатия колодок на колесную пару.

Сила К зависит от диаметра тормозного цилиндра, давления сжатого воздуха в нем, силы оттормаживающей пружины, передаточного отношения рычажной передачи и ее КПД. Для каждого локомотива и вагона сила К может быть определена по этим данным.

Коэффициент трения колодок о колеса зависит в основном от материала колодок, скорости движения и удельных сил нажатия колодок на колеса. На железных дорогах применяют три типа колодок: ***стандартные чугунные, чугунные с повышенным содержанием фосфора (до 1,0... 1,4 %) и композиционные***. С увеличением скорости движения и удельного нажатия колодок (нажатия на единицу площади контакта) коэффициент трения снижается. Это объясняется большим количеством тепла, выделяемым при трении колодки о бандаж. За счет тепла на рабочей поверхности колодки металл размягчается, что вызывает снижение коэффициента трения. Чтобы коэффициент трения получить более высоким, применяют двустороннее нажатие колодок на каждое колесо, при котором уменьшается удельная сила нажатия колодок.

У стандартных чугунных колодок коэффициент трения резко снижается с увеличением скорости движения. Их недостатком является сравнительно большой износ. Чугунные колодки с повышенным содержанием фосфора имеют несколько больший коэффициент трения и меньше изнашиваются при работе. Композиционные колодки обладают более высоким коэффициентом трения, особенно в зоне высоких скоростей, и малым износом.

Коэффициент трения тормозных колодок о колеса рассчитывают по следующим эмпирическим формулам:

для стандартных чугунных колодок —

$$\varphi_к = 0{,}6 + \frac{1{,}63K + 100}{8{,}15K + 100} - \frac{v + 100}{5v + 100}; \qquad (7.2)$$

для чугунных колодок с повышенным содержанием фосфора –

$$\varphi_к = 0{,}5 + \frac{1{,}63K + 100}{5{,}3K + 100} - \frac{v + 100}{5v + 100}; \qquad (7.3)$$

для композиционных колодок –

$$\varphi_к = 0{,}44 + \frac{0{,}1K + 20}{0{,}41K + 20} - \frac{v + 150}{2v + 150}. \qquad (7.4)$$

В этих формулах К – действительная сила нажатия колодок на одну колесную пару. В таблице 7.1 приведены значения □$_к$ для различных типов колодок при разных скоростях движения и нажатии 24,5 кН.

Таблица 7.1

Скорость v, км/ч	ные чугу	Чугунные с повышенным содержанием фосфора	ные Композицио	рост, км/ч Ск,	ные чугу	Чугунные с повышенным содержанием фосфора	ные Композицио
0	0,280	0,304	0,329	80	0,100	0,110	0,244
10	0,205	0,223	0,309	100	0,093	0,101	0,235
20	0,168	0,183	0,294	120	0,088	0,096	0,228
40	0,130	0,142	0,271	140	0,084	0,091	0,222
60	0,112	0,122	0,256	160	0,080	0,088	0,217

На рис. 7.2 приведены графики □$_к$ □v□ при разных силах К. Из этих кривых видна разница в значениях □$_к$ разных типов колодок. Коэффициент трения композиционных колодок снижается с увеличением скорости значительно меньше, чем чугунных. В зоне высоких скоростей движения он превышает в два с лишним раза коэффициенты трения чугунных колодок. Сравнивая сплошные и штриховые линии, видно, что □$_к$ имеет меньшее значение при больших силах нажатия колодок.

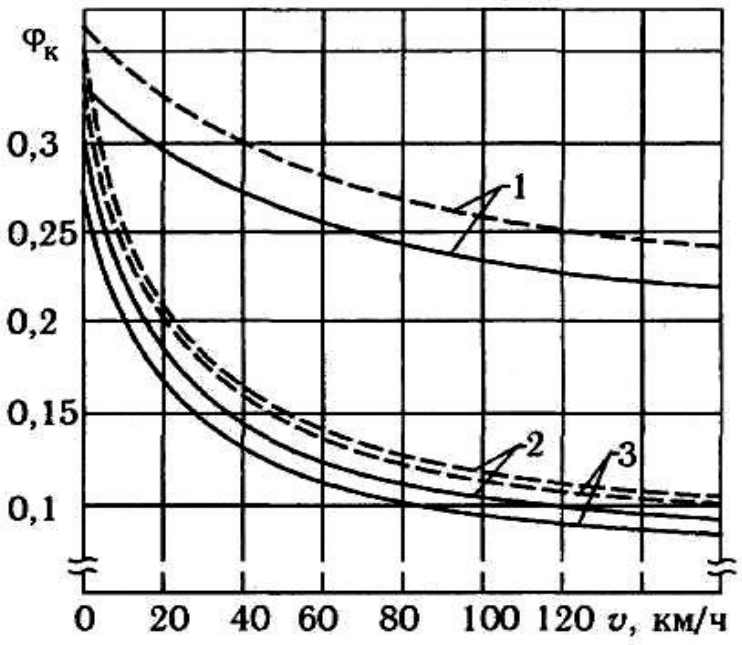


Рис. 7.2. Зависимость коэффициента трения колодок о колеса от скорости движения при К = 24,5 кН на ось (сплошные линии) и К = 14,7 кН (штриховые): 1 — композиционные колодки; 2 — чугунные колодки с повышенным содержанием фосфора; 3 — стандартные чугунные колодки

Для получения повышения тормозного эффекта в поезде и повышения безопасности движения необходимо иметь увеличенные тормозные силы.

Однако они ограничиваются сцеплением колес подвижного состава с рельсами. Если тормозная сила колесной пары превысит силы сцепления колес, то начнется проскальзывание колес относительно рельсов. Колесная пара может перестать вращаться – заклиниться тормозными колодками и перейти к скольжению по рельсу. Возникнет так называемый юз. В результате этого на поверхностях катания колес образуются местные износы – выбоины. В дальнейшем при качении такой колесной пары слышны удары при каждом обороте колеса.

Чтобы исключить юз колесных пар, тормозная сила должна быть меньше или в пределе равна силе сцепления колес с рельсами:

$$n_к K \square_к \square\square q_o, \qquad (7.5)$$

где □□ коэффициент сцепления колесной пары с рельсами; q_o – нагрузка от колесной пары на рельсы, кН.

Отношение силы нажатия колодок на колесную пару к нагрузке от колесной пары на рельсы называют ***коэффициентом нажатия колодок:***

$$\square\ \square\ n_к K/q_o \square\square/\square_к. \qquad (7.6)$$

Обычно при расчетах принимают следующие значения коэффициента нажатия колодок: чугунные колодки – для локомотивов □ □ 0,5□0,6; для грузовых вагонов □ □ 0,6 □0,7; для пассажирских вагонов □ □ 0,7 □0,9. При композиционных колодках □ □ 0,3.

При разработке тормозных средств подвижного состава по заданному значению □ из выражения (7.6) находят наибольшие силы нажатия колодок на колесную пару для каждой нагрузки от колесной пары на рельсы q_o. Из формул (7.5) и (7.6) видно, что при меньших значениях коэффициента трения $\square_к$ можно допускать большие нажатия колодок на колесные пары. Поэтому при использовании композиционных колодок с большим $\square_к$ создают меньшие силы нажатия колодок за счет изменения передаточного отношения рычажной тормозной передачи или уменьшения давления в тормозных цилиндрах.

На грузовых вагонах q_o значительно изменяется в зависимости от загрузки кузова. Чтобы получить меньшие значения коэффициента нажатия колодок □, используют три режима работы воздухораспределителей. Когда масса груза менее 3 т на колесную пару, воздухораспределитель включают на порожний режим, при котором реализуется наименьшее нажатие колодок на ось и □ соответствует 0,7. При массе груза, приходящейся на колесную пару, от 3 до 6 т включительно используют

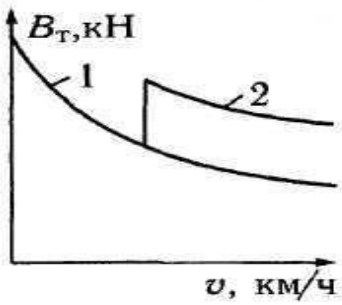


Рис. 7.3. Зависимость тормозной силы от скорости движения при нормальном коэффициенте нажатия колодок (1) и повышенном (2)

средний режим, а при массе груза на одну колесную пару более 6 т воздухораспределитель включают на груженый режим (с К = 69 кН и □ □ 0,7). Такой же коэффициент нажатия на грузовых вагонах с композиционными колодками (при массе груза на одну колесную пару до 6 т) получают при включении на порожний режим, при массе груза на одну колесную пару более 6 т – на средний.

В связи с тем, что коэффициент трения чугунных колодок в зоне высоких скоростей имеет малое значение, при неизменных К и □ тормозные силы в этой зоне получаются низкими. Для повышения тормозной силы на пассажирских вагонах, оборудованных чугунными колодками, движущимися со скоростями более 120 км/ч, используют повышенные значения нажатий К (рис. 7.3) и коэффициента нажатия колодок □. Чтобы не было юза при малых скоростях движения, вагоны оборудуют автоматическими регуляторами, снижающими силу К и коэффициент □ при скоростях 50...60 км/ч.

Кроме того, они имеют противоюзные устройства. Если вагоны оборудованы композиционными колодками, то нет необходимости вводить второй режим нажатия колодок.

7.3. Расчет тормозных сил поезда

Тормозную силу поезда определяют как сумму тормозных сил, развиваемых каждой колесной парой подвижного состава:

$$B_т \square 1000 \square K \square_к, \qquad (7.7)$$

где $B_т$ □ тормозная сила поезда; К – сила нажатия колодок на колесную пару; 1000 – переводной коэффициент (кН в Н).

Таким образом, для определения тормозной силы поезда по формуле (7.7) при заданной скорости необходимо для каждой группы вагонов в составе, имеющих одинаковые силы нажатия колодок на колесные пары, определить силу К, умножить ее на коэффициент трения $\square_к$ **,** рассчитанный по формулам (7.2)...(7.4), затем просуммировать произведения с учетом всех тормозных осей и умножить на 1000.

Этим методом удобно рассчитывать тормозную силу поезда в том случае, когда в составе находятся однотипные вагоны с одинаковыми силами нажатия колодок на колесные пары. В тех случаях, когда вагоны состава имеют различные силы нажатия колодок, обычно используют более простой метод – метод приведения. Он основан на замене действительного коэффициента трения колодок о колеса, зависящего, как видно из формул (7.2)...(7.4), от силы нажатия К, другим значением – расчетным коэффициентом трения $\square_{кр}$, не зависящим от силы К.

Расчетный коэффициент трения $\varphi_{кр}$ для чугунных колодок определяют по формуле (7.2) при условной средней силе нажатия К = 26,5 кН, а для композиционных – по формуле (7.4) при условной силе нажатия К = 15,7 кН. Эти силы являются средними силами нажатия колодки четырехосного вагона при груженом и порожнем режимах торможения. Подставив значение К в формулы (7.2) и (7.4), получают:

для чугунных колодок —

$$\varphi_{кр} = 0{,}27 \cdot \frac{v + 100}{5v + 100}; \qquad (7.8)$$

для композиционных колодок —

$$\varphi_{кр} = 0{,}36 \cdot \frac{v + 150}{2v + 150}. \qquad (7.9)$$

Значения расчетных коэффициентов трения колодок о колеса, вычисленные по формулам (7.8)…(7.9), приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2

Скорость v, км/ч	Чугунные	Композиционные	Скорость v, км/ч	Чугунные	Композиционные
0	0,270	0,360	90	0,093	0,262
10	0,198	0,339	100	0,090	0,257
20	0,162	0,332	110	0,087	0,253
30	0,140	0,309	120	0,085	0,249
40	0,126	0,297	130	0,083	0,246
50	0,116	0,288	140	0,081	0,242
60	0,108	0,280	150	0,079	0,240
70	0,102	0,273	160	0,077	0,237
80	0,097	0,267			

Для сохранения той же тормозной силы необходимо действительную силу нажатия колодок на колесную пару заменить на расчетные силы нажатия, которые находят из равенства тормозных сил:

$$К\varphi_к = К_р\varphi_{кр}. \qquad (7.10)$$

Отсюда расчетная сила нажатия, кН,

$$К_р = \frac{К\varphi_к}{\varphi_{кр}}. \qquad (7.11)$$

По формуле (7.11) могут быть определены расчетные силы нажатия колодок на колесные пары для всех типов подвижного состава железных дорог.

Для стандартных чугунных колодок при подстановке значений $\varphi_к$ из формулы (7.2) и $\varphi_{кр}$ из выражения (7.8) получают:

$$K_р = 2{,}22K\frac{1{,}63K+100}{8{,}15K+100}. \quad (7.12)$$

Для чугунных колодок с повышенным содержанием фосфора из формул (7.3) и (7.8):

$$K_р = 1.85K\frac{1{,}63K+100}{5.3K+100}. \quad (7\ 13)$$

Для композиционных колодок из формул (7.4) и (7.9), кН:

$$K_р = 1{,}22K\frac{0{,}1K+20}{0{,}41K+20}. \quad (7\ 14)$$

Если бы расчетные силы нажатия колодок на колеса каждый раз нужно было вычислять по приведенным формулам, то расчет бы не упростился, а усложнился. Однако их один раз рассчитывают для каждого типа подвижного состава и приводят в виде норм, установленных РЖД в инструкциях по эксплуатации автотормозов. Учетная масса локомотивов, число тормозных осей, расчетные силы нажатия чугунных тормозных колодок для некоторых типов локомотивов и моторвагонного подвижного состава приведены в таблице 7.3. При использовании на электропоездах чугунных колодок с повышенным содержанием фосфора, имеющих больший коэффициент трения, чем стандартные тормозные колодки, расчетные силы нажатия принимают на 10 % больше, чем при стандартных чугунных колодках.

Если в одном поезде окажутся вагоны с чугунными и композиционными колодками, то силу нажатия колодок на бандажи пересчитывают на один вид колодок (обычно на чугунные) с учетом равной эффективности тормозов. Так, расчетным силам нажатия чугунных тормозных колодок на ось цельнометаллических пассажирских вагонов различных масс 98, 88 и 78 кН (таблица 7.4) соответствуют расчетные силы нажатия композиционных колодок 44, 39 и 34 кН при примерно тех же значениях коэффициента нажатия. В зоне малых скоростей такие соотношения нажатий примерно одинаковые тормозные силы.

Например, для скорости 30 км/ч тормозная сила одной колесной пары с чугунными колодками соответствует расчетной силе нажатия $K_р = 98$ кН и расчетным коэффициентом трения чугунной колодки о колесо $\varphi_{кр} = 0{,}14$ (см. таб. 7.2) и равна:

Таблица 7.3

Локомотивы, вагоны электропоездов и дизель-поездов	Расчетная масса локомотива (вагона), т	Масса локомотива (вагона) в порожнем состоянии, т	Число осей локомотива (вагона)		Расчетные силы нажатия колодок на ось, кН	
			автотормозных	Ручного тормоза	Груженый режим	Порожний режим
1	2	3	4	5	6	7
Электровозы						
ВЛ80С, ВЛ80Т, ВЛ80Р, ВЛ82	192	186	8	4	137	59
ВЛ80К, ВЛ1М, ВЛ11 (две секции)	184	180	8	4	137	59
ВЛ85, ВЛ15	288	282	12	4	137	59
ВЛ65	144	140	6	4	137	59
ВЛ10	184	180	8	4	137	59
ВЛ10У, ВЛ82М	200	196	8	4	137	59
ВЛ23, ВЛ60 (всех индексов)	138	126	6	6	108	49
Пассажирские электровозы						
ЭП1, ЭП1М	144	140	6	4	137	59
ЧС7, ЧС8	172	168	8	2	-	-
ЧС2Т	128	128	6	2	-	-
ЧС2	120	119	6	2	-	-
ЧС4Т, ЧС4	126	125	6	2	-	-
на скоростном режиме	-	-	-	-	157	-
на скоростном режиме при v < 60 км/ч и пассажирском режиме	-	-	-	-	118	-
Электропоезда						
Головной вагон ЭР9Е, ЭР9М, ЭР9П, ЭР9	48	38	4	4	88	-
То же ЭР1, ЭР2	50	41	4	4	88	-
То же ЭР2Т, ЭР2Р	51,5	42,5	4	2	88	-
Моторный вагон ЭР1, ЭР2	64	52,5	4	4	98	-
То же ЭР9Е, ЭР9М	71	60	4	2	98	-
То же ЭР9, ЭР9П	71	60	4	4	98	-
То же ЭР2Р, ЭР2Т	70	58,5	4	2	98	-
Прицепной вагон ЭР9Е, ЭР9М, ЭР9П	48	37	4	4	88	-
То же ЭР1, ЭР2, ЭР9	50	39	4	4	88	-

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТЕХНИКУМ

Продолжение таблицы 7.3

Локомотивы, вагоны электропоездов и дизель-поездов	Расчетная масса локомотива (вагона), т	Масса локомотива (вагона) в порожнем состоянии, т	Число осей локомотива (вагона)		Расчетные силы нажатия колодок на ось, кН	
			автотормозных	Ручного тормоза	Груженый режим	Порожний режим
1	2	3	4	5	6	7
Тепловозы						
2ТЭ116, 2ТЭ10В, 2ТЭ10М, 2ТЭ10У, 2ТЭ10УТ	279	264	12	4	118	49
2ТЭ10Л, 2ТЭ10	260	254	12	4	98	49
ТЭ3	254	250	12	4	98	49
2М62, 2М62У	234	230	12	4	113	54
М62	117	114	6	2	113	54
ТЭП70, ТЕП70БС	131	127	6	6	118	49
ТЭП60	128	126	6	2	118	49
ТЭП10, ТЭП10Л	129	125	6	4	113	54
ТЭ7	254	250	12	4	113	54
ЧМЭ3	123	121	6	3	108	49
ТЭМ7, ТЭМ7А	180	173	8	2	88	39
Дизель-поезда						
Моторный вагон ДР1П, ДР1А, ДР1	68	56	4	1	98	-
Прицепной вагон ДР1А, ДР1П	54	36	4	1	78	-
То же ДР1	52	34	4	1	78	-

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТЕХНИКУМ

$B_т$ □1000□98□0,14 □13720 Н;

При композиционных колодках $К_р$ □ 44 кН, $□_{кр}$ □ 0,309 – $B_т$ □1000□44□0,309 □13600 Н. Однако при высоких скоростях тормозная сила композиционных колодок изза меньшей степени снижения коэффициента трения оказывается выше, чем у чугунных. Поэтому в соответствии с ПТР расчетные силы нажатия композиционных колодок пассажирских вагонов при скоростях движения до 120 км/ч принимают равными с чугунными (98, 88 и 78 кН). При скоростях движения от 120 до 140 км/ч их увеличивают на 25 %, а при скоростях от 140 до 160 км/ч – на 30 %.

Таблица 7.4

Тип вагона	Расчетная сила нажатия тормозных колодок $К_р$ на ось, кН при разных режимах	
	Пассажирском	Скоростном
Цельнометаллические пассажирские вагоны с массой тары:		
53 т и более	98	-
от 48 т до 53 т	88	-
от 42 т 48 т	78	-
Цельнометаллические пассажирские вагоны габарита РИЦ с тормозом КЕс	98	147
То же с тормозом ДАКО, Эрликон	78	118
Багажные цельнометаллические вагоны с односторонним нажатием	59	-
Остальные вагоны пассажирского парка	64	-

У грузовых вагонов коэффициент нажатия □ сохраняют примерно одинаковым, переводя тормоза при композиционных колодках с груженого на средний и со среднего на порожний режим. В расчетах же тормозные силы композиционных тормозных колодках условно принимают одинаковыми с чугунными колодками. Если рефрижераторные вагоны удовлетворяют специальным техническим условиям для скоростей движения до 120 км/ч, то расчетные силы нажатия композиционных тормозных колодок в пересчете на чугунные принимают 118 кН при среднем режиме и 83 кН на порожнем режиме.

Расчетные силы нажатия чугунных тормозных колодок для некоторых типов пассажирских вагонов приведены в таблице 7.4, а для грузовых вагонов при различных режимах – в таблице 7.5.

Таблица 7.5

Тип вагона	Расчетная сила нажатия тормозных колодок на ось $К_р$, кН при разных режимах		
	Груженном	Среднем	Порожнем

Грузовые вагоны, оборудованные чугунными тормозными колодками	69	49	34
Грузовые вагоны, оборудованные композиционными тормозными колодками (в пересчете на чугунные колодки)	84	69	34
Вагоны рефрижераторного подвижного состава с чугунными тормозными колодками	88	59	34

При известных расчетных нажатиях тормозных колодок на оси подвижного состава и расчетных коэффициентах трения колодок о колеса тормозную силу поезда (Н) определяют суммированием тормозных сил, развиваемых каждой колесной парой:

$$B_т = 1000 \sum K_р \varphi_{кр}. \quad (7.15)$$

В связи с тем, что $\varphi_{кр}$ не зависит от силы $K_р$, его можно вынести за знак суммы:

$$B_т = 1000 \varphi_{кр} \sum K_р. \quad (7.16)$$

Практически тормозную силу поезда для какой-либо скорости рассчитывают следующим образом: определяют по таблицам расчетную силу $K_р$ на ось для каждой группы однотипных единиц подвижного состава, умножают ее на число таких осей и суммируют, получая $\sum K_р$ поезда. Затем берут данные определяют по формулам значения $\varphi_{кр}$ и по формуле (7.16) рассчитывают тормозную силу $B_т$. В отличие от формулы (7.7) в этом методе $\sum K_р$ на $\varphi_{кр}$ умножают один раз, а не для каждой группы вагонов. Удельную тормозную силу, находят, поделив тормозную силу $B_т$ на вес поезда mg:

$$b_т = \frac{B_т}{mg} = 1000 \varphi_{кр} \frac{\sum K^р}{mg}. \quad (7.17)$$

Отношение суммарных сил расчетного нажатия колодок на колеса к весу поезда называют ***расчетным тормозным коэффициентом поезда:***

$$\varphi_р = \sum K_р / mg. \quad (7.18)$$

Тогда удельная тормозная сила, —

$$b_т = 1000 \varphi_{кр} \varphi_р. \quad (7.19)$$

Расчетный тормозной коэффициент характеризует степень обеспечения поезда тормозными средствами. Чем больше $\varphi_р$, тем больший тормозной эффект создадут тормозные силы, тем быстрее можно остановить поезд. Чтобы

обеспечить безопасность движения поездов, наименьшее значение расчетного тормозного коэффициента поезда устанавливает РЖД. Так, наименьшее значение расчетного тормозного коэффициента при пневматических тормозах на чугунных и композиционных колодках 0,33 (или 33 тс на каждые 100 тс веса поезда) установлено для:

- ♦ груженых грузовых, порожних грузовых поездов с числом осей от 400 до 500, рефрежираторных поездов при скоростях движения до 90 км/ч;
- ♦ соединенного состава грузового поезда массой до 12000 т. с объединенной тормозной магистралью и локомотивами в голове и середине поезда при скоростях движения до 65 км/ч, а также с необъединенной магистралью и скоростями движения до 60 км/ч;
- ♦ состава грузового поезда массой до 12000 т с локомотивами в голове и хвосте поезда с включением их в тормозную магистраль для скоростей движения до 75 км/ч;
- ♦ состава грузового поезда массой до 16000 т с объединенной тормозной магистралью и локомотивами в голове и последней трети поезда для скоростей движения до 70 км/ч.

Состав из порожних грузовых вагонов до 400 осей при скоростях движения до 100 км/ч, а также рефрижераторные поезда при v = 90...100 км/ч на пневматических тормозах и композиционных колодках должны иметь φ_p не менее 0,55.

В пассажирских поездах, движущихся со скоростями до 120 км/ч, с электропневматическими тормозами φ_p должен быть не менее 0,6; при скоростях движения 120... 130 км/ч – не менее 0,68; при v = 130...140 км/ч – 0,78; при v = =140...160 км/ч – 0,8 (при композиционных колодках). В рефрижераторных поездах при скоростях движения от 100 до 120 км/ч на пневматических тормозах и композиционных тормозных колодках φ_p установлен не менее 0,6. Эти нормативы действуют на спусках не круче 10 ‰. В случае движения по более крутым уклонам скорость движения снижают в соответствии с инструкцией по эксплуатации тормозов подвижного состава.

Массы локомотивов, электро- и дизель-поездов (расчетные и в порожнем состоянии) и число тормозных осей были приведены в табл. 7.3. В соответствии с ПТР при работе грузового поезда на участках со спусками до 20 ‰ тормозную силу локомотива и его массу в расчетах не учитывают и расчетный тормозной коэффициент —

$$\varphi_p = \sum K_p / (m_c g). \qquad (7.20)$$

В остальных случаях тормозную силу поезда рассчитывают с учетом массы и тормозной силы локомотива.

Полное значение расчетного тормозного коэффициента и соответствующая ему тормозная сила реализуются только при экстренном торможении, когда поезд нужно остановить как можно быстрее, например, при возникшем на пути препятствии для движения. В расчетах торможения для остановки на станциях и раздельных пунктах, предусмотренных графиком движения поездов, а также в случае снижения скорости перед заранее известным местом используют служебное торможение с расчетным тормозным коэффициентом для грузовых поездов – 0,5θ_p, а для пассажирских, электро- и дизель-поездов – 0,6 θ_p (удельная тормозная сила составит соответственно 0,5 $b_т$ и 0,6 $b_т$). В случае применения полного служебного торможения принимают 0,8θ_p.

Зависимости 1 – 3 на рис. 7.4 рассчитаны по формуле (7.19) при расчетном тормозном коэффициенте θ_p = 0,33. Для удобства последующих графических построений с использованием удельной тормозной силы на графике скорость отложена по оси ординат, а удельные тормозные силы – по оси абсцисс.

Снижение тормозной силы с увеличением скорости приводит к механической неустойчивости системы, при которой нельзя получить установившуюся скорость движения по затяжному спуску.

Если тормозная сила в сумме с сопротивлением движения поезда, действующая против движения, окажется равной составляющей веса поезда, направленной по движению, то будет установившаяся скорость движения. Однако при малейшем снижении скорости тормозная сила возрастает и вместе с силами основного сопротивления движению превысит силу, действующую по направлению движения, что приведет к дальнейшему снижению скорости и т.д. до остановки. Аналогично случайное увеличение скорости приведет к ее возрастанию. Поэтому машинист вынужден увеличивать тормозную силу при достижении наибольшей допустимой скорости движения и уменьшать или совсем отпускать тормоза при уменьшении скорости на определенное значение (на 10... 15 км/ч).

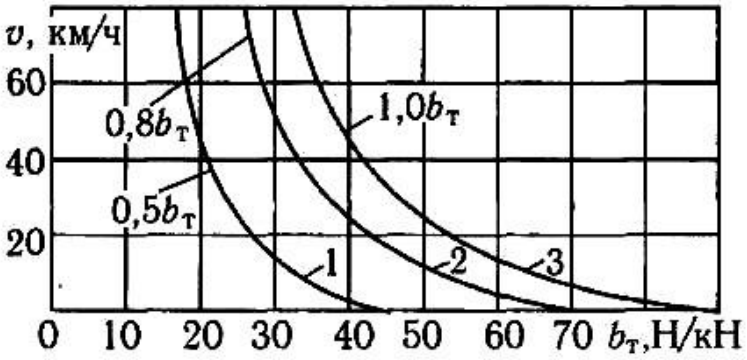


Рис. 7.4. Зависимость удельной тормозной силы грузового поезда от скорости при служебном (1), полном служебном (2) и экстренном (3) торможениях

Скорость движения в функции пути напоминает пилообразную линию.

Для ***механической устойчивости системы*** необходимо, чтобы тормозная сила вместе с силами основного сопротивления движению возрастала с увеличением скорости движения. В этом случае скорость движения по спуску будет постоянна.

7.4. Действия тормозных сил в длинносоставных поездах повышенной массы

Срабатывание пневматических автоматических тормозов в длинносоставных поездах вызывает более высокие продольные динамические силы по сравнению с поездами обычной длины. Поэтому к режимам работы тормозного оборудования и умению машинистов управлять им предъявляются повышенные требования.

Тормозная магистраль должна иметь более высокую плотность, утечки выше нормативных должны устраняться после опробования тормозов до отправления поезда. Повышенные утечки воздуха могут снизить управляемость тормозами, привести к неотпуску тормозов в хвостовой части поезда и возникновению реакций и ударов в составе.

Поворот ручки крана машиниста в тормозное положение вызывает снижение давления не сразу по всей тормозной магистрали. В головной части состава давление снижается раньше, чем в хвостовой. Поэтому действие тормозов в хвостовой части начинается при частично заторможенных вагонах головной части. Если поезд был в растянутом состоянии и в автосцепных устройствах были зазоры, торможение головных вагонов вызовет набегание вагонов средней и хвостовой частей состава в пределах этих зазоров с учетом сжатия поглощающих аппаратов автосцепок.

В последующий период сжатые поглощающие аппараты приводят к оттяжкам вагонов хвостовой части. Чтобы уменьшить возникающие продольные усилия, машинист должен перед включением автоматических тормозов плавно сжать

состав с помощью вспомогательного тормоза, медленно увеличивая давление в тормозных цилиндрах локомотива или применив электрический тормоз локомотива.

В соединенных поездах (при расположении локомотивов в голове и внутри состава или хвосте поезда) с объединенной тормозной магистралью используют систему синхронизации управления автотормозами всех локомотивов. Управляет тормозами машинист головного локомотива. При отсутствии системы синхронизации указания о торможении и отпуске автотормозов машинист головного локомотива передает по радиосвязи. Машинисты всех локомотивов поезда контролируют каждое торможение по срабатыванию сигнализатора разрыва тормозной магистрали с датчиком 418 (кратковременному загоранию сигнальной лампы "ТМ").

Для снижения продольных реакций управлять тормозами такого поезда машинисты всех локомотивов должны по возможности одновременно. Их несогласованные действия, например, торможение на одном локомотиве и отпуск на другом, вызовут продольные удары в поезде и могут привести к обрыву поезда.

7.5. Общие сведения об электрическом торможении

Используя принцип обратимости электрических машин, тяговый электродвигатель можно перевести в генераторный режим и преобразовывать механическую энергию поезда в электрическую. Обмотка якоря генератора вращается в магнитном поле полюсов, в ней наводится ЭДС, и, если замкнуть электрическую цепь якоря на нагрузку, по ней пойдет ток. Электромагнитные силы взаимодействия этих проводников с магнитным потоком препятствуют вращению якоря, создавая тормозной момент $M_в$, который передается через зубчатую передачу на колесную пару ($M_т$). Момент $M_т$ на рис. 7.5 показан в виде пары сил B_1B_2, приложенных в центре колесной пары и в точках касания колес о рельсы.

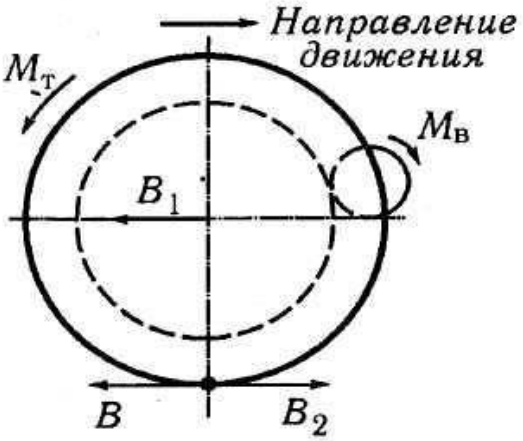


Рис. 7.5. Образование тормозной силы при электрическом торможении

При сцеплении колес с рельсами внутренняя относительно поезда сила B_2 вызывает реакцию со стороны рельсов B, которая является внешней силой, действующей против движения поезда. Ее называют ***тормозной силой электрического торможения.*** Из рис. 7.5 видно, что процесс образования

тормозной силы аналогичен образованию силы тяги (см. рис. 1.1), но моменты и силы действуют в противоположном направлении.

Электрическая энергия от тяговых машин может быть направлена в тормозной реостат или резистор, установленный на локомотиве, и превращена в тепловую энергию, которая рассеивается в окружающее пространство. Такое торможение называют ***реостатным.*** На электроподвижном составе можно использовать ***рекуперативное торможение,*** при котором электрическая энергия от тяговых машин передается в контактную сеть для использования потребителями.

Применение электрического торможения позволяет снизить расход тормозных колодок, уменьшить износ колесных пар и повысить безопасность движения поездов, так как при его использовании механические тормоза находятся в резерве в полной готовности к работе. Рекуперативное торможение позволяет также получить экономию электрической энергии на тягу поезда.

Кроме того, рекуперация энергии в системе постоянного тока улучшает условия электроснабжения участка, способствуя повышению напряжения в контактной сети, вследствие чего повышаются скорости движения поездов, следующих по подъему. Характеристики электрического торможения более благоприятны для поддержания постоянной скорости на спуске по сравнению с механическими тормозами. Реостатное торможение используют на электроподвижном составе, оно может быть применено также на тепловозах с электрической передачей.

Так же, как и в режиме тяги, к системам электрического торможения предъявляются требования электрической устойчивости, механической устойчивости, равномерного распределения нагрузок между параллельно включенными тяговыми электродвигателями. А системы рекуперативного торможения кроме того должны допускать возможно меньшие отклонения отдаваемых в контактную сеть токов при колебаниях напряжения в сети.

7.6. Характеристики реостатного торможения

Для наведения ЭДС в режиме реостатного торможения применяют самовозбуждение тяговых машин последовательного возбуждения или независимое возбуждение.

При самовозбуждении ЭДС наводится за счет остаточного магнитного потока, сохраняющегося в ней после режима тяги. На рис. 7.6, а показана схема включения тягового электродвигателя в режиме тяги. Ток $I_д$ проходит по обмотке возбуждения сверху вниз. После выключения тока магнитный поток не уменьшается до нуля, остается небольшой, так называемый остаточный, магнитный поток. При вращении якоря в этом остаточном магнитном потоке в

обмотке якоря наводится ЭДС E_o, небольшая по значению, так как мал магнитный поток.

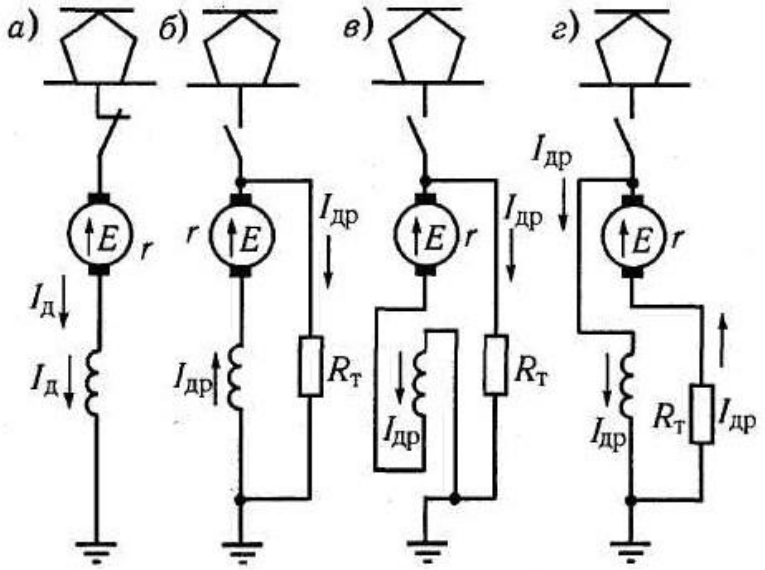


Рис. 7.6. Принципиальные схемы включения тягового электродвигателя: а — в тяговом режиме; б — при замыкании на реостат без переключения обмоток; в — в режиме реостатного торможения с переключением концов обмотки возбуждения; г — то же с переключением концов обмотки якоря

Если замкнуть цепь тяговой машины на реостат RT (рис. 7.6, б), то в начальный момент под действием ЭДС E_o по ней потечет ток $I_{др}$, который по обмотке возбуждения пройдет снизу вверх, т.е. в обратном направлении по сравнению с током $I_д$. Это приведет к размагничиванию тяговой машины, снижению ЭДС до нуля и отсутствию тормозного эффекта.

Чтобы ток по обмотке возбуждения проходил в том же направлении, что и в режиме тяги, необходимо пересоединить или обмотку возбуждения (рис. 7.6, в), или обмотку якоря (рис. 7.6, г). В обоих случаях ток в обмотке возбуждения будет совпадать с током $I_д$. После переключения одной из указанных обмоток (чаще обмотки возбуждения) и замыкания цепи на реостат по ней пройдет ток $I_{др}$. Этот ток может вызвать увеличение магнитодвижущей силы и магнитного потока тяговой машины, а следовательно, и ее ЭДС. При более высокой ЭДС по цепи пойдет больший ток, который вызовет новое увеличение магнитного потока и ЭДС, а следовательно, и тока.

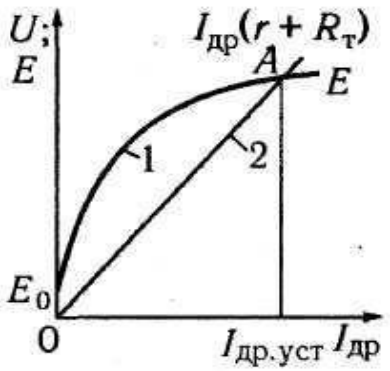


Рис. 7.7. Изменение ЭДС (E) при самовозбуждении и падение напряжения в цепи тягового электродвигателя $|I_{др}(r + R_т)|$ с увеличением тока реостатного торможения

Подобное возрастание магнитного потока называют процессом самовозбуждения тяговой

машины. Изменение ЭДС машины в зависимости от тока реостатного торможения $I_{др}$ происходит по кривой **1** (рис. 7.7), так как E = CΦv, и при постоянной скорости ЭДС пропорциональна магнитному потоку, изменяющемуся по закону магнитной характеристики.

При электрическом торможении необходимо знать токи $I_{др}$ и тормозную силу локомотива $B_{тр}$ в установившихся режимах на различных скоростях движения.

Кривые $I_{др}(v)$ называют ***токовыми характеристиками реостатного торможения,*** а кривые $B_{тр}(v)$ – ***тормозными характеристиками.***

Токовые характеристики рассчитывают, исходя из равенства ЭДС и падений напряжения в контуре тока $I_{др}$. Из (рис. 7.6, в, г) видно, что ЭДС E при установившемся режиме уравновешивается суммой внутреннего падения напряжения в тяговой машине и падения напряжения на тормозном реостате:

$$E = I_{др}(r + R_т), \qquad (7.21)$$

где E – ЭДС тяговой машины, равная CΦv; r – сопротивление обмоток тяговой машины; $R_т$ – сопротивление тормозного реостата, приведенное к одной тяговой машине.

На рис. 7.7 показано изменение падения напряжения в цепи $I_{др}(r + R_т)$, (прямая **2**). Точка пересечения **A** соответствует равенству (7.21) и является точкой установившегося режима.

Обладает ли тяговая машина электрической устойчивостью? Если ток $I_{др}$ уменьшится от установившегося значения, то ЭДС (кривая **1**) окажется больше падения напряжения $I_{др}(r + R_т)$, (кривая **2**), что приведет к увеличению тока. В том случае, когда ток $I_{др}$ возрастает, ЭДС окажется ниже падения напряжения и ток уменьшается до установившегося значения. Таким образом система реостатного торможения при последовательном возбуждении тяговых электродвигателей обладает электрической устойчивостью и может использоваться в практике работы тягового подвижного состава.

В случае независимого возбуждения тяговых электродвигателей система реостатного торможения также обладает электрической устойчивостью. В случае снижения тока $I_{др}$ от установившегося режима магнитный поток, а, следовательно, и ЭДС электродвигателя несколько возрастает за счет влияния реакции якоря. Падение напряжения на тормозном реостате и в обмотках цепи якоря при этом уменьшится, что приведет к увеличению тока до установившегося значения.

Из равенства (7.21) скорость, равна:

$$I^{др}(r + R^{т})$$

$$v = \frac{\quad}{C\Phi}. \qquad (7.22)$$

С увеличением тока $I_{др}$ и неизменном значении $R_т$ возрастает магнитный поток. При малых токах, когда поток в ненасыщенной зоне изменяется пропорционально току, скорость остается постоянной. С увеличением тока из-за насыщения магнитной системы знаменатель уравнения (7.22) будет возрастать менее интенсивно по сравнению с числителем и скорость будет повышаться. Соотношение между током и скоростью изменяется с изменением сопротивления тормозного реостата $R_т$.

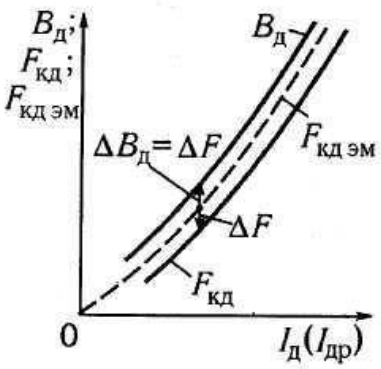


Рис. 7.8. Зависимость силы тяги, электромагнитной силы тяги и тормозной силы от тока

На электроподвижном составе в цепях реостатного торможения может быть **a** параллельных и **n** последовательно включенных тяговых машин. Тогда:

$$v = \frac{I_{др}(r + R_т)}{C\Phi}\cdot\frac{n}{a}. \qquad (7.23)$$

где $R_Т$ – сопротивление реостата.

Как видно из рис. 7.6, при реостатном торможении направление тока изменилось по сравнению с режимом тяги только в обмотках якоря. Направление тока в обмотке возбуждения, а следовательно, и магнитного потока сохранилось. При этом вращающий момент будет направлен в сторону, противоположную направлению вращения электродвигателя, создавая тормозной момент и тормозную силу. Поскольку природа возникновения электромагнитных сил тяги и тормозной силы одинакова, тормозную силу, развиваемую одной тяговой машиной в ньютонах определяют по формуле, аналогичной выражению (2.27):

$$B_д = 3{,}6C\Phi I_{др} - \Delta B_д, \qquad (7.24)$$

где $\Delta B_д$ – сила, вызванная механическими и магнитными потерями в тяговой машине и потерями в передаче, действующая, как и в режиме тяги, против движения. Сила $\Delta B_д$ невелика и ее можно вычислить по формуле: $\Delta B_д = 3{,}6\frac{\Delta P_{мех} + \Delta P_{магн} + \Delta P_п}{v}$. (7 25)

Значения $\Delta P_{мех}$ и $\Delta P_{магн}$ определяют по расчетным данным тягового электродвигателя при каждой скорости и токе возбуждения или по

экспериментальным данным, получаемым при испытаниях на стенде. Потери в передаче $\Delta P_п$ рассчитывают аналогично определению потерь в тяговом режиме.

Пренебрегая разницей в скоростях движения при одних и тех же токах $I_{др}$ и $I_д$ тяговых машин с последовательным возбуждением, можно приравнять эти потери при реостатном торможении потерям в режиме тяги. Тогда значения $\Delta B_д = \Delta F$ можно определить из электротяговых характеристик.

На рис. 7.8 показана электротяговая характеристика $F_{кд}$ $I_д$: штриховой линией нанесена электромагнитная сила тяги $F_{кр\ эм}(I_д)$, рассчитанная по формуле $F_{кд\ эм} = = 3{,}6\ СФI_Д$. Разность сил $F_{кд\ эм}$ и $F_{кд}$ есть ΔF. Если к ординатам кривой электромагнитной силы тяги прибавить значение $\Delta B_д = \Delta F$, то получим тормозную силу. Как видно на рис. 7,8, ее можно также определить из выражения: $B_д = F_{кд} + 2\Delta F$.

Если на локомотиве находится $n_д$ тяговых машин, то тормозная сила, равна:

$$B_{тр} = n_д B_д = n_д 3{,}6 СФI_{др} B_д . \qquad (7.26)$$

Зная зависимость между скоростью и током $I_{др}$ [формула (7.23)] и связь между тормозной силой локомотива и током [формулы (7.24) и (7.26)], можно найти тормозные характеристики – зависимости тормозной силы локомотива от скорости (аналогично тому, как это делалось при расчете тяговых характеристик). На рис. 7.9, а приведены токовые характеристики, а на рис. 7.9, б – тормозные при реостатном торможении с самовозбуждением тяговых машин. Каждой характеристике соответствует определенное сопротивление тормозного реостата $R_т$. Изменяя сопротивление реостата, регулируют ток реостатного торможения и тормозную силу.

На токовые и тормозные характеристики нанесены штриховые ограничивающие линии: по наибольшей скорости движения **– 4,** по сцеплению колес с рельсами **– 2** или по наибольшему току **– 1,** а также по допустимому напряжению на тяговой машине – **3.** Ограничения, установленные линиями **1** и **4,** аналогичны соответствующим ограничениям в режиме тяги, ограничение по сцеплению колес с рельсами при торможении определяют так же, как и в режиме тяги, но коэффициент сцепления берут ниже, чем при тяге, создавая запас по сцеплению. Для электровозов ВЛ80С и ВЛ80Т коэффициент сцепления $\psi_т$ рассчитывают в соответствии с ПТР по формуле:

$$\beta_т = 0{,}09 - \frac{}{56 - v} - 0{,}00005v. \qquad (7.27)$$

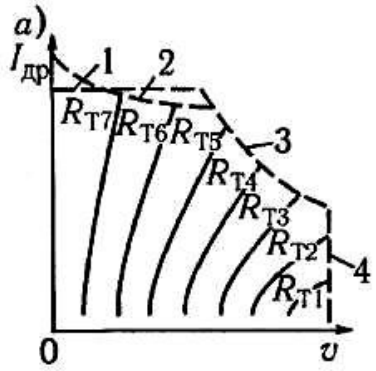


Рис. 7.9 а. Токовые характеристики реостатного торможения с самовозбуждением тяговых электродвигателей

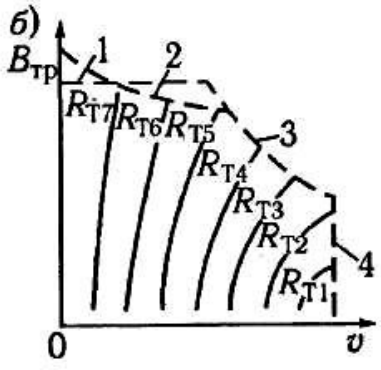


Рис. 7.9 б. Тормозные характеристики реостатного торможения с самовозбуждением тяговых электродвигателей

11

Ограничение характеристик по допускаемому напряжению связано с появлением больших ЭДС при работе с высокими скоростями и большими токами $I_{др}$, а следовательно, и большими магнитными потоками (при последовательном возбуждении). При этом Е, а значит, и напряжение на тяговых машинах оказывается значительно выше допустимого, что может привести к появлению кругового огня по коллектору. В режиме тяги этого ограничения нет, так как сама скоростная характеристика обеспечивает снижение скорости при увеличении тока. Допустимое напряжение на тяговых электродвигателях устанавливает завод-изготовитель. Оно обычно составляет 1,20...1,35 от номинального напряжения.

Обладает ли такая система механической устойчивостью? Когда поезд движется в режиме реостатного торможения на затяжном спуске, то по направлению движения на него действует составляющая веса поезда mgi (см. рис.6.6), а против движения – тормозная сила $B_{тр}$ и силы основного сопротивления движению (под током) W_o

При установившейся скорости $v_{уст}$: $mgi = B_{тр} + Wo$.

На рис.7.10 этому равенству соответствует точка **А.** Если скорость оказалась выше $v_{уст}$, то силы $B_{тр} + W_o$ окажутся больше чем mgi, что приведет к снижению скорости до $v_{уст}$. В случае, когда скорость отклонится от $v_{уст}$ в меньшую сторону, сила mgi окажется выше, чем $B_{тр} + W_o$, и скорость возрастет до $v_{уст}$. Поскольку такая система стремится к установившейся скорости, она обладает механической устойчивостью.

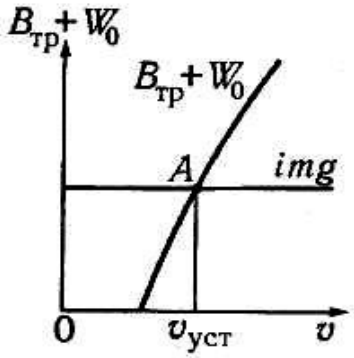


Рис. 7.10 Проверка характеристик на механическую устойчивость

Таким образом, для механической устойчивости в тормозном режиме необходимо иметь тормозную силу в сумме с силами основного сопротивления движению, увеличивающуюся с возрастанием скорости движения.

Систему реостатного торможения при самовозбуждении обычно применяют на ЭПС постоянного тока, используя ступени пускового реостата в качестве тормозных ступеней. Преимуществом реостатного торможения при самовозбуждении тяговых машин является независимость от напряжения в контактной сети. Однако эта система имеет и недостаток: процесс самовозбуждения тяговых машин идет медленно – занимает 1 ÷ 2 с, и на это время задерживается получение тормозного эффекта.

Иногда, чтобы ускорить возникновение тормозной силы, обмотки возбуждения тяговых машин кратковременно подключают под напряжение аккумуляторной батареи, а после создания магнитного потока переводят на самовозбуждение или на возбуждение от напряжения, снимаемого с части тормозного реостата. Такая система, примененная на электровозах ЧС2Т, позволяет быстро получить тормозной эффект независимо от напряжения в контактной сети.

Тормозную силу можно регулировать, воздействуя на магнитный поток. Так на вагонах метрополитена типов 81-717 и 81-714 применена система реостатного торможения с самовозбуждением. В зоне высоких скоростей до 50...65 км/ч тормозную силу регулируют изменением магнитного потока с помощью специального импульсного регулятора. Этот регулятор изменяет коэффициент регулирования возбуждения от 48 до 100 %. В зоне меньших скоростей регулирование осуществляется уменьшением сопротивления тормозного реостата. При скорости 12...15 км/ч включаются механические тормоза.

Если на локомотиве есть источник энергии для питания обмоток возбуждения тяговых машин, то применяют независимое возбуждение. Такая схема использована на электровозах переменного тока ВЛ80С, ВЛ80Т и ЧС4Т. На рис. 7.11 приведена принципиальная схема реостатного торможения двух тяговых машин **М1** и **М2,** обмотки возбуждения которых соединены последовательно и получают питание от тиристорного преобразователя **ТП,** подключенного к нескольким секциям вторичной обмотки тягового трансформатора.

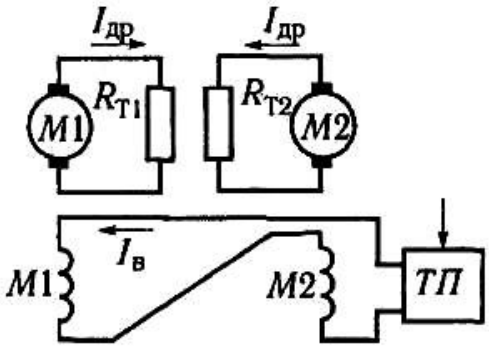


Рис. 7.11. Принципиальная схема реостатного торможения при независимом возбуждении тяговых электродвигателей

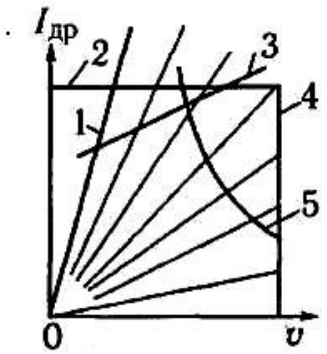


Рис. 7.12. Токовые характеристики реостатного торможения при независимом возбуждении тяговых электродвигателей

Обмотка якоря каждой тяговой машины замкнута на свой тормозной реостат или резистор ($R_{т1}$ и $R_{т2}$), сопротивление которых не изменяется. Иногда используют реостат с двумя ступенями сопротивления (электровозы ВЛ80Т последних выпусков и ВЛ80С). Регулируют ток и тормозную силу, изменяя ток возбуждения $I_в$. Токовые характеристики рассчитывают по формуле (7.22) с исключением из значения r сопротивления обмотки возбуждения тяговой машины. Если ток возбуждения остается неизменным, то магнитный поток изменяется незначительно (только под действием реакции якоря) и ток нарастает почти пропорционально скорости. На рис. 7.12 приведены токовые характеристики реостатного торможения при независимом возбуждении.

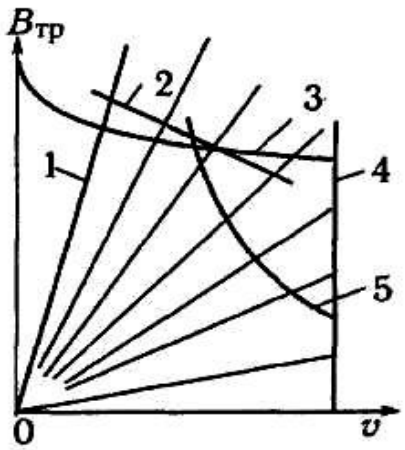


Рис. 7.13. Тормозные характеристики реостатного торможения при независимом возбуждении тяговых электродвигателей

Тормозную силу локомотива определяют по формуле (7.26). На рис. 7.13 приведены тормозные характеристики $B_{тр}(v)$, каждая из которых соответствует определенному току возбуждения $I_в$. На токовые и тормозные характеристики (см. рис. 7.12 и 7.13) наносят ограничивающие линии наибольшей допустимой скорости **– 4,** по сцеплению колес с рельсами **– 3,** по току коммутации тяговых машин **– 2.** В зоне малых скоростей ток $I_{др}$ и тормозная сила $B_{тр}$ ограничиваются наибольшим током возбуждения $I_в$ (линия **1**). В зоне высоких скоростей, больших токов $I_{др}$ и тормозных сил действуют ограничения по допустимому току тормозного реостата (резистора) или по соотношению токов якоря $I_{др}$ и возбуждения $I_в$. Это ограничение вызвано тем, что ток возбуждения здесь оказывается значительно меньше тока якоря. А при

чрезмерном ослаблении возбуждения может появиться круговой огонь по коллектору тяговых машин.

В действительности токовые и тормозные характеристики имеют обычно несколько измененный вид из-за усложнения схем и воздействия тока якоря на ток возбуждения или введения автоматического регулирования тормозной силы и скорости. На каждой секции электровозов ВЛ80С и ВЛ80Т применена схема, аналогичная приведенной на рис. 7.11, с четырьмя тяговыми машинами на каждой секции. Обмотки возбуждения восьми тяговых машин соединены последовательно и питаются от части вторичной обмотки тягового трансформатора через тиристорный преобразователь. С его помощью регулируется напряжение на обмотках возбуждения, а следовательно, и ток $I_в$.

Токовые и тормозные характеристики электровозов ВЛ80Т (последних выпусков) и ВЛ80С приведены на (рис. 7.14 а и б) при различных токах возбуждения.

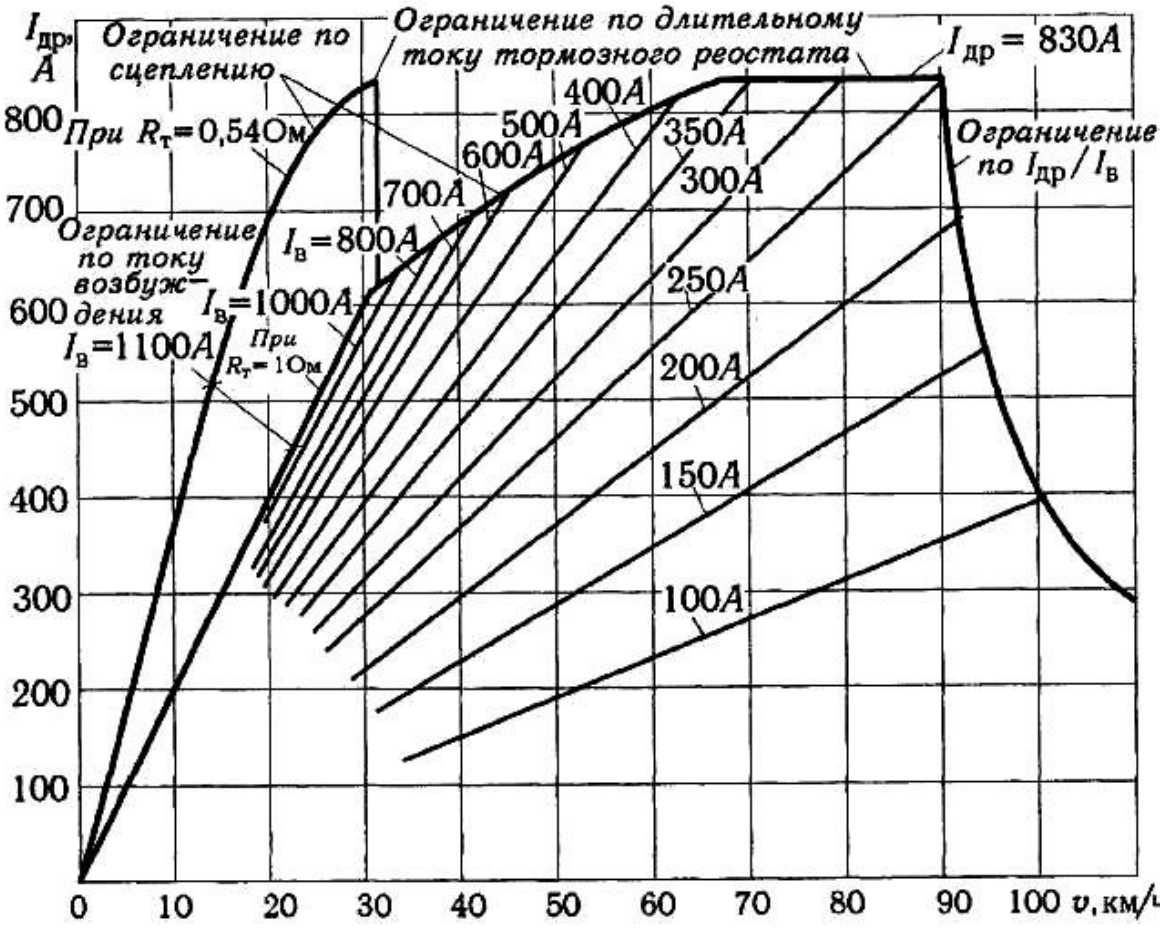


Рис. 7.14 а. Токовые характеристики электровозов ВЛ80С и ВЛ80Т

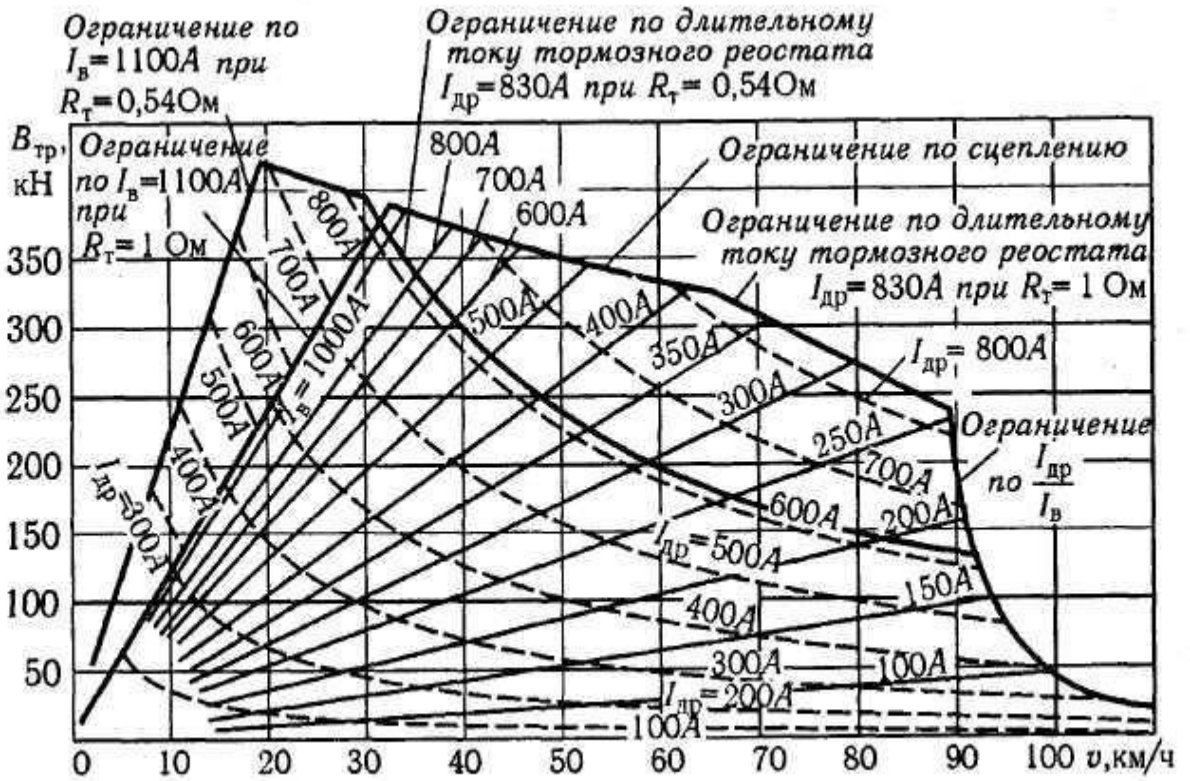


Рис. 7.14 б. Тормозные характеристики электровозов ВЛ80^С и ВЛ80^Т

Как видно из характеристик, они обладают электрической и механической устойчивостью. На эти характеристики нанесены ограничивающие линии по току возбуждения 1000 А, по сцеплению колес с рельсами, длительному току тормозного реостата $I_{др}$ = 830 А, по потенциальным условиям на коллекторах тяговых машин (по соотношению токов якоря и возбуждения $I_{др}/I_в$) и по максимальной скорости v_{max} 110 км/ч. На этих электровозах для расширения зоны малых скоростей, в которой могут быть реализованы большие тормозные силы, реостат выполнен с двумя ступенями сопротивлений. Кроме реостата сопротивлением 1 Ом предусмотрена возможность использования его части сопротивлением 0,54 Ом в зоне малых скоростей движения.

Кроме того, для упрощения управления реостатным тормозом на них применена система автоматического регулирования, позволяющая двигаться поезду по спуску с постоянной скоростью, которую машинист устанавливает с помощью специальной рукоятки. При этом тормозная сила автоматически изменяется в зависимости от уклона и сопротивления движению. Если на крутом спуске скорость будет возрастать, система автоматически создаст больший ток возбуждения $I_в$ и тормозную силу, а при снижении уменьшит ее, поддерживая заданную скорость движения. По желанию машинист может установить необходимую примерно постоянную тормозную силу, которая автоматически

поддерживается при изменении скорости движения. Этот режим удобно применять при торможении для снижения скорости.

На рис. 7.15 приведены тормозные характеристики электровоза ВЛ80Т, оборудованного усовершенствованным блоком управления реостатным тормозом БУРТ-001М в режиме снижения скорости при выбранных машинистом значениях тормозных сил (кривые 1 – 6). Эти кривые – условные, на практике машинист может задать любые значения сил тяги.

Рис. 7.15. Тормозные характеристики электровозов ВЛ80Т с блоком управления БУРТ-001М

7.7. Характеристики рекуперативного торможения

Рекуперацию энергии широко используют для поддержания постоянной скорости на затяжных спусках, а также снижения скорости движения. В зависимости от крутизны уклонов и их протяженности на линиях с горным профилем расход энергии на тягу снижается на 15...25 %, а на участках с холмистым профилем — на 10... 15 %. На электрифицированных дорогах нашей страны ежегодно возвращается в контактную сеть примерно 3 % потребляемой энергии. При этом экономится значительное число тормозных колодок.

На линиях постоянного тока рекуперируемую энергию, отдаваемую в контактную сеть, чаще всего использует электроподвижной состав, работающий в этот момент в режиме тяги. При отсутствии потребителей энергии ток и тормозная сила будут равны нулю и рекуперативное торможение невозможно. Чтобы обеспечить надежный тормозной режим при отсутствии потребителей энергии, питающихся от контактной сети, или при недостаточной их мощности, так называемую избыточную энергию рекуперации можно передать в энергосистему, где всегда есть потребители. Для этого на тяговых подстанциях постоянного тока устанавливают инверторы, преобразующие постоянный ток в переменный.

При густом движении поездов основную часть рекуперируемой энергии потребляют другие поезда, и избыточная энергия невелика. Она обычно

появляется на двухпутных участках при сбое движения поездов, идущих по подъему навстречу рекуперируемым электровозам или электропоездам. В этом случае избыточная энергия может быть погашена в специальных балластных установках – реостатах, установленных на тяговых подстанциях и перегонах.

Основным условием для получения рекуперативного торможения является превышение ЭДС электрической машины над подведенным напряжением E > U. В этом случае ток, а следовательно, и электрическая энергия будут направлены от тяговой машины в сеть.

Требования, предъявляемые к системам рекуперативного торможения, не отличаются от рассмотренных в предыдущем разделе, но добавляются возможно меньшие изменения токов и тормозных сил при колебаниях напряжения в контактной сети.

Рассмотрим требования электрической устойчивости рекуперативного торможения при тяговых электродвигателях с различными системами возбуждения
(рис. 7.16).

Из уравнения установившегося режима получим:

$$U = E + I_{др}r.$$

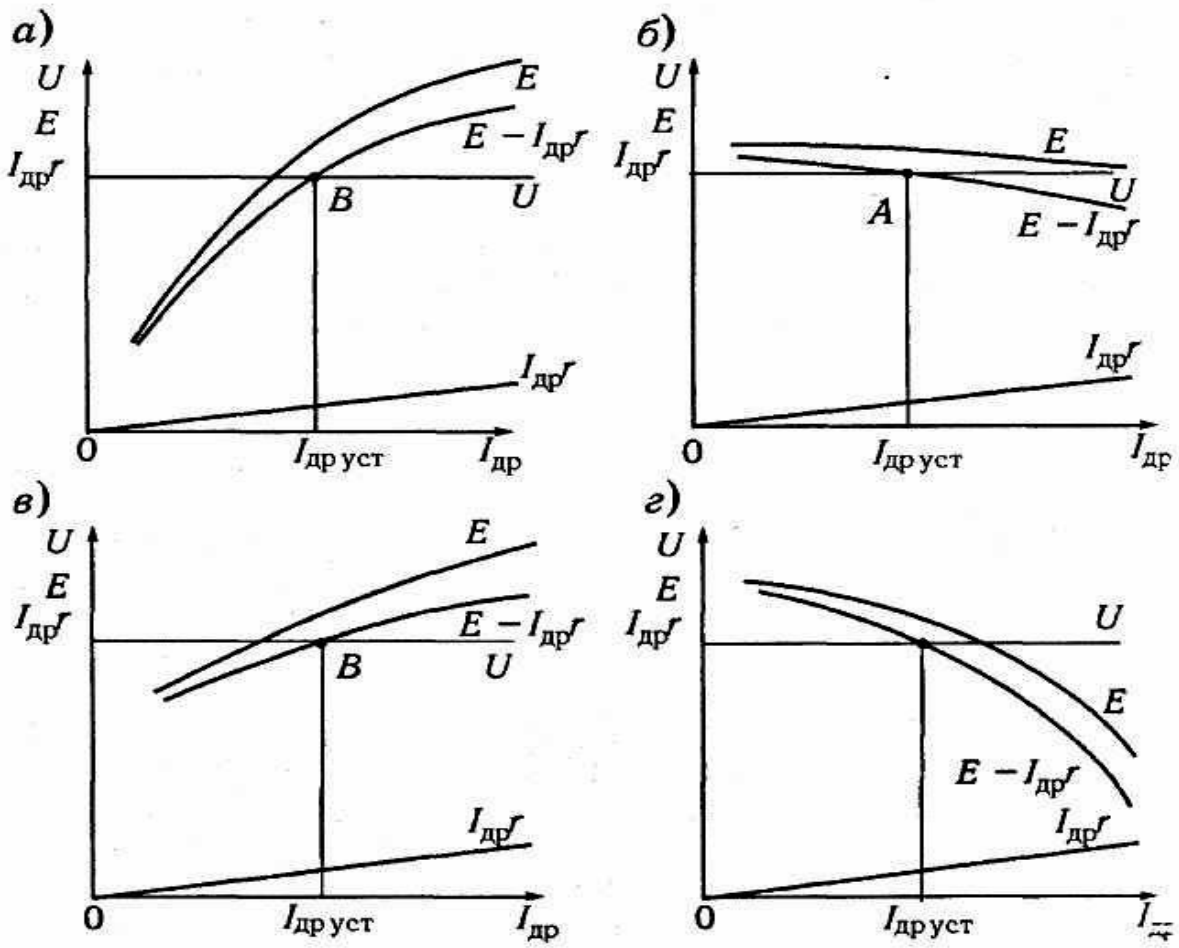


Рис. 7.16. Проверка электрической устойчивости системы рекуперативного торможения

В случае увеличения тока $I_{др}$ необходимо, чтобы E □$I_{др}$r электродвигателя снижалась. На рис. 7.16, а показаны графики U, $I_{др}$ и E в функции тока $I_{др}$ электродвигателя последовательного возбуждения. У него E при неизменной скорости пропорциональна магнитному потоку и возрастает с увеличением тока $I_{др}$. Напряжение U остается неизменным. В нижней части показано изменение падения напряжения $I_{др}$r, которое возрастает с увеличением тока, а выше – кривая E □$I_{др}$r .

Точка пересечения этой кривой с линией напряжения 1 (точка **В**) соответствует установившемуся значению $I_{друст}$. Будет ли в этой точке соблюдено требование электрической устойчивости. Если ток отклонится от установившегося значения в сторону увеличения, то оказывается что E □$I_{др}$r возрастает, что приведет к новому увеличению тока $I_{др}$. В случае снижения тока от значения $I_{др\ уст}$ E □$I_{др}$r окажется меньше напряжения U и ток будет снижаться. Таким образом, стремление системы к установившемуся току нет. Следовательно, тяговый электродвигатель последовательного возбуждения в режиме рекуперативного торможения не

обладает электрической устойчивостью и не может быть использован как генератор, работающий на сеть. Хотя, как следует из предыдущего раздела, устойчиво работает в режиме реостатного торможения.

Не обладает электрической устойчивостью в режиме рекуперации и электродвигатель смешанного возбуждения при согласном включении обмоток параллельного и последовательного возбуждения (рис. 7.16 в).

Требованию электрической устойчивости отвечают характеристики тяговых электродвигателей параллельного или независимого (рис.7.16 б) и смешанного возбуждения при встречном включении параллельной и последовательной обмоток возбуждения (рис.7.16 г). Здесь снижение тока $I_{др}$ от установившегося значения $I_{др\ уст}$ приводит к увеличению E $\square I_{др}r$ над напряжением U, что вызывает увеличение тока до $I_{др\ уст}$. Если ток $I_{др}$ отклонился от установившегося значения в большую сторону, величина E $\square I_{др}r$ окажется меньше U и ток снизится до $I_{др\ уст}$.

Зависимость E $\square I_{др}r$, т.е. напряжения на тяговой машине, от тока рекуперации называется ***внешней характеристикой.*** Требованиям электрической устойчивости удовлетворяют системы рекуперативного торможения, у которых внешняя характеристика тяговой машины снижается с увеличением тока. Для получения электрически устойчивой системы рекуперативного торможения тяговые машины электроподвижного состава переводят на независимое возбуждение с питанием обмоток возбуждения от специального вращающегося или статического преобразователя. Однако при независимом возбуждении тяговые машины имеют жесткие характеристики, при которых так же как и в тяговом режиме, получается большая неравномерность в нагрузках машин и большие изменения нагрузок при колебаниях напряжения в сети. Чтобы обеспечить мягкие характеристики, применяют специальные схемы.

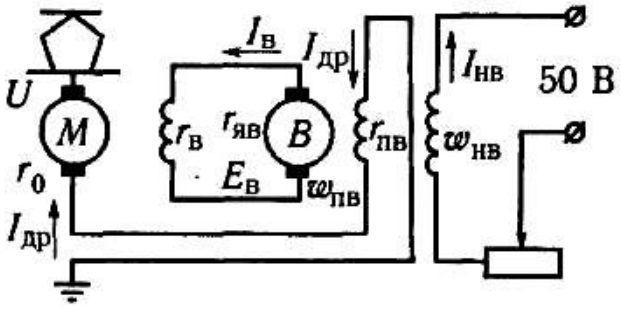


Рис. 7.17. Принципиальная схема рекуперативного торможения с противовозбуждением возбудителя

В нашей стране получила распространение система ***рекуперативного торможения с противовозбуждением возбудителя***. Принципиальная схема такой системы для одной тяговой машины приведена на рис. 7.17. Обмотка возбуждения питается от генератора – возбудителя **В,** на каждом полюсе которого имеются две обмотки. Обмотка независимого возбуждения $w_{нв}$ служит для создания магнитного потока возбудителя. Она питается от цепей управления электроподвижного состава через

реостат, сопротивление которого, а следователь-

но, и ток $I_{нв}$ регулируют с помощью тормозной рукоятки контроллера машиниста.

Для получения мягких характеристик тяговых машин на каждом полюсе находятся витки обмотки противовозбуждения $w_{нв}$, по которым протекает ток рекуперации $I_{др}$. Магнитодвижущая сила этой обмотки действует против магнитодвижущей силы обмотки независимого возбуждения. Поэтому при неизменном токе $I_{нв}$ магнитный поток возбудителя с ростом тока рекуперации уменьшается.

Якорь возбудителя вращается электродвигателем, подключаемым под напряжение контактной сети.

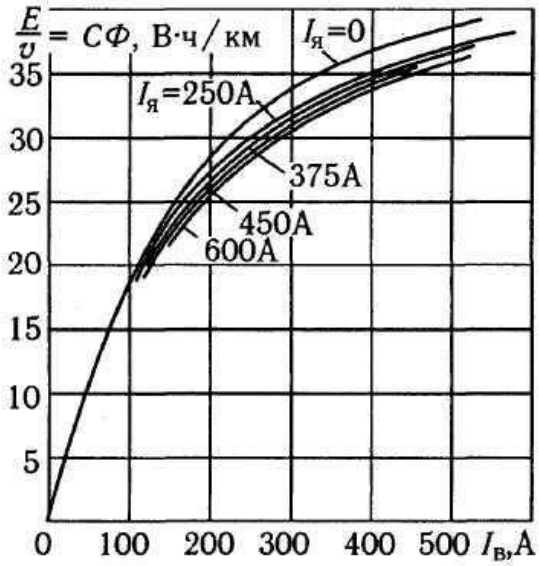


Рис. 7.18. Нагрузочные характеристики тягового электродвигателя

Зависимость между током $I_{др}$ и скоростью v – токовые характеристики при рекуперативном торможении — определим, рассматривая контур тока $I_{др}$. ЭДС тяговой машины равна сумме подведенного напряжения и падения напряжения в цепи:

$$E = U + I_{др}(r_0 + r_{пв}),$$

где E – ЭДС тяговой машины; U – напряжение на тяговой машине; r_0 – сопротивление обмоток якоря, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки; $r_{пв}$ – сопротивление обмотки противовозбуждения возбудителя.

Подставив вместо ЭДС ее выражение через магнитный поток и скорость (E = СФv), получим формулу для определения скорости:

$$v = \frac{U - I_{др}(r_0 + r_{пв})}{СФ}. \qquad (7.28)$$

Магнитный поток (или величину СФ) можно взять из нагрузочных характеристик СФ($I_В$) тягового электродвигателя. Для примера на рис. 7.18 приведены нагрузочные характеристики электродвигателя, не имеющего компенсационной обмотки. Из-за размагничивающего действия реакции якоря магнитный поток при одинаковом токе возбуждения /в и большем токе якоря /я оказывается меньшим. Компенсационная обмотка в тяговых электродвигателях

компенсирует реакцию якоря, и для них значение СФ берут из магнитной характеристики.

Ток возбуждения $I_в$ определяют (см. рис. 7.17) как отношение ЭДС возбудителя к сумме сопротивлений цепи возбуждения тягового электродвигателя:

$$I_в = E_в / (r_в + r_{яв}), \quad (7.29)$$

где $E_в$ – ЭДС возбудителя; $r_в$ – сопротивление обмотки возбуждения тягового электродвигателя; $r_{яв}$ – сопротивление обмотки якоря и дополнительных полюсов возбудителя.

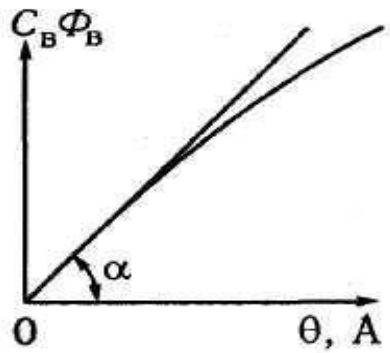


Рис. 7.19. Зависимость $C_в Ф_в$ возбудителя от магнитодвижущей силы θ

ЭДС возбудителя равна:

$$E_в = C_в Ф_в n_в,$$

где $C_в$ – конструкционная постоянная возбудителя; $Ф_в$ – магнитный поток возбудителя; $n_в$ – частота вращения якоря возбудителя.

Зависимость $C_в Ф_в$ от магнитодвижущей силы возбудителя θ приведена на рис. 7.19. Из-за малого насыщения магнитной системы возбудителя кривую $C_В Ф_В(θ)$ можно заменить прямой с углом наклона α. Тогда $C_в Ф_в = θ \operatorname{tg} α$ и магнитодвижущая сила возбудителя: $θ = I_{нв} w_{нв} – I_{др} w_{пв}$.

где $w_{нв}$ – число витков обмотки возбуждения возбудителя (на полюс); $w_{пв}$ – число витков обмотки противовозбуждения возбудителя (на полюс).

Полученные выражения подставляют в формулу (7.29) и получают:

$$I_в = \frac{I_{нв} w_{нв} - I_{пв} w_{пв}}{r_в + r_{яв}} n_в \operatorname{tg} α. \quad (7.30)$$

Отсюда видно, что при неизменном токе независимого возбуждения возбудителя $I_{нв}$ ток возбуждения тяговой машины $I_в$ уменьшается с увеличением тока рекуперации. На рис. 7.20 показаны такие зависимости для различных позиций тормозной рукоятки контроллера машиниста, каждая из которых соответствует определенному току $I_{нв}$.

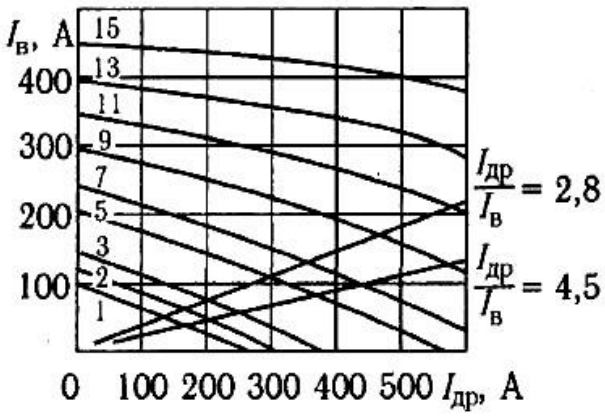


Рис. 7.20. Зависимость тока возбуждения $I_в$ от тока рекуперации $I_{др}$ тягового электродвигателя восьмиосного электровоза

Анализируя формулы (7.30) и (7.28), видно, что на каждой позиции тормозной рукоятки с увеличением тока рекуперации уменьшается ток возбуждения $I_в$, а следовательно, и СФ тяговой машины, увеличивается скорость. Иными словами, характеристика имеет возрастающий характер: с увеличением скорости отдаваемый в

сеть ток растет. Токовые характеристики электровозов ВЛ10 и ВЛ10У приведены на рис. 7.21.

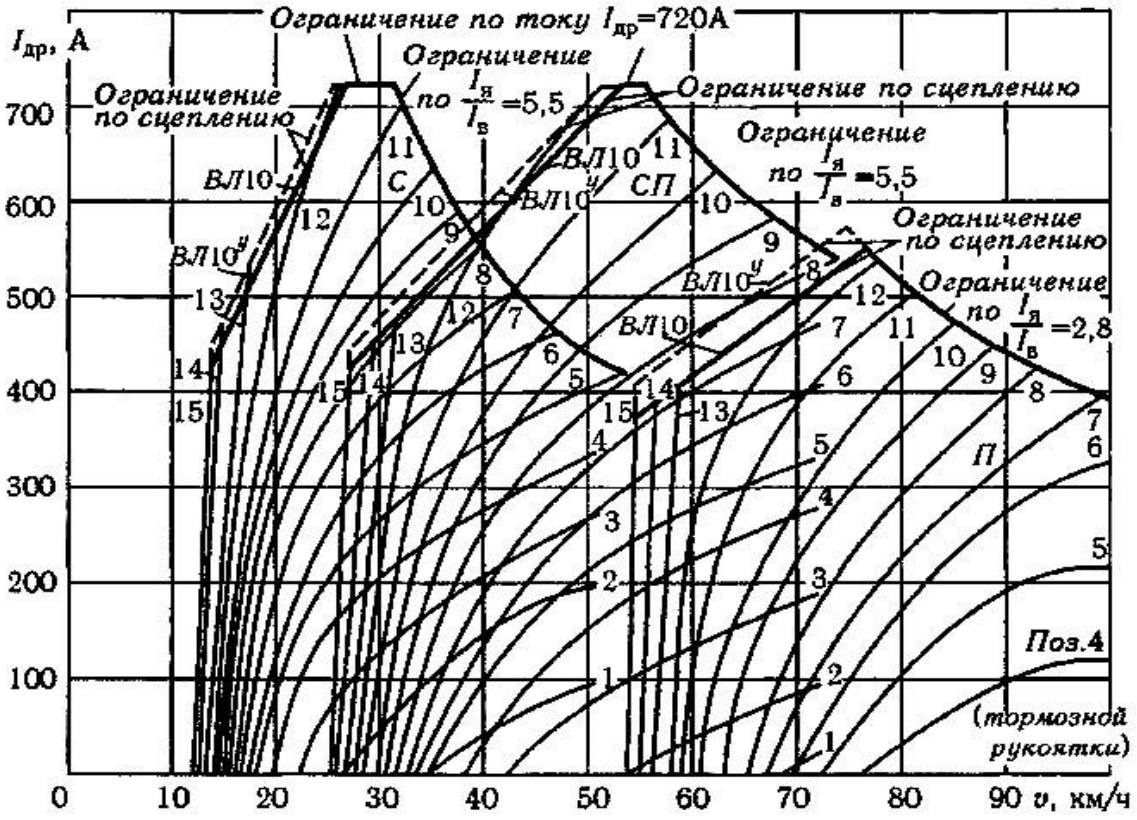


Рис. 7.21. Токовые характеристики электровозов ВЛ10 и ВЛ10У в режиме рекуперации

Тормозную силу электровоза определяют по формуле (7.26), а по токовым характеристикам и зависимости тормозной силы от тока находят тормозные характеристики электроподвижного состава. На рис. 7.22 приведены тормозные характеристики электровозов ВЛ10 и ВЛ10У. Рекуперативные характеристики приводят для напряжения 3300 В.

Это на 10 % выше номинального напряжения контактной сети, так же как и на шинах тяговых подстанций, в связи с тем, что при рекуперации ЭПС превращается из потребителя в источник электрической энергии.

В зоне высоких скоростей находятся 15 характеристик при параллельном соединении обмоток якорей тяговых машин – в четыре ветви по два последовательно (на графике первые три характеристики не показаны). Каждая характеристика соответствует номеру позиции тормозной рукоятки контроллера

машиниста. С увеличением номера позиции увеличивается ток в обмотках возбуждения, а значит, и магнитный поток тяговых машин.

Из графика видно, что с повышением скорости движения растут ток $I_{др}$ и тормозная сила $B_{тр}$. В случае снижения скорости $I_{др}$ и $B_{тр}$ уменьшаются, и для получения больших токов и тормозной силы необходимо переходить на более высокие позиции. После снижения скорости до 54 км/ч на 15-й позиции ток и тормозная сила уменьшаются до нуля, так как суммарная ЭДС двух последовательно включенных тяговых машин не превышает, а только равна напряжению тяговой сети.

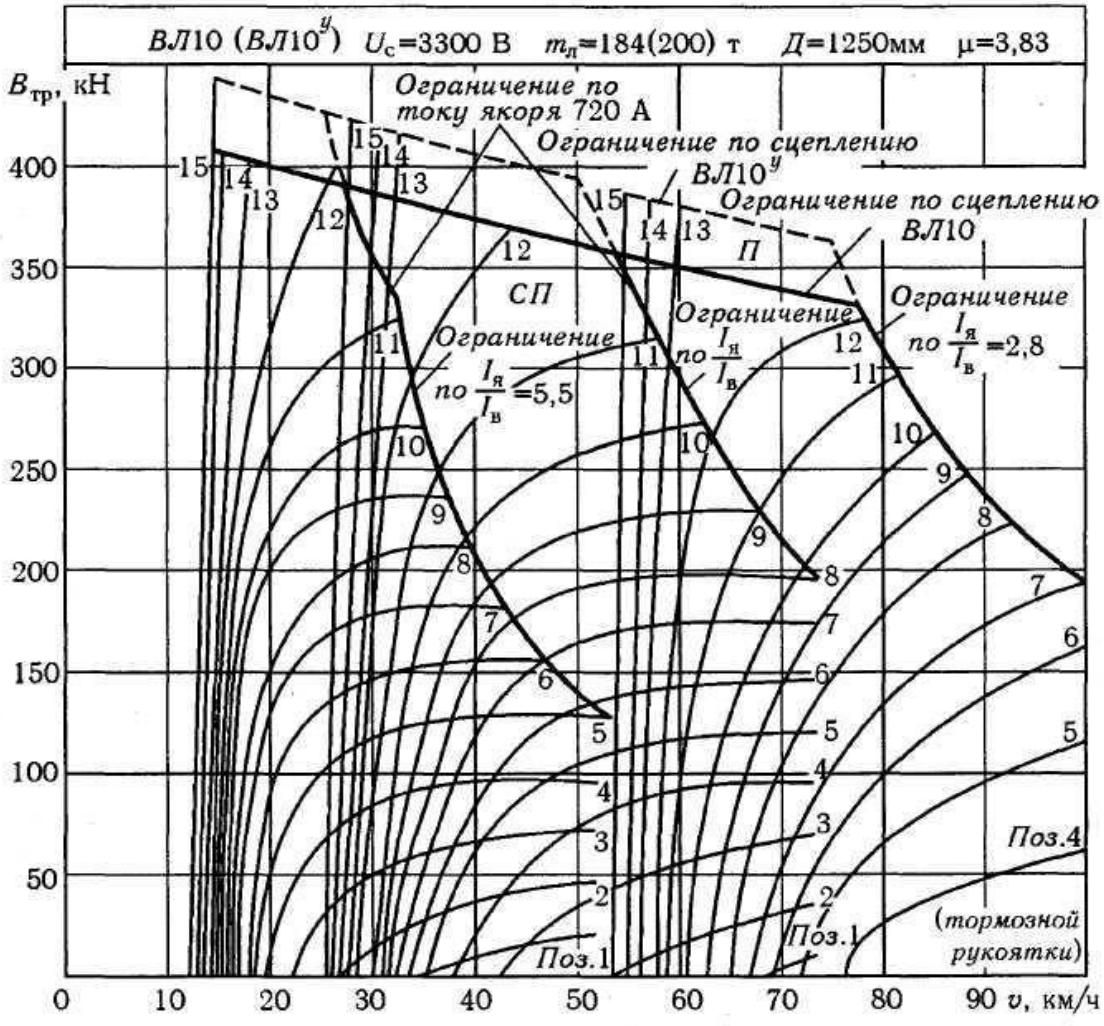


Рис. 7.22. Тормозные характеристики электровозов ВЛ10 и ВЛ10^у в режиме рекуперации

Если скорость будет снижаться и далее, то ЭДС окажется меньше напряжения сети, и тяговые машины перейдут в двигательный режим при независимом возбуждении. Чтобы обеспечить рекуперативное торможение в зоне меньших скоростей, тяговые двигатели переключают на последовательно-параллельное соединение — по четыре последовательно в две параллельные ветви. Суммарная ЭДС четырех тяговых машин превысит напряжение сети при

скорости 54 км/ч даже при меньшем токе возбуждения. На этом соединении используют также 15 позиций тормозной рукоятки контроллера. На 15-й позиции при наибольшем токе возбуждения и скорости 25,5 км/ч суммарная ЭДС четырех тяговых машин снова сравняется с напряжением сети и ток $I_{др}$ будет равен нулю.

Чтобы начать рекуперацию в зоне скоростей от 22,5 до 12,5 км/ч, используют последовательное соединение восьми тяговых машин. В зоне скоростей ниже 12,5 км/ч рекуперация невозможна, так как суммарная ЭДС восьми машин оказывается меньше напряжения сети.

На графике нанесены ограничивающие линии по максимальной скорости 100 км/ч, по сцеплению колес с рельсами, а на параллельном соединении тяговых машин – по допустимому отношению тока якоря к току возбуждения ($I_я/I_в$ = 2,8). Отношение ($I_я/I_в$ = 2,8) соответствует допустимому ослаблению возбуждения тяговой машины: коэффициент регулирования возбуждения $\beta_{min}= I_в/I_я= 1/2,8 = 0,36$. Более глубокое ослабление возбуждения или большее отношение /я//в может привести к образованию кругового огня по коллектору. Ограничение по сцеплению рассчитывают исходя из коэффициента сцепления на 20 % меньшего, чем при тяге. Вследствие различной массы электровозов ВЛ10 и ВЛ10у (соответственно 184 и 200 т) ограничения по сцеплению имеют различные значения (ВЛ10 — сплошные линии, ВЛ10У — штриховые).

Вследствие более низкого напряжения на тяговых машинах при последовательно-параллельном и последовательном соединениях допускается более глубокое ослабление возбуждения ($I_я/I_в$ = 5,5). Кроме того на этих соединениях наступает также ограничение по наибольшему току $I_{др}$ = 720 А.

Зная токовые и тормозные характеристики, можно определить ток $I_{др}$ и тормозную силу $B_{тр}$ на любой позиции тормозной рукоятки контроллера машиниста при заданной скорости движения.

На электровозах ВЛ10 более позднего выпуска (с № 1030 НЭВЗ и с № 1503 ТЭВЗ) были изменены параметры системы рекуперации. На рис. 7.23 приведены совмещенные токовые и тормозные характеристики этих локомотивов. В отличие от предыдущих характеристик здесь скорость отложена по оси ординат, ток по оси абсцисс – вправо, а тормозная сила – влево. Изменены также ограничения. На параллельном соединении вместо ограничения по отношению тока якоря к току возбуждения 2,8 введено ограничение по степени искрения $1\frac{1}{2}$ балла, а на **С**- и **СП**- соединениях отношение $I_я/I_в$ уменьшено до 4 (вместо 5,5).

Чтобы упростить процесс управления режимом рекуперации, применили систему автоматического регулирования процессом торможения (САУРТ). Она обеспечивает стабилизацию скорости или тока рекуперации при соблюдении

ограничений по напряжению и соотношению тока якоря и тока возбуждения, уменьшение тормозной силы в случае проскальзывания колес.

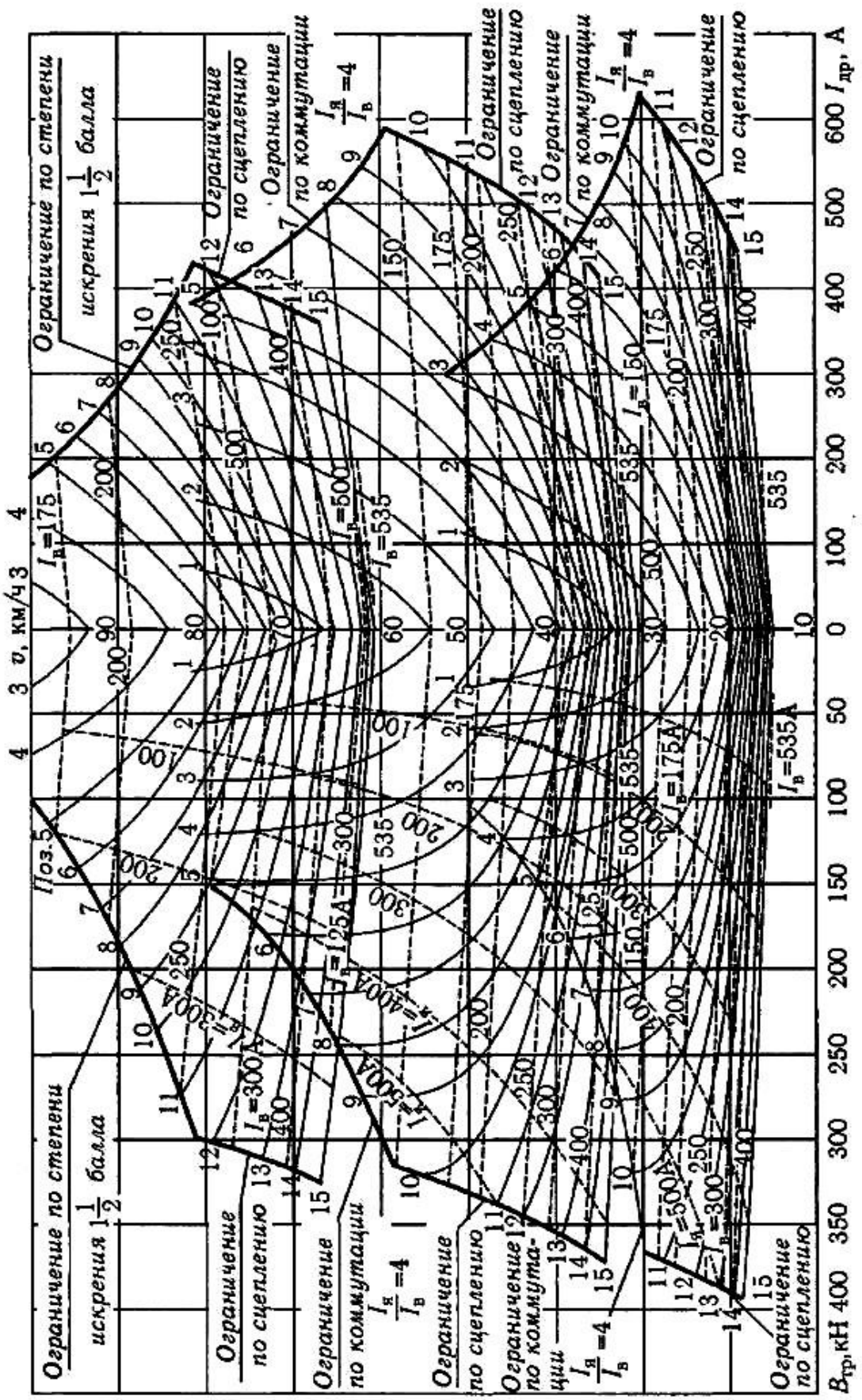


Рис. 7.23. Токовые и тормозные характеристики электровоза ВЛ10 при расширенной зоне рекуперативного торможения

На рис. 7.24 показаны токовые и тормозные характеристики электровоза ВЛ11М (2 секции) при автоматическом регулировании тормозной силы в режиме снижения скорости на каждом соединении обмоток якорей тяговых электродвигателей. На графике $B_{тр}(v)$ приведены кривые при токах $I_{др}$ от 100 до 550 А (через 50 А).

Система рекуперативного торможения с противовозбуждением возбудителя применена на электровозах ВЛ10, ВЛ10У, ВЛ11, ВЛ11М.

На моторных вагонах электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т, ЭТ2, ЭД2Т, ЭД4, ЭД4М применено рекуперативно-реостатное торможение. Характеристики электропоезда ЭД4 приведены на рис. 7.25.

Вначале включается реостатное торможение при независимом возбуждении тяговых электродвигателей и появляется тормозная сила. Под действием системы автоматического управления электрическим торможением (САУТ) увеличивается магнитный поток и ЭДС. Когда суммарная ЭДС четырех последовательно включенных тяговых электродвигателей достигает напряжения контактной сети происходит автоматический переход с реостатного на рекуперативное торможение при независимом возбуждении. Обмотки возбуждения этих электродвигателей соединяются последовательно и питаются через статический преобразователь от поездной трехфазной сети переменного тока с напряжением 220 В.

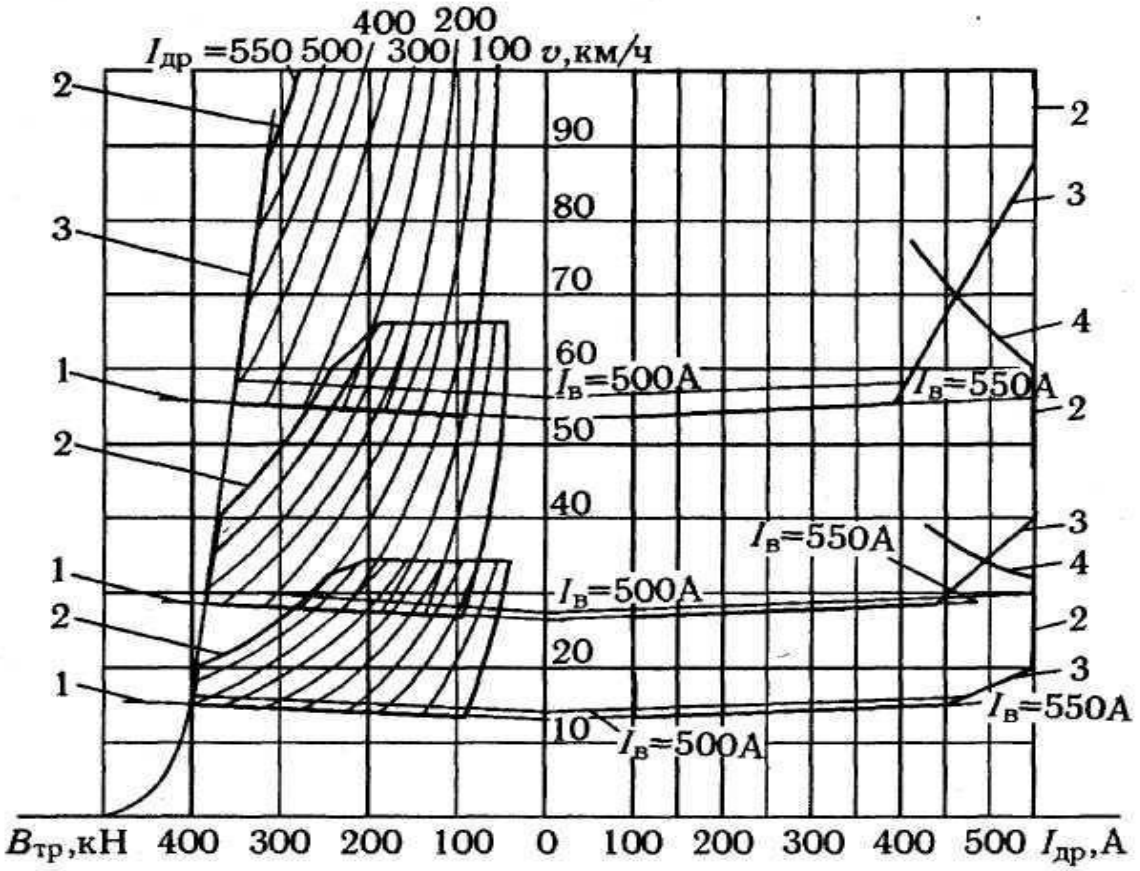


Рис. 7.24. Токовые и тормозные характеристики двухсекционного электровоза ВЛ11^{М} при автоматическом регулировании тормозной силы системой САУРТ:
1 — ограничение по току Iв = 550 А.; 2 — по уставке САУРТ; 3 — по сцеплению колес с рельсами; 4 — по соотношению токов Iя / Iв = 4,0

Тормозную силу в обоих режимах регулируют изменением тока возбуждения (от 50 до 250 А) (см. рис.7.25).

Когда скорость поезда снизится до 45...50 км/ч, или в случае отсутствия потребителей рекуперируемой энергии происходит автоматический переход с рекуперативного на реостатное торможение с самовозбуждением тяговых электродвигателей. Тормозная сила при этом регулируется изменением сопротивления тормозного реостата (поз. 1...11 реостатного контроллера) и поддерживается в случае снижения скорости перед остановкой. В зоне малых скоростей, когда реостатное торможение не может создать достаточную тормозную силу, включают электропневматическое торможение поезда.

Чтобы начать рекуперативное торможение на ЭПС переменного тока со статическими преобразователями, необходимо не только перевести тяговые электродвигатели постоянного тока в генераторный режим при независимом возбуждении с работой на сеть, но и преобразовать постоянный ток в переменный с помощью инверторов. Для получения большей устойчивости и улучшения

распределения тока между параллельно включенными тяговыми двигателями в цепь каждого из них вводят резистор.

В нашей стране выпущены электровозы ВЛ85, ВЛ65 и ВЛ80Р с преобразователями на управляемых полупроводниковых вентилях — тиристорах. В режиме тяги силовые полупроводниковые приборы используют для плавного регулирования напряжения на тяговых электродвигателях, а при рекуперации — для инвертирования тока (преобразования постоянного тока в переменный).

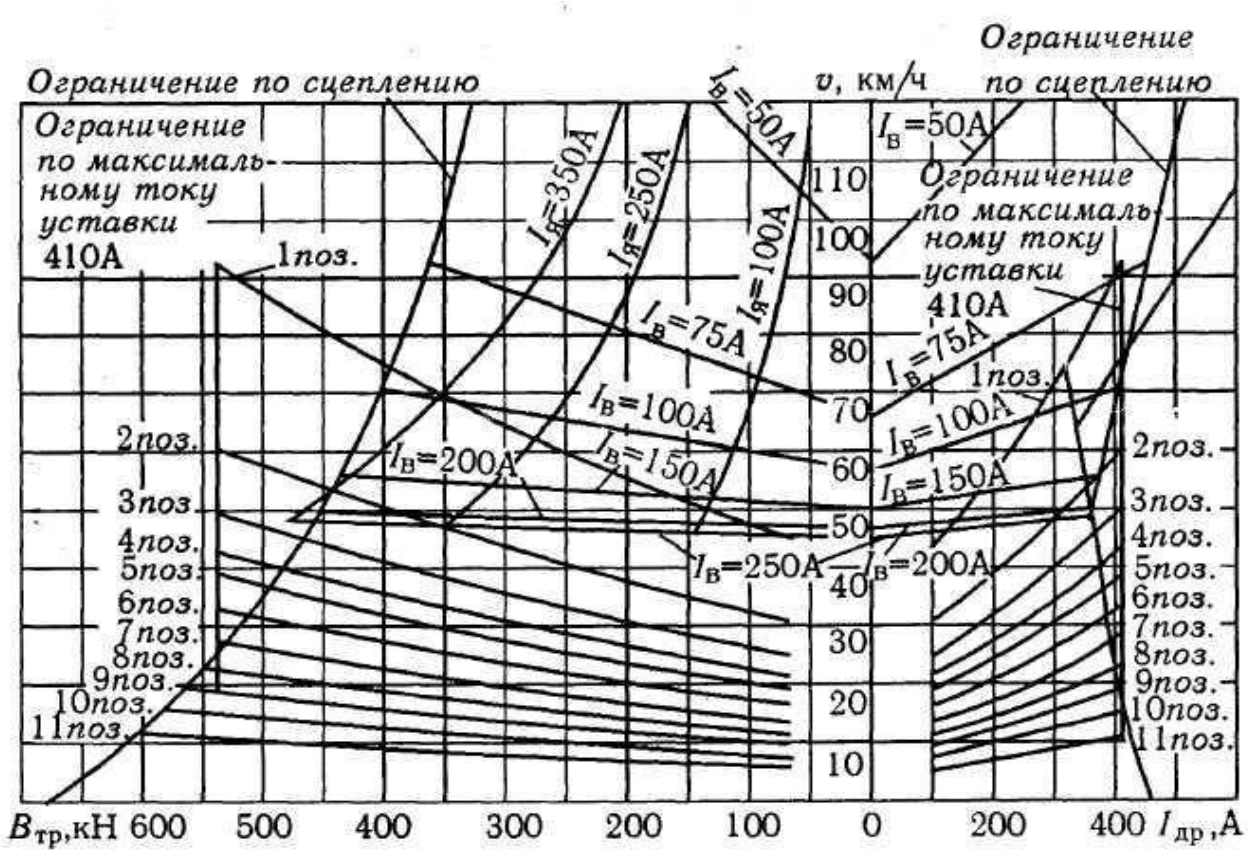


Рис. 7.25. Токовые и тормозные характеристики электропоезда ЭД4 при рекуперативном и реостатном торможении

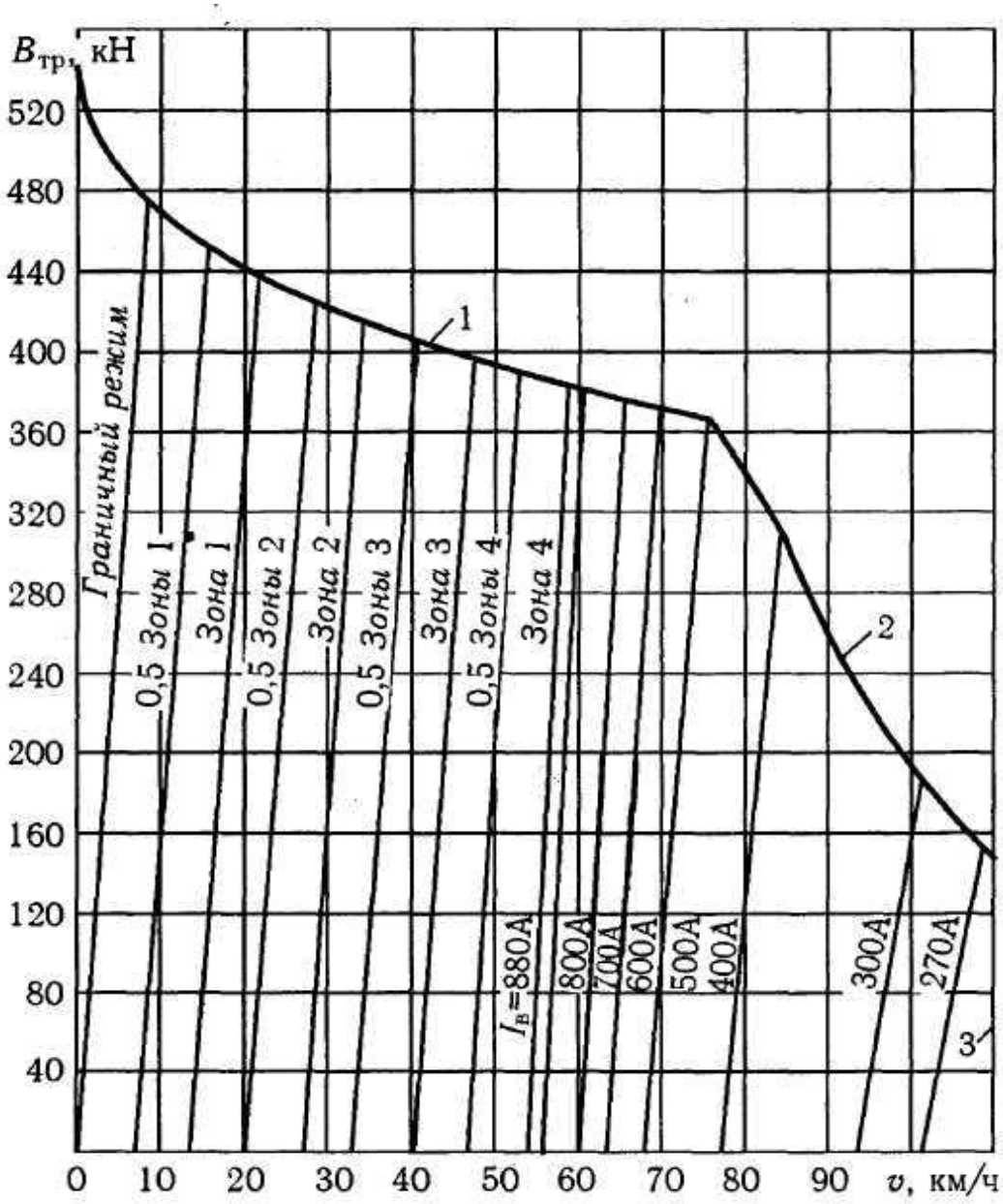


Рис. 7.26. Тормозные характеристики электровоза ВЛ80^Р в режиме рекуперативного торможения

Тормозные характеристики электровозов ВЛ80Р приведены на рис. 7.26, токовые характеристики, показывающие зависимость тока тяговой машины в режиме рекуперации от скорости $I_{др}(v)$, – на рис. 7.27 и токовые характеристики активной составляющей полного тока электровоза при рекуперации от скорости $I_{da}(v)$ – на рис. 7.28. Таких тормозных и токовых характеристик на графиках находится бесчисленное множество, и они перекрывают все поле графика. Изменяя угол открытия тиристоров в каждой зоне регулирования, получают любую характеристику.

Всего на электровозе ВЛ80Р таких зон четыре. Они отличаются напряжением секций тяговой обмотки силового трансформатора. На рис. 7.26...7.28 в виде примера показаны характеристики для половин и целых зон регулирования, а в зоне высоких скоростей – при постоянных токах возбуждения. Рабочая зона характеристик на этих рисунках ограничена сцеплением колес с рельсами (**1**), потенциальными условиями на коллекторах тяговых машин по соотношению токов $I_я/I_в$ (**2**) и наибольшей скоростью (**3**).

Большая жесткость тормозных характеристик позволяет проще поддерживать постоянную скорость на спусках. Тормозную силу регулируют перемещением тормозной рукоятки.

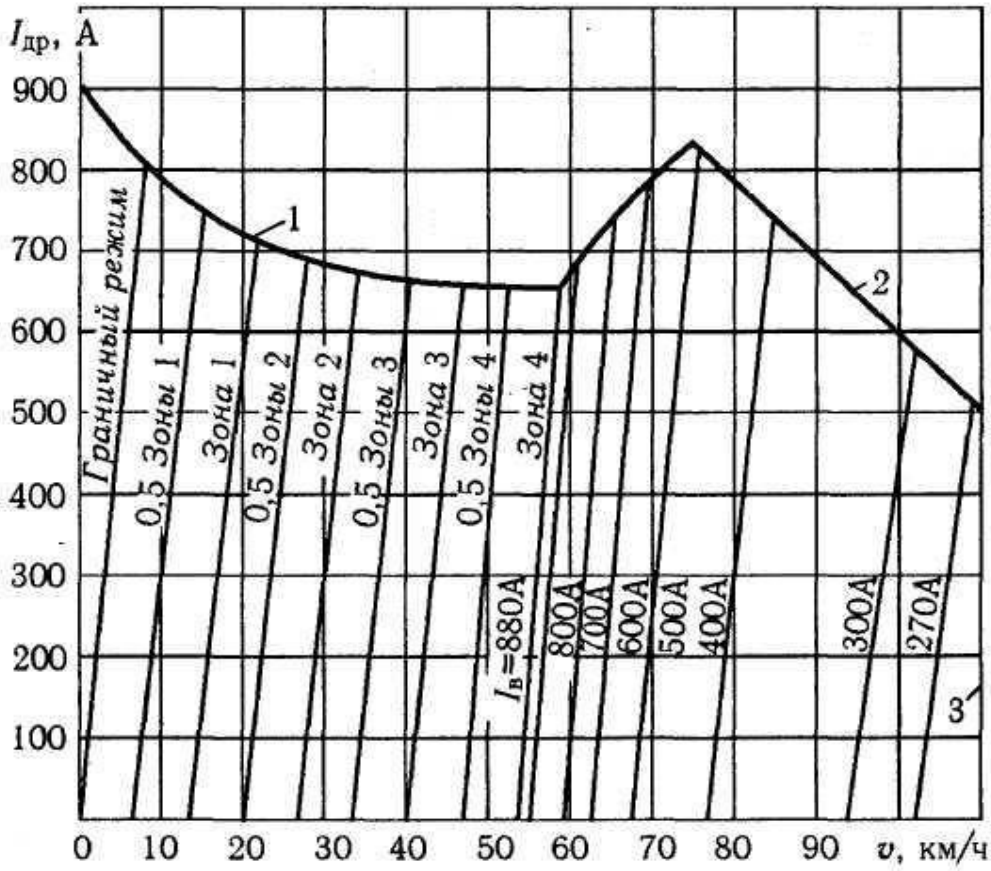


Рис. 7.27. Токовые характеристики тягового электродвигателя электровоза ВЛ80Р в режиме рекуперативного торможения (зависимость тока тягового электродвигателя $I_{др}$ от скорости v)

В зоне малых скоростей (менее 9... 10 км/ч) система рекуперативного торможения автоматически переходит на торможение противо-включением, при котором тяговые машины при независимом возбуждении переходят на работу в режим тяги с действием силы тяги против направления движения. Этот режим

(контрток) в зоне малых скоростей неопасен. Однако при этом из сети потребляется активный ток (см. рис. 7.28).

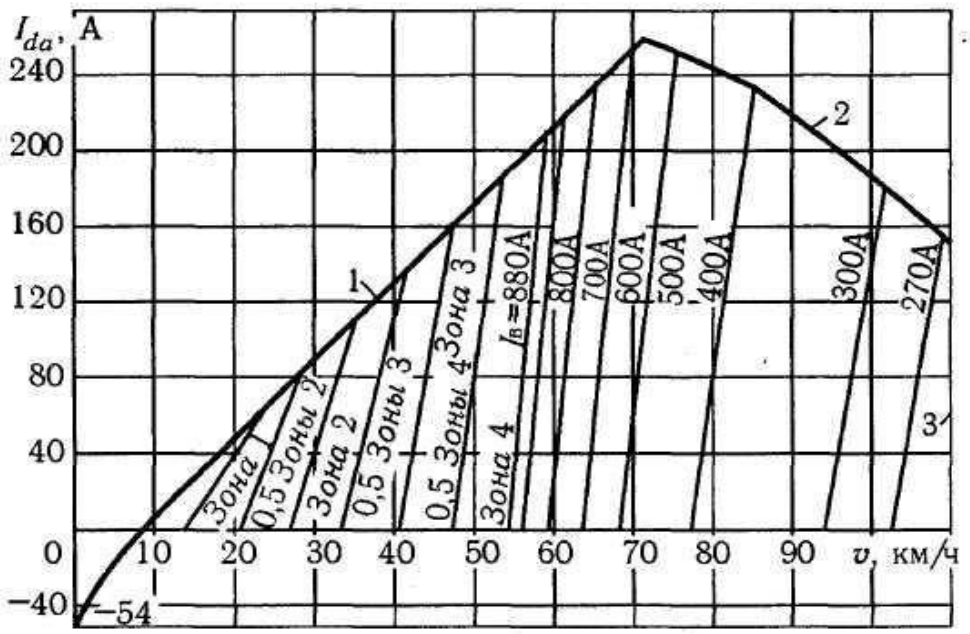


Рис. 7.28. Токовые характеристики электровоза ВЛ80^Р в режиме рекуперативного торможения (зависимость активной составляющей полного тока I_{da} от скорости v)

Тема 8
УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА
8.1. Условия движения поезда

В результате воздействия локомотива на состав и взаимодействия вагонов между собой на поступательное движение поезда накладываются их различные взаимные перемещения во всех направлениях: продольные, поперечные и вертикальные, а также повороты относительно вертикальной и горизонтальных осей. Кроме того, возникают колебания подвижного состава и его узлов. Учет сил, вызывающих эти перемещения, самих перемещений и колебаний усложнил бы изучение закономерностей движения поезда.

Поэтому ***в дальнейших расчетах принимают следующие допущения.*** Поезд представляют в виде материальной точки, в которой сосредоточена вся его масса. Из всех перемещений подвижного состава рассматривают только поступательное движение поезда и вращательное движение частей, частота вращения которых зависит от скорости движения поезда. К ним относят колесные пары, а у локомотивов – также якоря тяговых электродвигателей и элементы передачи. Остальные перемещения в учет не принимают. Замена рассредоточенной массы поезда материальной точкой вносит некоторую погрешность в расчеты при

движении на переломах профиля пути. Однако она вполне допустима для обычных расчетов, связанных с движением поезда.

Кроме совершения работы по перемещению поезда, локомотив или моторный вагон в режиме тяги затрачивает механическую энергию на повышение скорости движения. Или, иными словами, на увеличение кинетической энергии, равной половине произведения массы поезда на квадрат скорости, а при движении по подъему – на повышение потенциальной энергии, равной произведению веса поезда на высоту подъема.

В режиме выбега, когда тяговые электродвигатели ЭПС отключены от контактной сети, а передачи тепловозов и дизель-поездов отсоединяют дизели от колесных пар, поезд не потребляет энергию. Он движется за счет запасенной кинетической или потенциальной энергии. Если скорость снижается, используется кинетическая энергия, при движении по спуску с постоянной скоростью расходуется потенциальная энергия. Возможно также преобразование потенциальной энергии в кинетическую при движении по спуску с увеличением скорости, и кинетической в потенциальную при следовании на подъем с уменьшением скорости.

При торможении к силам сопротивления движению прибавляются тормозные силы.

8.2. Уравнение движения поезда и его анализ

Уравнение движения поезда показывает связь между силами, действующими на поезд, и ускорением его движения.

Как известно, связь между силой, ускорением и массой любого тела, движущегося поступательно, в том числе и поезда, можно определить, используя второй закон Ньютона:

$$F_y = ma, \qquad (8.1)$$

где F_y – ускоряющая сила, действующая на поезд; m – масса поезда; а – ускорение движения.

В тяге поездов массу поезда измеряют в тоннах, чтобы получить ее в килограммах, нужно ввести коэффициент 1000 (1 т = 1000 кг). Скорость измеряют в километрах в час. Чтобы выразить скорость в этих единицах, нужно иметь ускорение в километрах на час в квадрате.

Поскольку 1 м = 1/1000 км, а 1 с = 1/3600 ч, получают:

$$1 \text{ м/с}^2 = 3600^2 /1000 = 12960 \text{ км/ч}^2.$$

Тогда из выражения (8.1) ускоряющая сила равна:

$$F_y = ma/12{,}96. \qquad (8.2)$$

Наряду с поступательным движением всех частей поезда колесные пары вагонов и локомотивов, а также якоря тяговых электродвигателей и элементы зубчатых передач электроподвижного состава и тепловозов с электрической

передачей, элементы гидравлических или механических передач тепловозов и дизельпоездов, имеющих такие передачи, совершают еще и вращательное движение. С изменением скорости поступательного движения изменяется и частота их вращения. Следовательно, ускоряющая сила поезда вызывает не только ускорение поступательного движения всего поезда, но и угловое ускорение вращающихся частей. В случае снижения скорости движения поезда вращающиеся части, стремясь сохранить движение, препятствуют действию замедляющих сил.

Таким образом, вращающиеся части снижают как ускорение, так и замедление поезда, т.е. вызывают тот же эффект, что и увеличение массы поезда. Их влияние на ускорение движения поезда в расчетах оценивают коэффициентом □**,** и вместо массы поезда **m** вводят приведенную массу поезда $m_п$ □ m□□1□ □□.

Коэффициент □1□ □□ называют ***коэффициентом инерции вращающихся частей*****.** Он показывает, насколько нужно увеличить действительную массу поезда, чтобы учесть действие вращающихся частей.

Равенство (8.2) с учетом вращающихся частей будет иметь вид:

$$F_y \square m\square\square 1\square \square\square\square a/12{,}96. \qquad (8.3)$$

Это выражение называют ***уравнением движения поезда*****.** Оно показывает зависимость между ускорением движения поезда, ускоряющей силой, массой поезда, и коэффициентом инерции вращающихся частей. Для определения ускорения движения, уравнение (8.3) используют в виде:

$$a \square \frac{F_y \square 12{,}96\square}{m\square 1\square \square\square}. \qquad (8.4)$$

Так как из уравнения (1.2) $F_y = f_y mg$, то ускорение равно:

$$a \square \frac{127}{1\square \square}\square f_y. \qquad (8.5)$$

Выражение (8.5), также являющееся уравнением движения поезда, показывает, что ускорение движения поезда зависит от удельной ускоряющей силы и коэффициента инерции вращающихся частей (1 + □). Обозначив 127/(1 +□) через □ **,** получим наиболее простую и удобную для расчетов форму уравнения движения поезда. Ускорение равно:

$$a \square \square f_y, \qquad (8.6)$$

где ускорение поезда в км/ч^2 при действии удельной ускоряющей силы в 1 Н/кН.

Так как из формулы (1.3) $f_y = f_к - w_к - b_т$, то ускорение равно:

$$a = (f_к - w_к - b_т). \quad (8.7)$$

Значения коэффициентов инерции вращающихся частей (1 +) различны для разных видов подвижного состава. На их величину влияет также масса подвижного состава. Так, у груженых вагонов значение коэффициента (1 +) меньше по сравнению с порожними из-за меньшего влияния одних и тех же вращающихся частей (колесных пар) на вагон большей массы. У локомотивов коэффициент инерции вращающихся частей имеет большие значения, чем у вагонов, так как,
кроме колесных пар, в нем учитывается инерция якорей тяговых электродвигателей и. элементов передачи.

Коэффициент для поезда, состоящего из различного типа вагонов и локомотивов, определяют как средневзвешенную величину по формуле:

$$= \frac{m^{c1}_1 + m_{c2}_2 +...+ m_л_л}{m}, \quad (8.8)$$

где m_{c1}, m_{c2}, ... – массы отдельных частей состава в тоннах, имеющих коэффициенты соответственно $_1$, $_2$, ...; $m_л$ – масса локомотива в тоннах, имеющего коэффициент $_л$; m – масса поезда.

Для различных грузовых и пассажирских поездов коэффициент оказывается близким к 0,06, коэффициент , равным 127/1,06 120 км/ч^2/Н/кН. Эти значения коэффициентов и берут для всех грузовых и пассажирских поездов. Для электро- и дизель-поездов, а также при движении локомотивов резервом значения , выбирают из табл. 8.1.

Таблица 8.1

Вид подвижного состава	1	км/ч^2 , Н/кН
Электровозы (всех серий)	1,15…1,30	97…110

Электровоз ВЛ80К □□□ 4,19□	1,275	99,6
Электровозы ВЛ10, ВЛ60К □□□ 3,826□	1,265	100,4
Электровозы ВЛ8, ВЛ23 □□□ 3,905□	1,242	102,3
Электропоезда	1,06…1,07	118…120
Тепловозы	1,07…1,13	112…118
Дизель-поезда	1,09…1,10	115…116
Пассажирские вагоны	1,04…1,05	121…122
Грузовые вагоны:		
порожние	1,03…1,04	122…123
груженые	1,07…1,08	117…119

Чтобы решить уравнение движения поезда, нужно, как следует из формул (8.6) и (8.7), найти удельные ускоряющие или замедляющие силы, которые определяют из удельных сил тяги, удельных сил сопротивления движению и удельных тормозных сил во всем диапазоне скоростей движения.

На рис. 8.1 показаны зависимости удельной силы тяги локомотива (кривая **1**), удельных сил основного сопротивления движению поезда (кривая **3** – при работе локомотива под током, кривая **4** – при работе локомотива без тока) и удельных тормозных сил (кривая **5**) в зависимости от скорости движения. Причем для удобства дальнейших построений ускоряющие силы отложены по оси абсцисс влево от начала координат, а скорости – по оси ординат. Графики, показывающие зависимость удельных ускоряющих и замедляющих сил от скорости движения, называют ***диаграммой удельных ускоряющих и замедляющих сил*****.** На ней не учтены силы дополнительного сопротивления движению поезда.

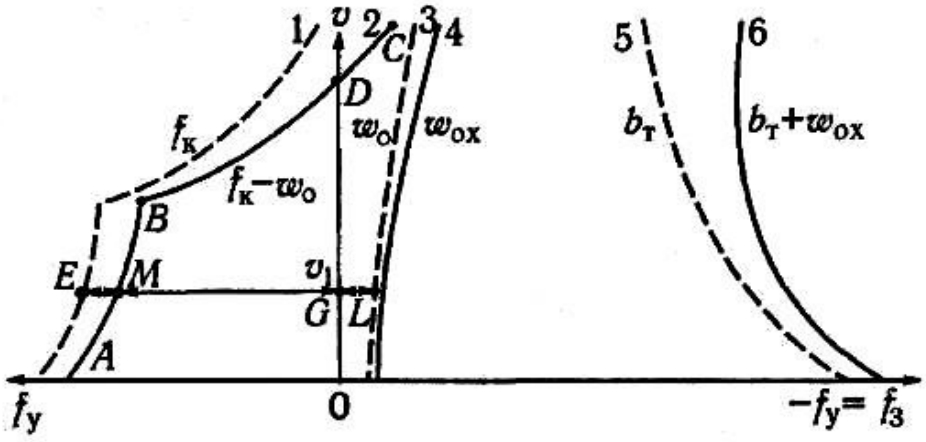


Рис. 8.1. Построение диаграммы удельных ускоряющих и замедляющих сил

В режиме тяги удельная ускоряющая сила, как следует из раздела 1.2, определяется как разность удельных сил тяги $f_к$ и сопротивления движению поезда при работе локомотива в режиме тяги w_0:

$$f_y = f_к - w_0. \quad (8.9)$$

Например, при скорости $\mathbf{v_1}$ удельную ускоряющую силу находят как разность отрезков **GE** и **GL.** Полученный отрезок **GM** соответствует удельной ускоряющей силе f_y, действующей на поезд на прямолинейном горизонтальном элементе профиля пути. Проведя подобные вычисления значений ($f_к$ – w_0) при других скоростях и соединив точки, получают кривую **ABDC –** диаграмму удельных ускоряющих сил (кривая **2**) в режиме тяги.

Замедляющие силы (без учета дополнительного сопротивления) в случае движения поезда в режиме выбега определяют по формуле (6.40) – кривая **4** (рис. 8.1). В режиме механического торможения удельные замедляющие силы $f_з$ (кривая **6**) вычисляют суммированием удельных тормозных сил $b_т$ (кривая **5**) и удельных сил сопротивления движению при работе без тока w_{ox} (кривая **4**) по формуле:

$$f_з = f_y + w_{ox}. \quad (8.10)$$

Обычно на диаграмме удельных ускоряющих и замедляющих сил кривые **1, 3** и **5** не показывают, оставляя только кривые удельных ускоряющих и замедляющих сил, необходимые для решения уравнения движения поезда.

Имея диаграмму удельных ускоряющих и замедляющих сил, можно проанализировать характер движения данного поезда, имеющего определенное значение коэффициента инерции вращающихся частей, а следовательно, и коэффициента . При этом нужно помнить, что на диаграмме не учтено дополнительное сопротивление движению поезда, которое может сильно повлиять на значение удельной ускоряющей или замедляющей силы.

Характер движения поезда в наиболее простых условиях при отсутствии сил дополнительного сопротивления движению в функции времени определяют следующим образом. При трогании с места на поезд в режиме тяги действует удельная ускоряющая сила, равная отрезку **0A.** В дальнейшем при разгоне она несколько снижается (до точки **B**). Из уравнения движения поезда видно, когда удельная ускоряющая сила положительна ($f_y > 0$), то ускорение (a) будет также положительно, что соответствует ускоренному движению поезда.

На рис. 8.2 показано увеличение скорости во времени под действием силы f_y. Если бы ускоряющая сила не изменялась от скорости, а была постоянной, то движение было бы

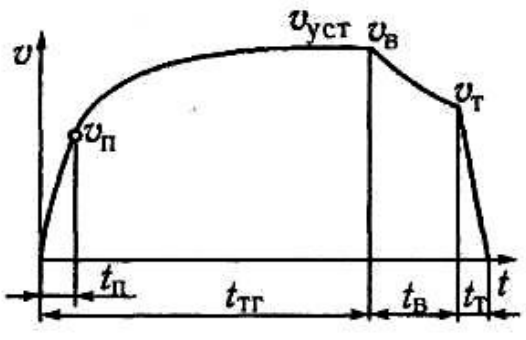


Рис. 8.2. Зависимость скорости движения от времени в различных режимах движения

равноускоренным. Поскольку ускорение зависит от ускоряющей силы, вначале скорость возрастает более интенсивно, затем с меньшим ускорением. Через время $t_п$ при скорости $v_п$, соответствующей точке **B** на рис. 8.1, разгон заканчивается. Далее удельная ускоряющая сила уменьшается более резко (по линии **BC**). Соответственно уменьшается ускорение поезда (что следует из уравнения движения), и приращение скорости становится все меньше.

Когда скорость достигнет точки **D,** при которой $f_у = 0$, ускорение будет также равно нулю, и поезд начнет двигаться с установившейся скоростью ($v_{уст}$ на рис. 8.2). Чтобы уменьшить

скорость движения, машинист через время $t_{тг}$ после трогания при скорости $v_в$ переходит с режима тяги на режим выбега, которому соответствует кривая **4** на рис. 8.1. В связи с тем, что в режиме выбега удельная ускоряющая сила отрицательна ($f_у < 0$), движение поезда будет замедленным. На рис. 8.2 это изменение скорости происходит по отрезку кривой $v_в – v_т$ в течение времени $t_в$.

Если нужно снижать скорость с большим замедлением, машинист включает тормоза. При этом замедляющие силы определяются кривой **6** на рис. 8.1. Значительная отрицательная ускоряющая сила приводит к движению с большим замедлением в течение времени $t_т$ (см. рис. 8.2) от точки $v_т$ до $v = 0$. Если бы замедляющая сила в режиме торможения оставалась постоянной, то движение поезда было бы равнозамедленным.

В действительных условиях движения поезда по элементам профиля пути, имеющим также подъемы и спуски, ускоренно двигаться можно не только в режиме тяги, но и в режиме выбега и даже торможения при следовании по спуску, когда составляющая от веса поезда окажется больше сил сопротивления движению или суммы сил сопротивления движению и тормозной силы.

Равномерное движение поезда наступает при равенстве этих сил. Замедленное движение может быть и в режиме тяги при следовании по подъему, когда сила тяги окажется меньше сил основного и дополнительного сопротивлений движению.

В результате решения уравнения движения поезда определяют скорости движения, путь, пройденный за любой промежуток времени, или время, необходимое для прохождения отрезков пути, в том числе перегонов.

При движении поезда ускоряющая сила изменяется в связи с изменением режимов работы локомотива, плана и профиля пути и т.д. Поэтому наиболее общим случаем является ускоренное или замедленное движение и только в частных случаях – равномерное.

8.3. Общие принципы решения уравнения движения поезда

В результате решения уравнения движения поезда определяется зависимость между скоростью движения, временем хода и проходимым расстоянием при действии ускоряющих или замедляющих сил.

Чтобы решить уравнение движения поезда при изменяющихся силах, нужно знать законы, которым они подчиняются. Однако изменения скорости, силы тяги и тока тяговых электродвигателей взаимно связаны через магнитный поток, нелинейно зависящий от тока и не имеющий аналитического выражения. Поэтому тяговые характеристики и кривые удельных ускоряющих сил также не имеют аналитического выражения, а задаются в виде графиков или в форме таблиц.

При отсутствии аналитической зависимости решить уравнение движения поезда точными методами нельзя, и на практике его решают приближенными методами, при условии, что они дают достаточную для практики точность расчетов. Приближенные методы основаны на замене действительных, изменяющихся в каком-то интервале скоростей, удельных ускоряющих или замедляющих сил неизменными средними значениями.

На рис. 8.3 показана диаграмма удельных ускоряющих сил (кривая **adm**) и отрезков прямых, которыми ее заменяют. Например, при изменении скорости в интервале 0...10 км/ч действительная удельная ускоряющая сила изменяется по кривой **ab** от 8,2 Н/кН при v = 0 до 7,6 Н/кН при v = 10 км/ч. Ее заменяют средним значением $f_{уср}$ = 7,9 Н/кН (прямая **a"b'**). Аналогично кривую **bc** в интервале скоростей 10...20 км/ч можно заменить вертикальной прямой **b"c'** и т.д. При этом переход от одного интервала скорости к другому сопровождается скачкообразным изменением среднего значения удельной ускоряющей силы.

Таким образом, кривую **adm** заменяют ступенчатой линией **a"b'b"c'c" ... l'l"m'.** Погрешность расчетов с использованием ступенчатой линии зависит от выбранного интервала скоростей. Чем меньше интервал, тем меньше средние силы $f_{y\ ср}$ отличаются от действительных значений f_y. В пределе при бесконечно малых интервалах скорости ломаная линия совпадет с линией **adm.** Однако при малых интервалах увеличивается их число, а следовательно, и объем расчетов.

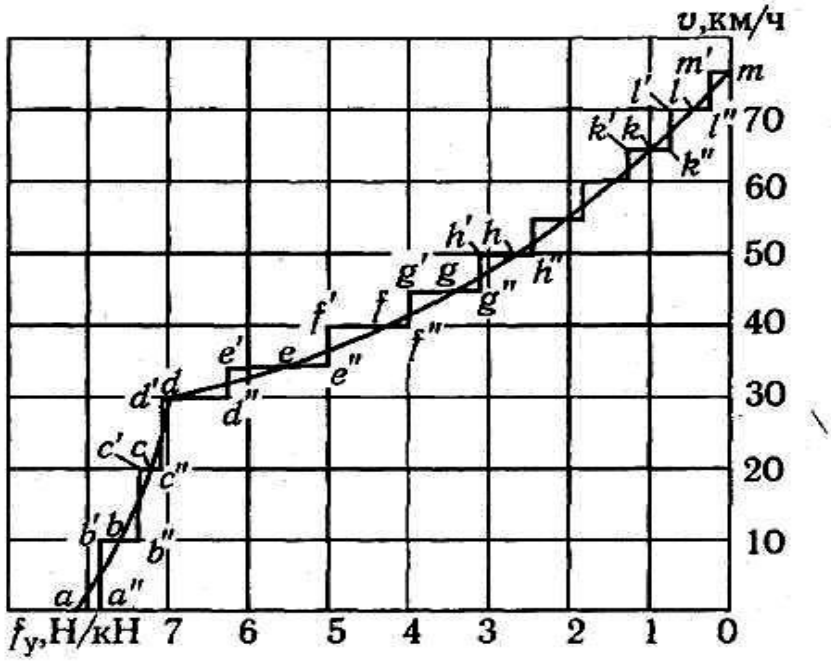


Рис. 8.3. Определение средних значений удельных ускоряющих сил

При больших интервалах скоростей объем расчетов меньше, но погрешность расчетов возрастает. Поэтому в ПТР оговорены наибольшие интервалы скоростей, в которых принимают средние значения удельных ускоряющих сил. В режиме тяги в зоне разгона (кривая **ad**) до выхода на ходовые характеристики разрешается брать интервалы скоростей не более 10 км/ч, а при работе на ходовых позициях (линия **dm**) — не более 5 км/ч. Разницу в интервалах скорости ввели для получения примерно одинаковой погрешности при разных наклонах кривых. Во время разгона поезда кривая удельных ускоряющих сил близка к вертикали, и разница между действительными и средними значениями сил меньше, чем при работе на ходовых характеристиках, где кривые идут полого. При интервале скорости 10 км/ч на ходовых характеристиках разница между действительными и средними удельными ускоряющими силами была бы больше, что привело бы к большим погрешностям и снижению точности расчетов.

Исходя из этого, наибольшие интервалы скоростей на выбеге составляют 10 км/ч, в режиме торможения при скоростях 50 км/ч и выше – не более 10 км/ч, а в зоне более низких скоростей, где кривая удельных замедляющих сил идет полого, – не более 5 км/ч.

На диаграмме удельных ускоряющих сил ступенчатую линию **a"b'b"c'c" ... l'l"m'** не строят, а берут в каждом интервале скоростей средние значения сил $f_{y\,ср}$ на кривой удельных ускоряющих или замедляющих сил при средней скорости движения. Если в каждом интервале скоростей удельную ускоряющую или

замедляющую силу считать постоянной, то движение будет равноускоренным или равнозамедленным.

Таким образом, чтобы решить уравнение движения поезда, нужно рассчитать и построить диаграмму удельных ускоряющих и замедляющих сил во всем диапазоне скоростей.

8.4. Спрямление и приведение профиля пути

Наиболее часто приходится рассчитывать силы дополнительного сопротивления движению от уклонов и кривых. Профиль железнодорожного пути состоит из отдельных элементов, отличающихся длиной s и крутизной i уклона. В случае подъема i имеет знак « + », а спуска – « – ».

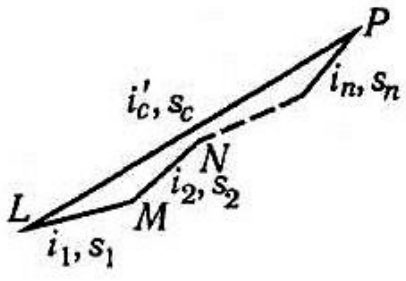


Рис. 8.4. ***Спрямление профиля пути***

При выполнении расчетов, связанных с движением поезда, число элементов профиля пути уменьшают за счет спрямления элементов, при котором несколько элементов с различными уклонами заменяют одним уклоном – спрямленным участком, имеющим длину s_c, равную сумме их длин. Это позволяет упростить расчеты и до некоторой степени сгладить изменение сил дополнительного сопротивления движению при переходе с одного элемента профиля пути на другой. Дело в том, что в расчетах подобное изменение сил считают мгновенным. На самом деле поезд имеет определенную длину, и при движении от одного элемента профиля к другому его сопротивление от уклона изменяется постепенно по мере движения.

Действительный профиль пути **LMN ... P** с уклонами соответственно i_1, i_2 и т.д. (рис. 8.4) и длинами s_1, s_2, ..., s_n заменим одним спрямленным элементом **LP** с уклоном i_c'. Его длину $\mathbf{s_c}$ примем равной сумме длин элементов – $s_1 + s_2 + ... + s_n$. Это допущение вызывает ничтожную погрешность, так как углы наклона элементов отличаются на доли или единицы градуса.

Значение спрямленного уклона i_c' должно быть определено из условия выполнения локомотивом одинаковой работы при движении по действительному и спрямленному профилям пути. На каждом элементе профиля работа равна произведению сил основного и дополнительного сопротивлений движению поезда на длину элемента. Эти силы равны удельным силам, умноженным на вес поезда mg.

Следовательно, при движении по действительному профилю пути **LMN...P,** состоящему из **n** элементов, локомотив совершает работу по преодолению сил основного и дополнительного от подъема сопротивлений движению (в Дж):

$$A_д = mg(w_{o1} + i_1)s_1 + mg(w_{o2} + i_2)s_2 + ... + mg(w_{on} + i_n)s_n; \quad (8.11)$$

где s_1, s_2, ..., s_n – длина элемента профиля пути; i_1, i_2, ..., i_n – уклон элемента; w_{o1}, w_{o2}, ... w_{on} – основное удельное сопротивление движению.

Работа в джоулях, совершаемая локомотивом при движении по спрямленному профилю пути с уклоном i_c' и длиной, $s_c = s_1 + s_2 + ... + s_n$, –

$$A_c = mg(w_{oc} + i_c')s_c. \quad (8.12)$$

Приравняв $A_д$ и A_c из выражений (8.11) и (8.12) и сократив обе части равенства на вес поезда mg, получают:

$$(w_{o1} + i_1)\, s_1 + (w_{o2} + i_2)\, s_2 + ... + (w_{on} + i_n)\, s_n = (w_{oc} + i_c')\, s_c. \quad (8.13)$$

Основное удельное сопротивление движению w_0 зависит от скорости движения. На каждом элементе профиля скорость отличается от скорости движения по спрямленному участку. На крутом подъеме скорость движения меньше, а на меньшем подъеме больше.

Если пренебречь разницей в скоростях движения по каждому элементу и считать, что силы основного сопротивления движению одинаковы, т.е. $w_{o1} = w_{o2} = ... = = w_{on} = w_o = w_{oc}$, то получим:

$w_o (s_1 + s_2 + ... + s_n) = w_o s_c$. Вычтя эти значения из левой и правой частей выражения (8.13), получим:

$$i_1 s_1 + i_2 s_2 + ... + i_n s_n = i_c' s_c,$$

откуда ***спрямленный уклон равен:***

$$i_c' = (i_1 s_1 + i_2 s_2 + ... + i_n s_n)/ s_c \quad (8.14)$$

или

$$i_c' = \frac{\sum i_i s_i}{\sum s_i} = \frac{\sum i_i s_i}{s_c}. \quad (8.15)$$

Спрямленный уклон равен отношению сумм произведений каждого уклона на его длину к длине спрямленного участка. Значение i_c' можно определить из формулы (6.42), исходя из высоты точек конца $H_к$ и начала $H_н$ спрямленного элемента профиля пути: $i_c' = 1000(H_к – H_н)/s_c$. (8.16)

Пренебрежение разницей скоростей движения по элементам с различной крутизной вызывает погрешность в расчетах, возрастающую с увеличением разницы в крутизне соседних элементов и длинах элементов. Чтобы в расчетах не допустить больших погрешностей при определении скорости движения, спрямлять можно только близкие по значению и знаку элементы профиля. С этой целью после спрямления проверяют его по эмпирической формуле:

$$s_i < 2000/\Delta i\ , \quad (8.17)$$

где s_i – длина элемента профиля пути; $\Delta i = |i_c - i_i|$ – абсолютная разность между уклонами спрямляемого участка и проверяемого элемента.

Такой проверке подвергают все элементы, входящие в спрямляемый участок. Из выражения (8.17) видно, что условия допустимости спрямления выполняются в случае спрямления длинных элементов при меньшей разности между уклонами, а следовательно, и при меньших значениях Δi. При коротких элементах разрешено их спрямлять при большей разности в уклонах.

На рис. 8.5 показан график, соответствующий неравенству (8.17). В зоне линии **АВ** и ниже, где произведение $s_1\Delta i$ окажется равным или меньшим 2000, спрямление допустимо. Если это произведение окажется над линией **АВ,** спрямлять элементы нельзя. Этим графиком можно пользоваться для предварительного определения допустимости спрямления. Окончательное решение принимается после проверки по выражению (8.17).

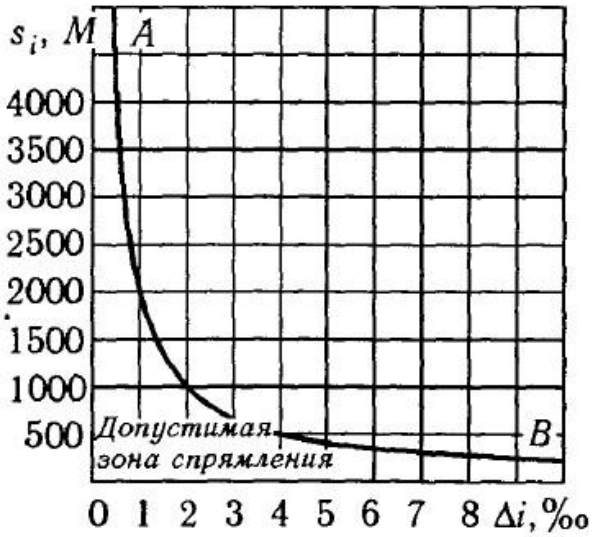


Рис. 8.5. График, показывающий зону допустимого спрямления элементов профиля пути

Спрямлению подлежат только элементы с уклонами одного знака. Горизонтальные элементы пути допускается спрямлять с примыкающими подъемами и спусками. Элементы профиля пути на остановочных пунктах с прилегающими элементами пути перегонов не спрямляют.

Кривые участки пути спрямляют в плане, заменяя их так называемым ***фиктивным подъемом*** i_c", имеющим крутизну, на котором создается дополнительное сопротивление движению, равное дополнительному сопротивлению от кривых. Обычно длина кривой не равна длине элемента или спрямленного участка. Если она (**ВС** на рис. 8.6) оказывается меньше длины элемента **AD,** то вместо одного элемента получается три: **АВ, CD** (только с дополнительным сопротивлением движению от уклона) и **ВС,** на котором действует еще дополнительное сопротивление от кривой w_r. Такое дробление элемента приводит к увеличению числа элементов профиля пути.

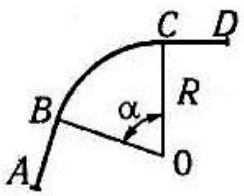


Рис. 8.6. Расположение кривой на элементе

Чтобы этого не было, работу A_1, совершаемую локомотивом для преодоления сил дополнительного сопротивления от кривой в пределах длины $s_{кр}$, заменяют равной ей работой, которую локомотив совершит в пределах длины всего элемента или спрямленного участка s_c. Работу A_1, определяют как произведение силы mg w_r на путь $s_{кр}$:

$$A_1 = mg\, w_r\, s_{кр}\ .$$

Работу A_2, при замене сопротивления движению от кривой через фиктивный подъем i_c'' определяют из выражения:

$A_2 = mg\ i_c'' s_c$. Из равенства работ A_1 и A_2 после сокращения на mg получим:

$$i_c'' = w_r\, s_{кр}/s_c \qquad (8.18)$$

или с учетом формулы (6.46) —

$$i_c'' = \frac{700\, s^{кр}}{R\ \ s_c}\ . \qquad (8.19)$$

В общем случае, при нахождении на элементе профиля пути или на спрямленном участке нескольких кривых, имеющих разные длины и радиусы R_i, фиктивные подъемы определяют по формуле:

$$i_c'' = \frac{700}{s_c}\ \sum \frac{s^{кpi}}{R_i}\ . \qquad (8.20)$$

Если кривые заданы центральными углами α_i (в градусах) и длинами $s_{кpi}$, то фиктивный подъем из формул (6.48) и (8.18):

$$i_c'' = \frac{12{,}2}{s_c}\ \sum \alpha_i. \qquad (8.21)$$

Если кривая расположена на уклоне, то на дополнительное удельное сопротивление движению от уклона накладывается дополнительное удельное сопротивление движению от кривой. Алгебраическую сумму уклона i_c', имеющего на подъеме знак « + », а на спуске – « – », и фиктивного подъема i_c'' называют ***приведенным или окончательным уклоном*** i_c. Его определяют по следующим формулам:

на подъеме —

$$i_c = i_c' + i_c'', \qquad (8.22)$$

на спуске — $i_c = - i_c' + i_c''$. (8.23)

Из-за влияния кривых приведенные подъемы при движении в одном направлении и спуски для движения в противоположном направлении оказываются разными.

Практически спрямление и приведение профиля начинают с анализа заданного профиля пути. На нем выделяют группы соседних элементов, близких по значению подъема или спуска. Затем по формулам (8.15) или (8.16) определяют

i_c' для каждой группы элементов и проверяют допустимость спрямления по выражению (8.17) каждого из заданных элементов. В случае если одна из проверок не будет удовлетворять этому неравенству, спрямление проводить нельзя, и нужно наметить новые группы элементов для спрямления. После этого для каждого спрямленного участка определяют фиктивные подъемы от кривых и приведенные или окончательные уклоны.

Чтобы более точно учесть влияние профиля пути на характер движения поезда по труднейшим подъемам и в кривых малого радиуса, ПТР рекомендует брать длину спрямленного участка не более длины поезда (определяемой длиной приемо-отправочных путей), разбивая соответствующий профиль на части с таким расчетом, чтобы на одной из них при наибольшем подъеме оказалась кривая с наименьшим радиусом. Это место на профиле пути будет наиболее трудным. Длину спрямленного элемента на этом подъеме разрешается принимать и более длины поезда, но только в случае отклонения уклона не более, чем на 0,3 ‰.

Пример. Провести спрямление профиля пути, приведенного в графах 1…5 таблицы 8.2 и в трех нижних строках на рис. 8.7.

Таблица 8.2

№ элемента	Длина элемента Д	Уклон i_i, ‰	Кривая		Длина спрямленного элемента $s_c=\sum s_i$, м	Спрямляющий уклон	Фиктивный уклон, ‰	Приведенный уклон $i_c= i_c' + i_c''$, ‰	№ спрямленного элемента	Примечание
			Радиус R, м или угол α, град	Длина $s_{кр}$, м						
1	500	0	-	-	500	0	-	0	1	Ст. А
2	800	-7,4	-	-						
3	1600	-6,6	25	500	3000	- 6,5	0,3	- 6,2	2	
4	600	-5,0	400	350						
5	1000	-0,2	-	-	1000	- 0,2	-	-	3	
6	1200	,2	600	800						
7	550	4,7	1000	450	2450	+ 5,0	0,6	+ 5,6	4	
8	380	6,4	660	200						
9	320	7,1	-	-						

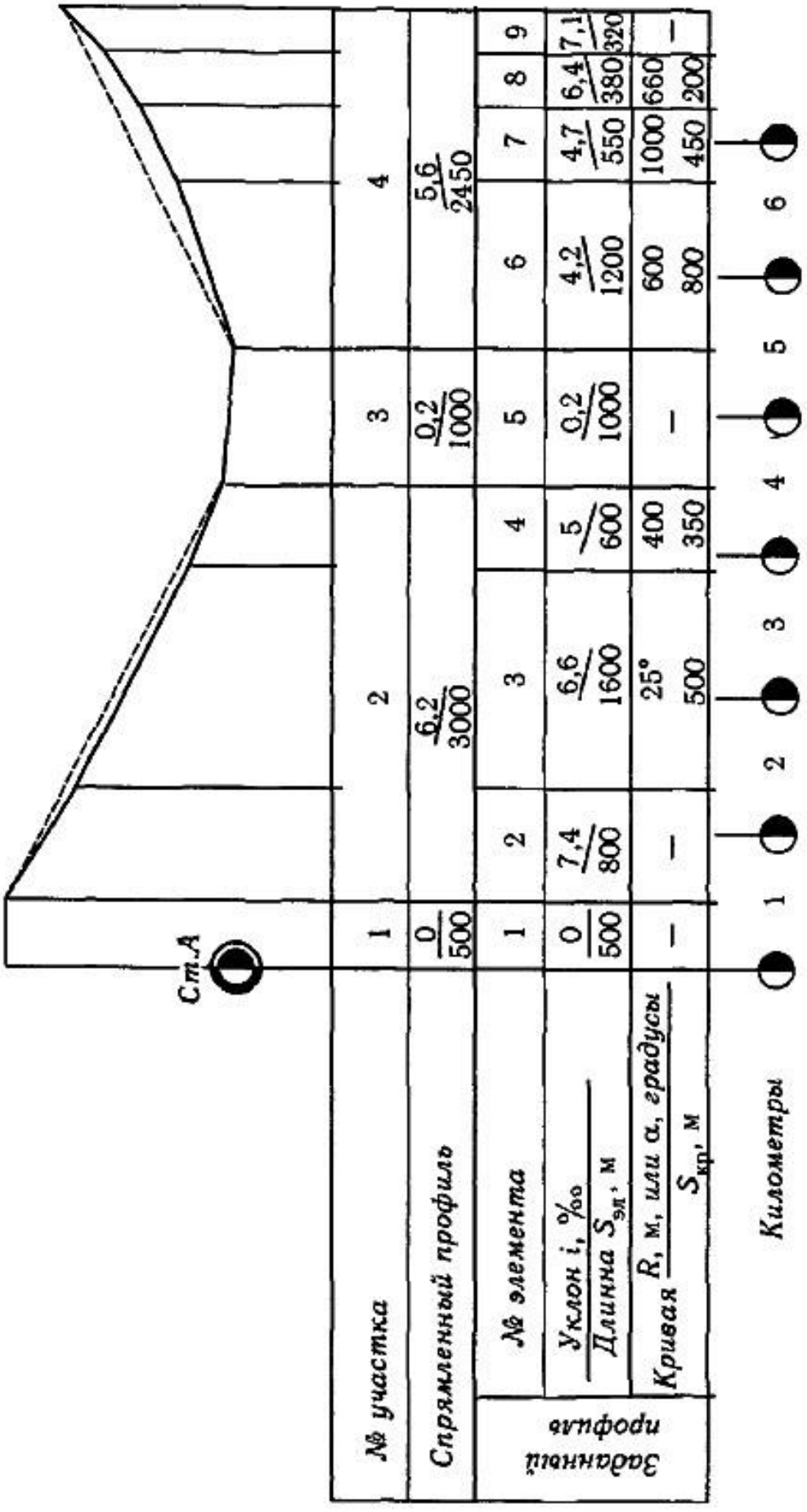


Рис. 8.7. Спрямление и приведение профиля пути

Решение: 1. Из анализа графика профиля пути видно, что он состоит из четырех групп элементов 1, 2…4, 5 и 6…9. Элемент 1 расположен на станции и спрямлению с прилежащим элементом не подлежит.

2. Спрямляем элементы 2…4; формула (8.15):

$$i_c = \frac{\sum i_i s_i}{\sum s_i} = \frac{7,4 \cdot 800 + 6,6 \cdot 1600 + 5,0 \cdot 600}{3000} = 6,5‰.$$

2.1. Проверяем каждый элемент на допустимость спрямления по формуле (8.17):

элемент 2: $800 \le \frac{2000}{7,4-6,5} = 2222$ м – условие выполняется;

элемент 3: $1600 \le \frac{2000}{6,6-6,5} = 20000$ м – условие выполняется;

элемент 4: $600 \le 1333$ м – условие выполняется. $5,0 < 6,5$

Следовательно, спрямление элементов 2…4 допустимо. Полученные данные заносим в графы 6 и 7 таблицы 8.2.

2.2. При группировке элементов можно было попытаться к элементам 2…4 добавить элемент 5, тогда $i_c = 4,9‰$. При проверке элемента 5 получим: $2000 - 1000 = 425$ м – условие не выполняется. Поэтому спрямлять элементы 4,9 – 0,2 2…5 нельзя.

2.3. фиктивный подъем от кривых на спрямленном участке определяем по формулам (8.20) и (8.21) и результаты суммируем:

$$i_c = 12,2\frac{25}{3000} + \frac{700}{3000} + \frac{350}{400} = 0,3‰.$$

Этот результат заносим в графу 8 таблицы 8.2.

2.4. Приведенный или окончательно спрямленный уклон равен: $i_c = 6,5 - 0,3 = 6,2‰$.

Результат расчета заносим в графу 9 таблицы 8.2. В графу 10 заносим второй спрямленный участок (вместо 2, 3, 4 элементов).

3. спрямляем элементы 6…9: i_c' определяем по формуле (8.15) –

$$i_c = \frac{4,2 \cdot 1200 + 4,7 \cdot 550 + 6,4 \cdot 380 + 7,1 \cdot 320}{2450} = 5,0‰.$$

3.1. Проверяем элементы на допустимость спрямления по формуле (8.17):

элемент 6: $1200 \le \frac{2000}{5,0-4,2} = 2500$ м – условие выполняется;

элемент 7: $550 \square \frac{2000}{5{,}0-4{,}7} \square 6667$ м – условие выполняется;

элемент 8: $380 \square \frac{2000}{1429 \text{ м}}$ – условие выполняется; $5{,}0 \square 6{,}4$

элемент 9: $320 \square \frac{2000}{952 \text{ м}}$ – условие выполняется. $5{,}0 \square 7{,}1$

3.2. Фиктивный подъем от кривых определяем по формуле (8.20).

$$i_{c} \square \square \frac{700}{2450} \square \square \frac{800}{600} \square \frac{450}{1000} \square \frac{200}{660} \square \square \square 0{,}6 \text{ ооо}.$$

3.3. Окончательный подъем спрямленного (приведенного) профиля равен: $i_c \square 5{,}0 \square 0{,}6 \square 5{,}6^{o}_{oo}$.

Результаты расчетов показаны в таблице 8.2 и на рисунке 8.7 в двух верхних строках. Заданный профиль на рисунке 8.7 изображен сплошными линиями, а приведенный – штриховыми.

4. Если четвертый спрямленный участок является труднейшим подъемом на всем плече или направлении, то его длину нужно уменьшить с тем, чтобы она не превышала длины поезда. Условно примем длину поезда 1250 м. Очевидно, что наиболее тяжелым будет спрямленный участок из элементов 7, 8 и 9. Спрямим эти элементы.

По формуле (8.15): $i_{c} \square \frac{4{,}7 \cdot 550 + 6{,}4 \cdot 380 + 7{,}1 \cdot 320}{1250} \square 5{,}8^{o}_{oo}$.

Проверим 7 элемент на допустимость спрямления по формуле (8.17):

$550 \square \frac{2000}{5{,}8-4{,}7} \square 1818$ м – условие выполняется.

Остальные элементы можно не проверять, так как по сравнению с пунктом 3.1 разность $|i_{c} \square i_{c}|$ уменьшилась.

По формуле (8.20) определим:

$$i_{c} \square \square \frac{700}{1250} \square \square \frac{450}{1000} \square \frac{200}{660} \square \square \square 0{,}4 \text{ ооо}.$$

Окончательный подъем спрямленного (приведенного) профиля равен: $i_c \square 5{,}8 \square 0{,}4 \square 6{,}2^{o}_{oo}$.

Таким образом, наиболее тяжелым будет подъем 6,2 ‰, а не 5,6 ‰, как было получено при спрямлении элементов 6…9.

8.5. Аналитический метод решения уравнения движения поезда

Решение уравнения движения, определение масс составов, расхода энергии или топлива на движение поезда и проверка использования мощности локомотива относятся к тяговым расчетам.

В результате решения уравнения движения поезда заданной массы, определяют скорость движения в любой точке пути и время, необходимое на прохождение любого отрезка пути. Для этого вначале рассчитывают удельные ускоряющие и замедляющие силы при всех возможных скоростях движения.

Аналитический метод решения уравнения движения поезда состоит в следующем. Считая неизменной ускоряющую силу в любом интервале скоростей, получают равноускоренное движение, для которого справедливо равенство:

$$v_2 = v_1 + a\Delta t;$$

где v_1 – скорость в начальное время (t = 0); v_2 – скорость в конце отрезка времени; a – ускорение движения; Δt – отрезок времени, в течение которого определяют изменение скорости.

Отсюда отрезок времени равен:

$$\Delta t = (v_2 - v_1)/a = \Delta v/a;$$

где $\Delta v = (v_2 - v_1)$ – приращение скорости за время Δt.

Если в это выражение подставить значение (a) из формулы (8.6) с учетом действия удельной ускоряющей силы в интервале скоростей Δv, то получим Δt:

$$\Delta t = \Delta v/(f_{y\,ср}) ; \qquad (8.24)$$

или, так как 1 ч = 60 мин, получим Δt:

$\Delta t = 60\Delta v/(f_{y\ ср})$. По формуле (8.24) определяют время, в течение которого скорость поезда, при действии заданной удельной ускоряющей (замедляющей) силы изменится в интервале Δv. При постоянной удельной ускоряющей силе промежуток времени Δt пропорционален скорости в пределах Δv.

Зависимость между проходимым поездом путем Δs в километрах и средней скоростью движения $v_{ср}$ находят из определения средней скорости $v_{ср} = \Delta s/\Delta t$, откуда:

$$\Delta s = v_{ср}\,\Delta t.$$

Подставив сюда значение Δt из (8,24) получают: $v_{ср}\Delta t$

$$\Delta s = \frac{\quad}{\Delta f_{y\,ср}}. \qquad (8.25)$$

Если заменить среднюю скорость движения полусуммой начальной v_1 и конечной v_2 скоростей $v_{ср} = (v_1 + v_2)/2$ и подставить значение t из формулы (8.24), то путь можно вычислить так:

$$s = \frac{v_1 + v_2}{2} \cdot \frac{v}{f_{y\,ср}};$$

Или, так как $v = v_2 - v_1$ и $(v_2 - v_1)(v_2 + v_1) = v_2^2 - v_1^2$, получают:

$$s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 f_{y\,ср}}. \quad (8.26)$$

Учитывая, что 1 км = 1000 м, получают ***путь***:

$$s = \frac{500 (v_2^2 - v_1^2)}{f_{y\,ср}}. \quad (8.27)$$

По формулам (8.25)...(8.27) рассчитывают путь, проходимый поездом при изменении скорости от $\mathbf{v_1}$ до $\mathbf{v_2}$ под действием удельной ускоряющей (замедляющей) силы $f_{усp}$. При постоянной удельной ускоряющей силе путь s пропорционален разности квадратов конечной и начальной скоростей.

Формулы (8.24) и (8.25 или 8.26) позволяют определить время и путь в каждом интервале скоростей. Если необходимо знать значения t и s в нескольких интервалах скоростей, то расчеты проводят для каждого интервала, а результаты суммируют. Для наглядности полученные результаты можно изобразить на графиках.

Используя формулы (8.24) и (8.27) для расчета времени t движения грузового или пассажирского поездов, для которых $v = 120$ км/ч, получаем t и s: Н/кН

$$t = \frac{v}{2 f_{y\,ср}}; \quad (8.28)$$

$$4{,}17 (v_2^2 - v_1^2)$$

$$s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 f_{y\,ср}}.$$

Аналитический метод требует большого числа расчетов и значительных затрат времени. Поэтому его широко используют при расчетах на ЭВМ по заранее разработанным программам.

Пример: Определим путь, проходимый грузовым поездом, удельные ускоряющие силы для которого приведены на рисунке 8.8 и в таблице 8.3, в период

разгона на станции при $i = 0‰$ от 0 до 49,5 км/ч и необходимое для этого время.

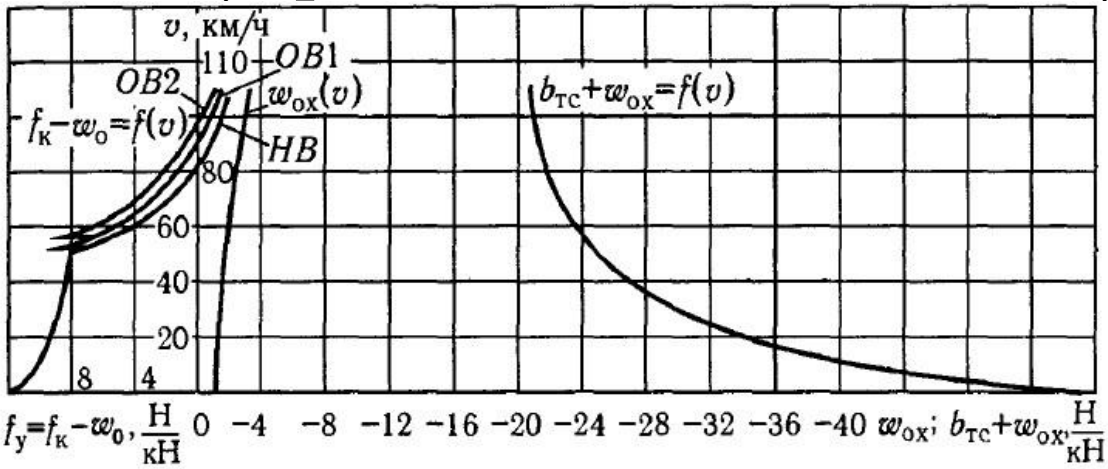


Рис. 8.8. Диаграмма удельных ускоряющих и замедляющих сил поезда с электровозом ВЛ80^С и составом массой 5000 т

Таблица 8.3

v, км/ч	w_0, Н/кН	$F_к$, кН			$f_к$, Н/кН			$f_к - w_0$, Н/кН		
		НВ	ОВ1	ОВ2	НВ	ОВ1	ОВ2	НВ	ОВ1	ОВ2
0	1,01	678	-	-	13,31	-	-	12,30	-	-
10	1,01	584	-	-	11,47	-	-	10,46	-	-
20	1,10	551	-	-	10,82	-	-	9,72	-	-
20	1,21	526	-	-	10,33	-	-	9,11	-	-
40	1,36	509	-	-	9,99	-	-	8,64	-	-
49.5	1,52	491	-	-	9,64	-	-	8,12	-	-
51.5	1,56	451	526	-	8,85	10,33	-	7,30	8,77	-
54.5	1,62	-	457	514	-	8,97	10,09	-	7,36	8,48
60	1,73	292	350	424	5,73	6,87	8,32	4,00	5,14	6,60
70	1,96	188	243	296	3,69	4,77	5,81	1,74	2,82	3,86
80	2,21	130	182	218	2,55	3,57	4,28	0,34	1,36	2,07
90	2,49	94,6	141	170	1,86	2,77	3,34	- 0,63	0,28	0,85
100	2,80	74,0	109	134	1,45	2,14	2,63	- 1,35	- 0,66	- 0,17
110	3,14	59,3	84,3	106	1,16	1,66	2,08	- 1,97	- 1,48	- 1,06

Решение: Интервалы скорости v принимаем равным 10 км/ч.

1.1. При изменении скорости в переделах 0 – 10 км/ч среднее значение удельной ускоряющей силы равно:

$$f_{уср1} = \frac{f_к - w_0 - v_0 + f_к - w_0 - v_{10}}{2} = \frac{12,30 + 10,46 + 11,38}{2}$$ Н/кН.

По формулам (8.28) получим:

$$t_1 = 10/(2 \cdot 11,38) = 0,44 \text{ мин};$$

$$s_1 = 4,17 \cdot (10^2 - 0^2)/11,38 = 36,6 \text{ м}.$$

1.2. При изменении скорости от 10 до 20 км/ч:

$$f_{уср2} = \frac{10,46 + 9,72}{2} = 10,09 \text{ Н/кН};$$

$$t_2 = 10/(2 \cdot 10,09) = 0,50 \text{ мин};$$

$$s_2 = 4,17 \cdot (20^2 - 10^2)/10,09 = 124,0 \text{ м}.$$

1.3. При изменении скорости от 20 до 30 км/ч:

$$f_{уср3} = \frac{9,72 + 9,11}{2} = 9,42 \text{ Н/кН};$$

$$t_3 = 10/(2 \cdot 9,42) = 0,53 \text{ мин};$$

$$s_3 = 4,17 \cdot (30^2 - 20^2)/9,42 = 221,3 \text{ м}.$$

1.4. При изменении скорости от 30 до 40 км/ч:

$$f_{уср4} = \frac{9,11 + 8,64}{2} = 8,88 \text{ Н/кН};$$

$t_4 = 10/(2 \cdot 8,88) = 0,56$ мин; $s_4 =$

$4,17 \cdot (40^2 - 30^2)/8,88 = 328,7$ м.

1.5. При изменении скорости от 40 до 49,5 км/ч:

$$f_{уср5} = \frac{8,64 + 8,12}{2} = 8,38 \text{ Н/кН};$$

$$t_5 = 10/(2 \cdot 8,38) = 0,57 \text{ мин};$$

$s_5 = 4,17 \cdot (49,5^2 - 40^2)/8,38 = 423,0$ м. 1.6. Время разгона поезда.

□t □ □t_1 □ □t_2 □ □t_3 □ □t_4 □ □t_5 □ 0,44 □0,50 □0,53□ 0,56 □0,57 □ 2,60 мин;

1.7. Путь, который пройдет поезд при разгоне.

□s □ □s_1 □ □s_2 □ □s_3 □ □s_4 □ □s_5 □ 36,6□124,0□ 221,3□328,7 □ 423,0 □1134,0 м.

Полученные значения □v, □t и □s показаны на графиках v(t) (см. рис. 8.9, а), v(s) (см. рис 8.9, б), t(s) (см. рис. 8.9, в).

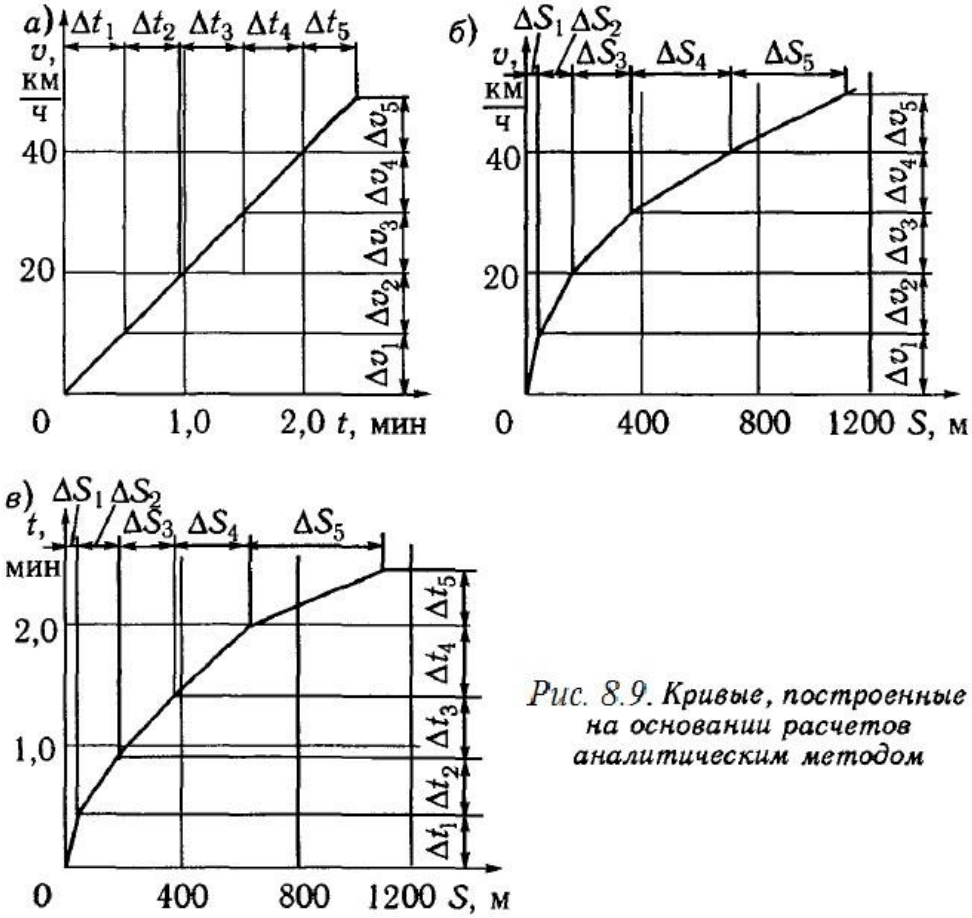


Рис. 8.9. Кривые, построенные на основании расчетов аналитическим методом

8.6. Графический метод решения уравнения движения поезда

Этот метод основан на геометрической связи между удельными ускоряющими или замедляющими силами в каждом интервале скоростей, временем хода и проходимым путем.

Построение кривой скорости в функции пути. Наиболее наглядно характер движения поезда определяет кривая зависимости скорости от пути. Рассмотрим условия построения такой зависимости с использованием линейки и угольника методом, рекомендованным РЖД (метод предложен А.И. Липецем).

На рис. 8.10 в левой части показана диаграмма удельных ускоряющих сил, построенная в определенных масштабах. Скорость отложена в масштабе m□ □____ мм □ □ (1 км/ч соответствует m, мм, на графике), удельные ускоряющие □км/ч□

силы в масштабе $k = \frac{\text{мм}}{\text{Н/кН}}$. Взятый произвольно интервал скоростей Δv на диаграмме удельных ускоряющих сил будет равен отрезку Δvm. В этом интервале действует средняя ускоряющая сила $f_{уср}$, равная на графике отрезку $f_{уср}k$.

Чтобы построить график изменения скорости в функции пути, в правой части рис. 8.10 нужно подготовить оси координат. Путь Δs, проходимый поездом при изменении скорости в интервале Δv, пока можно определить аналитическим методом по формуле $\Delta s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 f_{уср}}$ и отложить на графике в масштабе пути **y** (мм/км) в виде отрезка **CE** $= \Delta sy$. Следовательно, поезд из точки **C** на графике попадает в точку **D,** соответствующую верхнему значению скорости в интервале Δv и пути в пределах Δs. Поскольку в интервале скоростей Δv удельную ускоряющую силу принимаем постоянной, движение поезда будет проходить по кривой **CD.** Если заменить ее прямой **CD,** то она будет наклонена к оси абсцисс под углом α. Этот угол и определяет степень изменения скорости в функции пути.

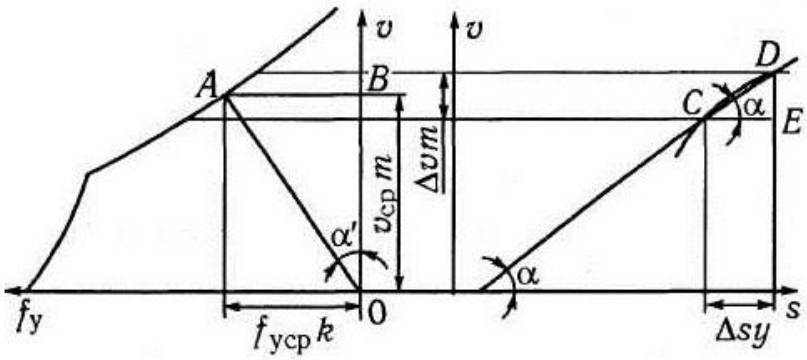


Рис. 8.10. Принцип построения кривой скорости в функции пути графическим методом

Рассмотрим условия, при которых прямая **CD** окажется перпендикулярной линии **OA,** соединяющей на графике точку **A** при средней скорости и средней удельной ускоряющей силе с началом координат. Для этого необходимо, чтобы угол α был равен углу α', а следовательно, были равны тангенсы этих углов – $\operatorname{tg}\alpha = \operatorname{tg}\alpha'$. Из прямоугольного треугольника **OBA** следует $\operatorname{tg}\alpha' = AB/OB$, а из прямоугольного треугольника **CED** – $\operatorname{tg}\alpha = DE/CE$. Если стороны треугольников заменить физическими величинами $AB = f_{y\,ср}k$; $OB = v_{ср}m$; $DE = \Delta vm$; $CE = \Delta sy$ и приравнять $\operatorname{tg}\alpha$ и $\operatorname{tg}\alpha'$, получим:

$$f_{уср}k \quad \Delta vm$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta sy} \qquad (8.29)\ v_{cp}m$$

Только при соблюдении этого равенства искомый отрезок прямой **CD** будет перпендикулярен к линии **OA.** Заменив v_{cp} через $\Delta s/\Delta t$ и взяв из формулы:

$$\Delta t = \Delta v/\Delta f_{y\,cp}, \text{ отсюда } f_{y\,cp} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = 1,$$

получим выражение (8.29) в виде:

$$\frac{\Delta v}{\Delta s} = k\,\frac{vm}{sy} \text{ или } k/\Delta m = m/y \qquad (8.30)$$

В выражение (8.30) входят масштабы построений и известный коэффициент **.** Следовательно, перпендикулярность линий **CD** и **OA** можно получить, задавшись масштабами построений, удовлетворяющих равенству (8.30). Наиболее удобные для построений три варианта масштабов приведены в таблице 8.4. В случае отклонения хотя бы одного масштаба от указанных в данной таблице построение не будет иметь никакого физического смысла, и полученные графики $v(s)$ не будут соответствовать действительности. Практически построение ведут так: к точкам **A** и **0** прикладывают линейку, к которой приставляют одной стороной прямого угла треугольник, вторая его сторона подводится к точке **C,** и проводят перпендикулярный отрезок **CO** в пределах скоростей Δv.

Таблица 8.4

Величина	Обозначение масштаба	Значение масштаба, мм						
		для грузовых и пассажирских поездов			для электропоездов		для тормозных и специальных расчетов	
		Вариант						
		1	2	3	1	2	1	2
Сила 1 Н/кН	**k**	**12**	**6**	**10**	**2**	**3**	**2**	**1**
Скорость 1 км/ч	**m**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1,5**	**2**	**1**
Путь 1 км	**У**	**40**	**20**	**48**	**60**	**90**	**240**	**120**
Постоянная	**Δ**	**30**	**30**	**25**	**50**	**50**	**–**	**–**

Время 1 час	**X**	**600**	**600**	**600**	**–**	**–**	**–**	**–**
Время 1 мин.	**x**	**10**	**10**	**10**	**50**	**50**	**–**	**–**

Построение кривой времени в функции пути. Время, необходимое для движения поезда, определяют по средней скорости движения и пройденному пути. При графическом построении кривой времени в функции пути методом, рекомендованным РЖД, используют кривую v□s□. На рис. 8.11 приведена эта кривая (линия **0CD**). При изменении скорости в пределах □v поезд проходит расстояние □s.

Скорость и путь отложены в масштабах m и y. Чтобы определить время □t, необходимое для прохождения поездом отрезка пути □s при изменении скорости в пределах □v, можно воспользоваться уравнением (8.24). Значение $f_{уср}$ берут из диаграммы удельных ускоряющих или замедляющих сил. Полученное время □t откладывают на графике t□s□ в пока еще произвольном масштабе **X** (отрезок **K□O□**).

Изменение времени в функции пути на отрезке □s показывает отрезок прямой **L□O□.** Этот отрезок получен с использованием аналитического метода решения уравнения движения поезда. А нельзя ли получить направление искомой линии **L□O□,** пользуясь линейкой и угольником? Эту задачу решил автор Г.В. Лебедев.

Отложим от начала координат влево пока произвольный отрезок □ и через полученную точку **K** проведем вертикальную линию, на которую нужно снести средние скорости движения. В выбранном интервале □v средняя скорость, отложенная в масштабе m,снесена влево до построенной вертикальной линии, и получена точка **L.** Рассмотрим условия, при которых искомый отрезок линии изменения времени в функции пути **L□O□** будет перпендикулярен линии **0L,** соединяющей точку **L** с началом координат. Этого достигнут при равенстве углов □ и □□, а значит, и их тангенсов, значения которых определяют из прямоугольных треугольников **0KL** и **0□K□L□:**

KL K□L□

$$tg\beta = \frac{}{0K}; \quad tg\beta' = \frac{}{0'K'}.$$

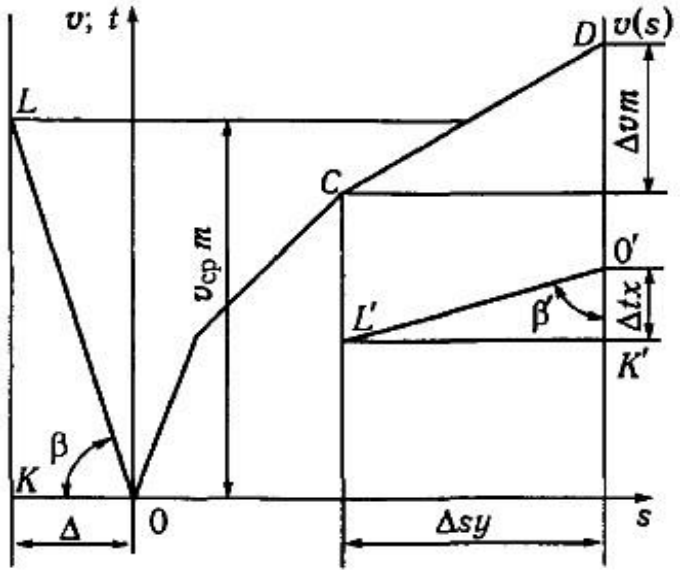


Рис. 8.11. Принцип построения кривой времени в функции пути

Заменив стороны треугольников их физическими значениями и приравняв, получим:

$$\frac{v_{ср}m}{} = \frac{sy}{}.$$

Так как $\Delta s/\Delta t \approx v_{ср}$, получим условие перпендикулярности искомой линии **L□O□** к линии **0L:**

$$\frac{m}{} = \frac{y}{} \quad . \qquad (8.31)$$

В это равенство входят масштабы построений и отрезок □. Поскольку масштабы m и y уже выбраны при построении кривой скорости в функции пути, здесь нужно задаться, например, масштабом **X,** и из равенства (8.31) определить отрезок □**.** При соблюдении равенства (8.31) в каждом отрезке пути нужно взять среднюю скорость движения, снести ее на вертикальную линию, проведенную на расстоянии □ влево от начала координат, и к полученной точке **L** и началу координат **0** приложить линейку.

К линейке прикладывают одной стороной угольник. Вторую сторону подводят к точке **L□** и проводят линию **L□O□,** показывающую изменение

времени в функции пути на каждом отрезке s. Наиболее удобные для построения масштабы **X** и отрезки приведены в табл. 8.4. В ней приведен также масштаб **x** для получения времени в минутах.

В связи с тем, что построение кривых vs и ts графическим методом позволяет наглядно показать скорости и времена хода поезда на участке, необходимо рассмотреть наиболее характерные случаи этих построений.

8.7. Практические приемы построения кривых скорости и времени в функции пути

Кривую скорости в функции пути строят по спрямленному и приведенному профилю пути, который наносят на лист миллиметровой бумаги в выбранном из табл. 8.4 масштабе. Затем рассчитывают и строят в масштабах, взятых из той же графы табл. 8.4, диаграмму удельных ускоряющих сил в режиме тяги для тех ходовых позиций, которые будут использоваться при построении кривой vs, и диаграмму удельных замедляющих сил в режимах выбега и торможения (обычно служебного).

Если участок, на котором будут строить кривую vs, имеет протяженность 20...30 км, диаграмму удельных ускоряющих и замедляющих сил можно вычерчивать в левой части листа миллиметровой бумаги перед профилем пути. При больших расстояниях ее целесообразно строить на отдельном листе и подкалывать к графику vs, соблюдая параллельность осей координат. По мере построения кривой vs диаграмму переносят вправо по листу графика.

Построение начинают, используя режим тяги, задаваясь интервалом скоростей 10 км/ч (рис. 8.12). Отмечают на диаграмме среднюю удельную ускоряющую силу при средней скорости $v_{ср}$ 5 км/ч (точка **a**). Поскольку трогание происходит на станции, где обычно i 0, линейку прикладывают к точке **a** и к началу координат (точка **0**). Его вторая сторона покажет направление первого отрезка кривой скорости vs. Угольник смещают по линейке до оси станции **A** при **v = 0,** и через эту точку проводят отрезок **0a** кривой скорости в функции пути в интервале скоростей 0...10 км/ч.

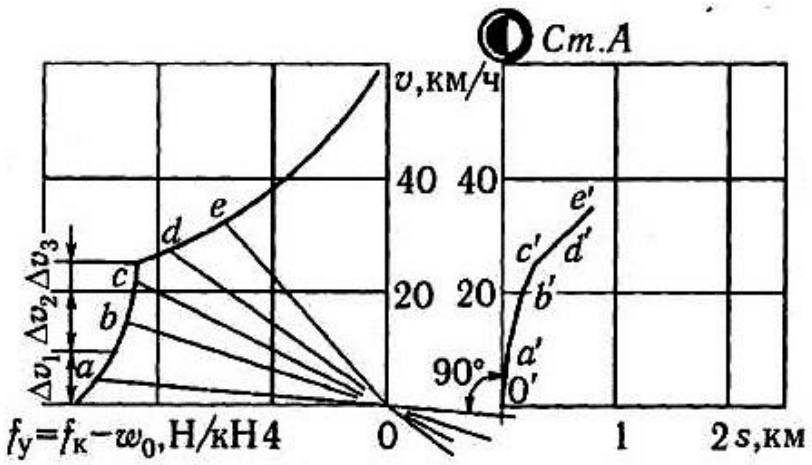


Рис. 8.12. Построение кривой скорости в функции пути при движении по горизонтальному прямолинейному пути

Далее в интервале скоростей 10...20 км/ч берут точку **b** при 15 км/ч, к ней и к началу координат приставляют линейку, а к линейке – угольник. Из точки (**a)** проводят перпендикуляр к линейке (отрезок **a□b□**) в интервале скоростей 10...20 км/ч и т.д. В случае излома линии удельных ускоряющих сил интервалы скорости необходимо брать до точки излома, а затем после нее.

На рис. 8.12 до скорости 25 км/ч использована кривая удельных ускоряющих сил, построенная на основании ограничения по сцеплению колес с рельсами, нанесенного на тяговые характеристики. Выше этой скорости использована сама тяговая характеристика.

В связи с изломом кривой удельных ускоряющих сил интервал берут от 20 до точки выхода на характеристику – 25 км/ч. Среднюю скорость определяют как сумму начальной скорости и половины приращения: $v_{ср}$ = 20 + 5/2 = 22,5 км/ч (точка **c**). В дальнейшем интервал скорости берут не более 5 км/ч (точка **d** при $v_{ср}$ = 27,5 км/ч в интервале 25...30 км/ч и т.д.).

Проекции отрезков **0□a□, a□b□** и т.д. на ось абсцисс показывают путь, пройденный поездом при изменении скорости соответственно от нуля до 10 км/ч, от 10 до 20 км/ч и т.д. (в масштабе **y**).

В диаграмме удельных ускоряющих сил не учтено дополнительное сопротивление движению, которое влияет на характер движения поезда. Например, если на рис. 8.13 удельная ускоряющая сила в точке **e** при движении по горизонтальному прямолинейному пути (на площадке) равна 5,7 Н/кН, то при движении по приведенному подъему в 3 ‰ сопротивление движению увеличится на 3 Н/кН, удельная ускоряющая сила уменьшится на эту величину: 5,7 – 3 = 2,7 Н/кН. Поэтому на диаграмме удельных ускоряющих сил точку **e** нужно сместить вправо на 3 Н/кН (точка $\mathbf{e_1}$).

Следовательно, для построения кривой скорости на подъеме 3 ‰ линейку нужно приставлять не к точке **e,** а к точке $\mathbf{e_1}$ и началу координат. Такое нахождение точек, аналогичных $\mathbf{e_1}$**,** затруднило бы построение кривой скорости в функции пути. На практике точку **e** не смещают, а мысленно смещают влево начало координат на число тысячных подъема или вправо на число тысячных спуска. В нашем случае начало координат нужно сместить влево на 3 Н/кН (точка $\mathbf{0_1}$) и приложить линейку к точкам **e** и $\mathbf{0_1}$**.** Как видно из графика (см. рис. 8.13), линия $\mathbf{0_1e}$ параллельна линии $\mathbf{0e_1}$ и перпендикуляры к ним будут иметь одно и то же направление

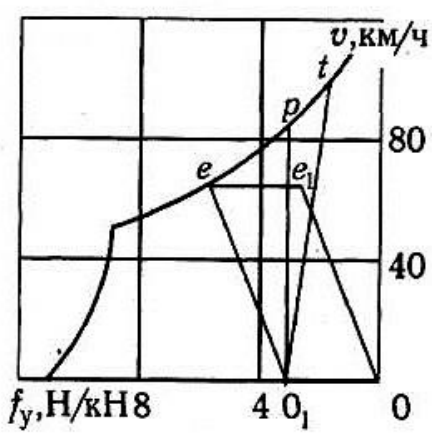


Рис. 8.13. Учет дополнительного сопротивления от подъема на диаграмме удельных ускоряющих сил

В том случае, когда удельная сила дополнительного сопротивления от подъема окажется равной удельной ускоряющей силе, определенной без учета сил дополнительного сопротивления движению (в нашем случае $i = w_i =$ 5,7 Н/кН), начало координат окажется под точкой **e.** Линейка расположится вертикально, а перпендикулярная линия – горизонтально, что соответствует равномерной скорости движения (так как ускоряющая сила оказывается равной нулю). Используя эти зависимости, можно определить установившуюся скорость на любом подъеме. Для этого на диаграмме удельных ускоряющих сил откладывают влево от начала координат отрезок, равный числу тысячных подъема, и из полученной точки проводят вертикаль до пересечения с кривой f_y □v□. Точка пересечения покажет установившуюся скорость движения. Так, на рис. 8.13 видно, что на подъеме 3 ‰ установившаяся скорость будет равна 83 км/ч (точка **p**).

Если скорость движения окажется меньше установившейся, то она будет возрастать, так как сила тяги превышает силы основного и дополнительного сопротивлений движению.

В том случае, когда скорость движения больше установившейся, сила тяги оказывается меньше сил основного и дополнительного сопротивлений движению, и скорость будет уменьшаться. На графике рис. 8.13, например, при скорости 64 км/ч на подъеме 3 ‰ будет ускоренное движение, а при скорости 100 км/ч – замедленное, что видно по углу наклона отрезков $\mathbf{0_1e}$ и $\mathbf{0_1t}$**.**

Это правило используется для определения характера изменения скорости движения. В случае, когда вместо уменьшения скорости величина □v будет ошибочно взята в сторону увеличения, или наоборот, ошибка будет обнаружена

при построении линии v(s), так как не будет достигаться конечная скорость в интервале □v.

На рис. 8.14 показаны кривые удельных ускоряющих сил электровоза переменного тока при работе на нормальном возбуждении **НВ** и двух ступенях ослабления возбуждения **ОВ1** и **ОВ2.** При скорости $\mathbf{v_1}$ заканчивается разгон. Чтобы полностью использовать мощность тяговых двигателей, необходимо при скорости v_2 перейти на характеристику ослабленного возбуждения **ОВ1,** а при скорости v_3 – на характеристику **ОВ2.** В правой части рис. 8.14 под осью абсцисс показан приведенный профиль пути.

Кривую **v(s)** после выхода на характеристику **НВ** в точке **1** строят, используя интервал скоростей $v_1 \ldots v_2$ (47...50 км/ч), где удельная ускоряющая сила изменяется по отрезку кривой f_y (v) **1 - 2,** а среднее ее значение 8,8 Н/кН находят при $v_{ср}$, равной 48,5 км/ч (точка **k**). Отрезок линии **v(s)** в этом интервале скоростей проводят перпендикулярно линии **0k** (отрезок **l□k□**). Если интервал скоростей $v_1 \ldots v_2$ превышает 5 км/ч, то его нужно разбить на два отрезка с $\Delta v < 5$ км/ч.

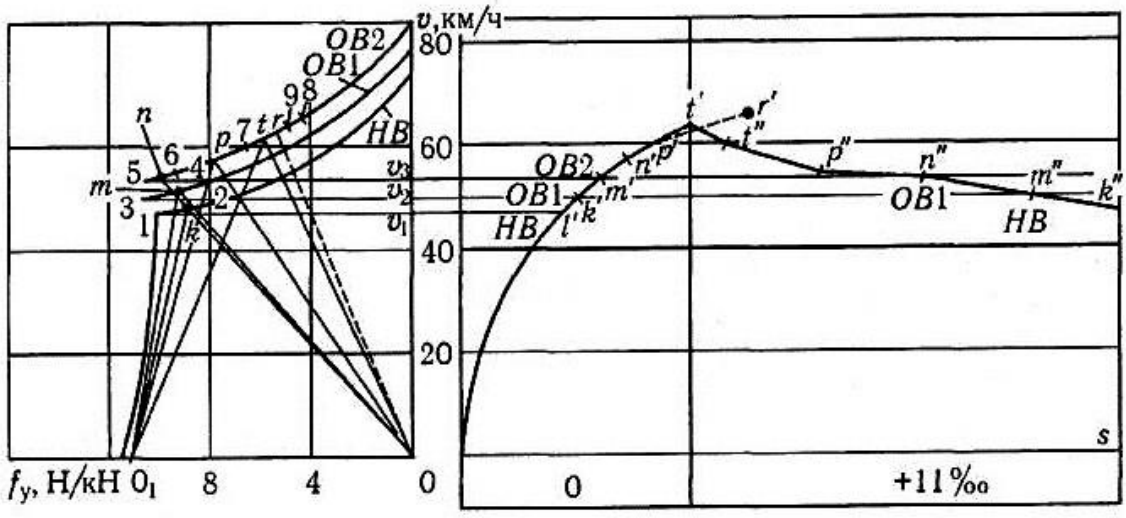


Рис. 8.14. Построение кривой скорости в режиме тяги

При скорости $\mathbf{v_2}$ переходят с нормального возбуждения **НВ** на ослабленное **ОВ1.** В интервале скоростей $v_2 \ldots v_3$ (50...53 км/ч) используют отрезок **3 – 4** кривой f_y(v) при **ОВ1.** Среднее значение 9,2 Н/кН находят при скорости 51,5 км/ч (точка **m**). Отрезок **k'm'** строят как перпендикуляр к линии **0m.**

Далее переходят на характеристику ослабленного возбуждения **ОВ2** и строят график **v(s),** задаваясь интервалами скоростей до 5 км/ч. Удобно взять первый интервал от скорости $\mathbf{v_1}$ до скорости, кратной 5 км/ч (в нашем случае от 53 до 55 км/ч), а далее – по 5 км/ч. Среднее значение удельных ускоряющих сил, изменяющихся по отрезкам **5 – 6** и **6 – 7** линии f_y(v) берут соответственно при 54 км/ч (точка **n**) и 57,5 км/ч (точка **p**).

Изменения режима работы локомотива необходимо отмечать на графике v(s). Так, на рис. 8.14 выход на характеристику нормального возбуждения отмечен буквами **НВ,** переходы на ослабление возбуждения – буквами **ОВ1** и **ОВ2.** Отметки нужно делать также при обратном переходе с **ОВ2** на **ОВ1,** при переходах на выбег, торможение и т.д.

Если при дальнейшем построении кривой v(s) взять интервал скоростей 60...65 км/ч, приложить линейку к точкам **r** и **0** и построить отрезок **p□r□,** то окажется, что верхнее значение скорости в выбранном интервале достигается за пределами горизонтального прямолинейного участка пути, где на ускорение поезда будут влиять дополнительные сопротивления от приведенного подъема 11 ‰.

Если взять отрезок линии **p□r□,** находящийся в пределах первого элемента профиля (от 60 до 62 км/ч), то допустим ошибку, так как в пределах этих скоростей действует средняя удельная ускоряющая сила, большая, чем в точке **r.** Чтобы кривая **v(s)** при движении по первому элементу профиля пути (i □ 0**)** соответствовала действительности, нужно уменьшить интервал и подбором найти такое значение, при котором поезд подойдет к границе элементов со скоростью, равной верхней (а при снижении скорости – нижней) границе интервала.

На графике $f_y(v)$ подбором установили, что интервал скоростей нужно взять в пределах 60...63 км/ч (отрезок **7 – 9**). Среднее значение удельной ускоряющей силы $f_{уср}$ = 5,7 Н/кН берут при $v_{ср}$ = 61,5 км/ч в точке **t,** и проводят отрезок **p□t□.** Начиная с точки **t□,** поезд движется по подъему 11 ‰. Для построения кривой **v(s)** на этом подъеме устанавливают, как будет изменяться скорость — увеличиваться или уменьшаться.

В нашем случае установившаяся скорость на подъеме 11 ‰ меньше 63 км/ч, следовательно, скорость будет уменьшаться. Интервал снижения скорости удобно принять с 63 до 60 км/ч; $f_{y\ ср}$ находят в точке **t** при $v_{ср}$ = 61,5 км/ч. Для учета подъема 11 ‰ начало координат мысленно перемещают влево в точку $\mathbf{0_1}$, соответствующую f_y = 11 Н/кН и, приложив линейку к точкам **t** и $\mathbf{0_1}$ проводят перпендикуляр – отрезок **t□t□□.** Далее берут интервал скоростей 60...55 км/ч, и прикладывают линейку к точкам **p** и $\mathbf{0_1}$ и строят отрезок кривой v(s) **t"p".**

Аналогично строят отрезки кривой v(s) **p"n", n"m"** и т.д., используя на кривой $f_y(s)$ точки **n, m** и т.д. При скорости 53 км/ч в точке **n"** должен быть переход с **ОВ2** на **ОВ1,** а при скорости 50 км/ч – в точке **m** на **НВ.**

Переход с режима тяги на режим выбега при построении сводится к использованию кривой удельных замедляющих сил при выбеге $w_{ox}(v)$ вместо кривой удельных ускоряющих сил при тяге, начиная с той скорости, при которой перешли на выбег.

На рис. 8.15 показано построение кривой **v(s)** в режиме выбега. Если на подъеме 5 ‰ перешли на выбег при скорости 70 км/ч, то под действием замедляющей силы w_{ox} скорость будет снижаться. Нужно задаться интервалом скорости не более 10 км/ч (Δv = 70...60 км/ч**)** и взять точку **a** на кривой замедляющих сил в режиме выбега при $v_{ср}$ = 65 км/ч. Приложив линейку к точкам **a** и $\mathbf{0_1}$**,** соответствующей подъему + 5 ‰, с помощью угольника получают отрезок **a□b□** □ $\mathbf{a0_1}$**,** который является отрезком линии v(s) в выбранном интервале скоростей.

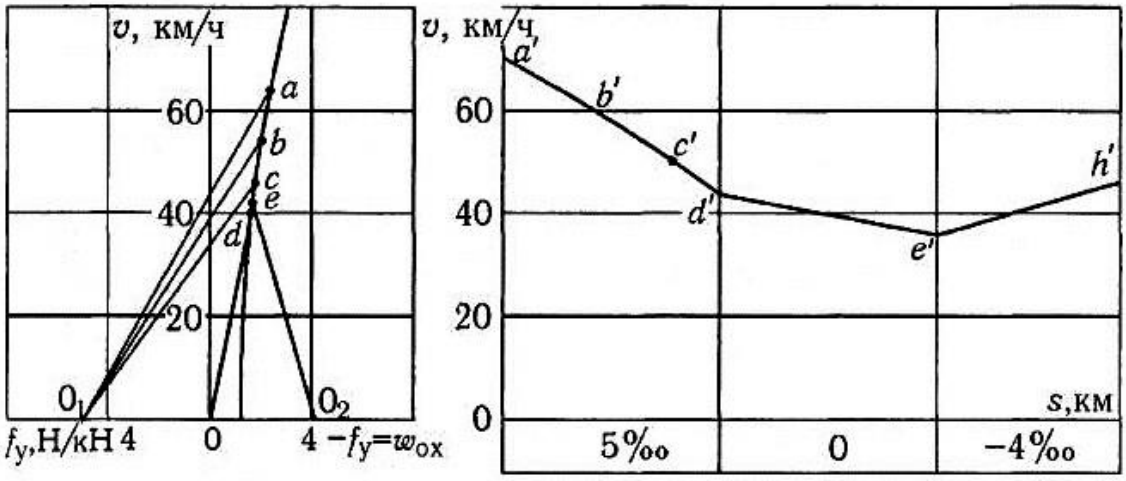


Рис. 8.15. Построение кривой скорости в режиме выбега

Аналогично строят отрезок **b□c□** в интервале 60...50 км/ч ($v_{ср}$ = 55 км/ч – точка **b**). Далее при подходе к границе элементов профиля пути подбором находят □v (50 ... 44 км/ч) и строят отрезок **c□d□** используя точку **c** при $v_{ср}$ = =47 км/ч. На втором элементе **(**i = 0**)** подбором находят снижение скорости от 44 до 36 км/ч и строят отрезок **d□e□** с использованием точки **d** при $v_{ср}$ = 40 км/ч. На спуске 4 ‰ установившаяся скорость движения, как видно из кривой w_{ox}(d), будет выше 80 км/ч. Следовательно, движение будет ускоренным. Принимают □v □10 км/ч в пределах 36...46 км/ч и строят отрезок **e□h□** как перпендикуляр к линии $\mathbf{e0_2}$ (точка **e** взята при $v_{ср}$ = 41 км/ч, а $\mathbf{0_2}$ соответствует спуску i = – 4 ‰).
Аналогично можно строить кривую и далее.

При включении механических тормозов переходят от кривой w_{ox}(v) на кривую замедляющих сил ($0{,}5b_т + w_{ox}$). На рис. 8.16 показана кривая замедляющих сил при служебном торможении $0{,}5b_T + w_{ox}$ = f (v). Рассмотрим построение кривой **v(s)** при переходе на режим служебного торможения на горизонтальном прямолинейном пути при скорости 80 км/ч.

В интервале скоростей от 80 до 70 км/ч использована точка **k** при $v_{ср}$ = 75 км/ч**.** Как перпендикуляр к линии **0k** построен отрезок **k□l□** кривой v(s). Затем

подбором найден интервал скоростей 70...66 км/ч и точка **l** при 68 км/ч. На основании прямой **0l** построен отрезок кривой **v(s) l□m□.** Далее, на спуске 10 ‰ (i = – 10 ‰) подбором найден интервал скоростей 66...58 км/ч. Приложив линейку к точкам **m** при v = 62 км/ч и $\mathbf{0_1}$**,** а к ней угольник, строят отрезок **m□n□** кривой v(s).

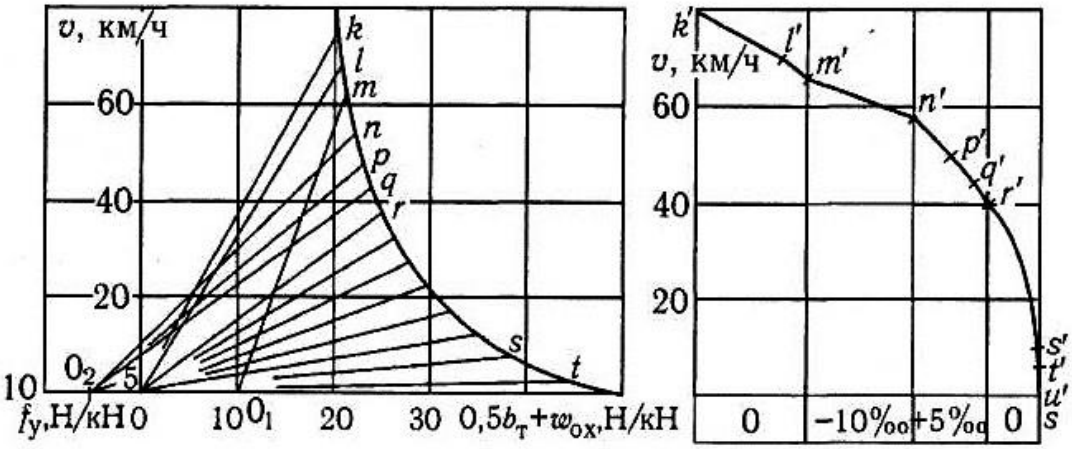


Рис. 8.16. Построение кривой скорости в режиме торможения

На подъеме 5 ‰ удобно выбрать интервал 58...50 км/ч. При $v_{ср}$ = 54 км/ч находят точку **n,** и линейку прикладывают к ней и точке $\mathbf{0_2}$**.** При снижении скорости интервалы нужно брать не более 5 км/ч. После перехода на элемент профиля пути i = 0 при 40 км/ч построение выполняют, используя точку **0** и точки на кривой удельных замедляющих сил при торможении.

При торможении перед остановками или местами с ограниченными скоростями движения, когда известна точка, к которой поезд должен подойти с известной скоростью (при остановке v = 0), выполняют обратное построение кривой скорости. Например, если нужно остановиться в точке **u□,** кривую v(s) строят следующим образом.

При снижении скорости от 5 км/ч до нуля берут на кривой удельных замедляющих сил точку **t** при $v_{ср}$ = 2,5 км/ч, и перпендикулярно линии **0t** проводят отрезок **u□t□** через точку **u□.** Затем в интервале скоростей 10...5 км/ч берут точку **s,** и перпендикулярно линии **0s** проводят отрезок **t's'** через точку **f** и т.д. Такое обратное построение используют и в других режимах для подхода с заданной скоростью к нужной точке.

В случае движения поезда по затяжному спуску скорость желательно поддерживать примерно постоянной, близкой к допустимой. Однако при использовании кривой замедляющих сил при торможении она будет уменьшаться до остановки поезда. Поэтому ее необходимо регулировать, используя поочередно режимы служебного торможения и выбега.

Например, если при движении поезда по затяжному спуску, на котором допускается скорость 70 км/ч, в режиме выбега скорость возрастает, то после достижения 70 км/ч нужно перейти на режим торможения, снижая скорость на 10...20 км/ч, затем снова перейти на выбег и т.д. При этом получается пилообразная линия v(s), характерная для механических тормозов. Необходимо отметить, что такой режим движения является условным, так как на самом деле машинист может регулировать тормозную силу, а не поддерживать ее на уровне $0{,}5\ b_т$.

Чтобы упростить расчеты при движении поезда по затяжному спуску длиной до 10 км и крутизной до 18 ‰, ПТР разрешено строить кривую v(s) в виде горизонтальной линии, проведенной ниже допустимой скорости на величину Δv, значения которой приведены в табл. 8.5.

Таблица 8.5

Тип поезда	Δv, км/ч, при движении по спуску (с учетом кривой), ‰							
	4	6	8	10	12	14	16	18
Грузовой	4	4	4	4	5	6	7	8
Пассажирский	2	2	3	4	6	7	8	9

На спуске до 4 ‰ величину Δv принимают равной нулю. При использовании электропневматических тормозов в пассажирских поездах на спусках до 6 ‰ значения Δv берут из табл. 8.5, а на более крутых ее принимают равной 3 км/ч независимо от крутизны спуска.

Для более полного использования кинетической энергии поезда скорость в конце спуска перед подъемом должна быть наибольшей допустимой по условиям безопасности движения поездов, условиям остановки поезда в пределах заданного тормозного пути, состоянию пути или подвижного состава.

Если применяется электрическое торможение, то должны быть рассчитаны и построены удельные замедляющие силы с использованием тех тормозных характеристик рекуперативного или реостатного торможения $B_{тр}$ которые будут использованы при движении поезда по формуле:

$$f_{зр} = \frac{B_{тр}}{mg} - w_0.$$

Кроме характеристик рассчитывают так же замедляющие силы при ограничениях (по сцеплению или току, соотношению токов якоря и возбуждения тяговых электродвигателей и т.д.) и наносят на график $f_{зр} = v$.

В случае использования системы автоматического поддержания скорости движения на затяжных спусках принимают неизменные скорости, на 2 ... 3 км/ч меньше допустимой.

Построение кривой времени в функции пути по кривой скорости приведено на рис. 8.18. Построенная ранее кривая скорости **0ABCDEG** в масштабах, взятых из табл. 8.4, состоит из отрезков **0A, AB, BC** и т.д. Для построения первого отрезка кривой времени в функции пути берут $v_{ср}$ на первом отрезке **0A** (точка **a**), переносят эту скорость на линию **kd**, проведенную на расстоянии **Δ**, взятом из табл. 8.4, от начала координат влево (точка **a**). К точкам **a'** и **0** прикладывают линейку, а к ней – угольник с таким расчетом, чтобы провести отрезок перпендикулярной линии через точку **0** в пределах Δs_1 (отрезок $\mathbf{0A_1}$).

Ордината точки $\mathbf{A_1}$ в масштабе **x** показывает время, необходимое для движения поезда в интервале скоростей **0A** или прохождения отрезка пути Δs_1. Далее берется отрезок **AB** линии **v(s)** и точка **b** (при $v_{ср}$). Снеся ее влево, получают точку **b**. Перпендикуляр к линии **0b'** проводят через конец отрезка $\mathbf{0A_1}$ в пределах пути Δs_2 и получают второй отрезок кривой времени и т.д.

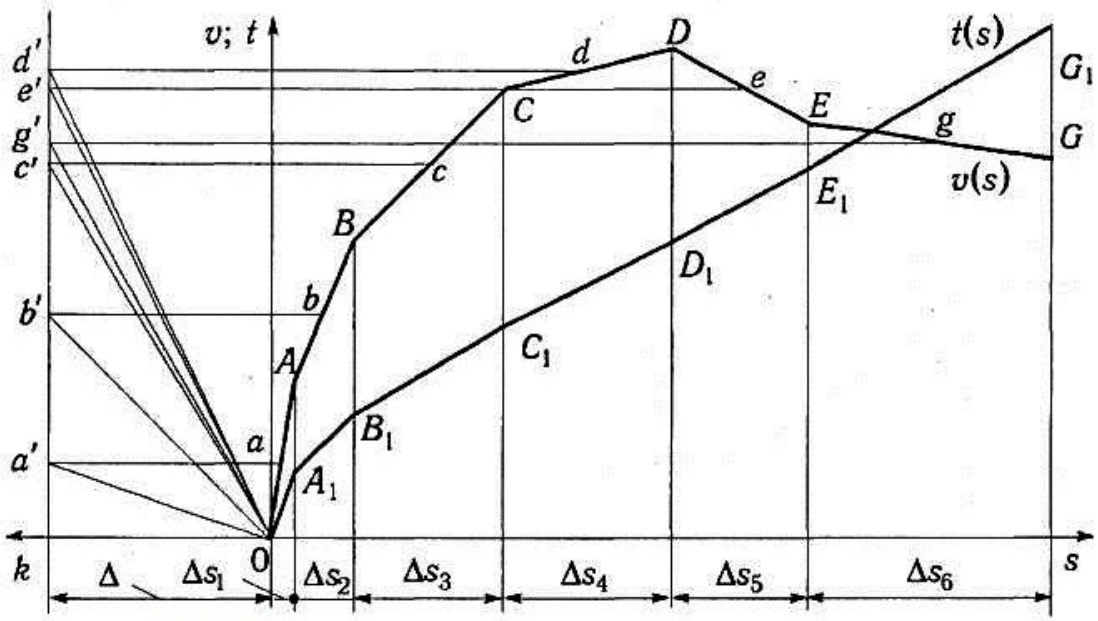


Рис. 8.17. Построение кривой времени в функции пути

Как видно из графика, принцип построения сохраняется и при увеличении, и при уменьшении скорости. Причем всегда точки на кривой **kd** соединяют с началом координат **0.** При движении поезда с меньшей скоростью линия t(s) идет круче (при v = 0 она вертикальна), а с увеличением скорости – более полого. Если поезд движется по длинному участку, то кривая времени может выйти вверх за пределы графика. Для устранения этого кривую t(s) обычно строят в пределах 10 минут, а затем опускают до оси абсцисс и продолжают построение.

При построении кривых скорости и времени в функции пути соблюдают следующие условия:

• учитывают, возможно, более полное использование мощности локомотива (движение на более высоких ступенях регулирования скорости с использованием ступеней ослабления возбуждения). Для расчетов при электрической тяге берут предпоследнюю ступень ослабления возбуждения (последняя остается в резерве у машиниста);

• кривые строят в двух вариантах: для движения без остановок и с остановками на раздельных пунктах. Разность времен хода дает время, затрачиваемое на остановки и разгоны поезда при движении с остановками;

• при проследовании участков с предупреждениями о снижении скорости кривые нужно строить с таким расчетом, чтобы не только середина (центр массы) поезда, но и его хвост и голова прошли весь данный участок, не превысив допустимую скорость;

• выдерживают установленные скорости проследования по парковым и станционным путям участковых станций от места отправления до выходных стрелок с учетом длины поезда.

В расчетах, выполняемых для составления графика движения поездов, полученные времена хода по перегонам можно корректировать по результатам опытных поездок.

8.8. Определение времен хода методом установившихся скоростей

Если требуется приближенно рассчитать времена хода, расхода электрической энергии или топлива и т.д. без больших затрат времени, то применяют упрощенные методы. Среди них наиболее распространен метод установившихся скоростей. Он основан на предположении, что на каждом элементе профиля пути поезд движется с установившейся скоростью, а при переходе с одного элемента на следующий она мгновенно изменяется до нового установившегося значения.

Равномерную или установившуюся скорость движения определяют по диаграмме удельных ускоряющих сил (см. рис. 8.13) или по нанесенным на тяговую характеристику

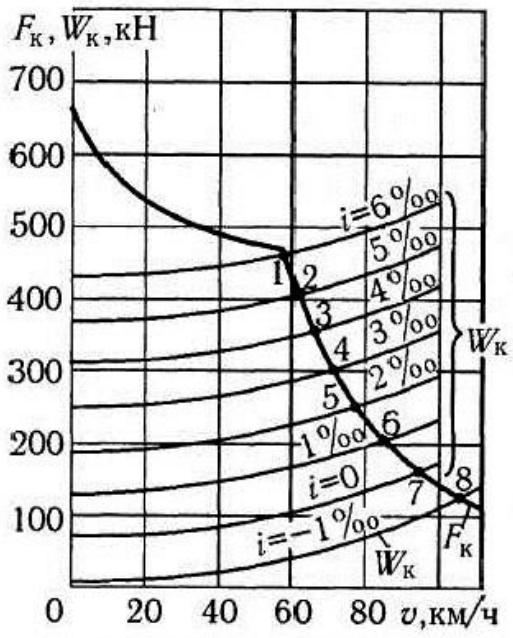


Рис. 8.18. Кривые $F_к(v)$ и $W_к(v)$ для определения установившихся скоростей на различных уклонах

силам общего сопротивления движению для каждого подъема. На рис. 8.18 приведены кривые сопротивления движению поезда на различных уклонах от – 1 до + 6 ‰, наложенные на тяговые характе-
ристики электровоза. Точки пересечения кривых $W_K(v)$ с тяговой характеристикой $F_K(v)$ показывают установившиеся скорости движения (точки 1 ... 8) на различных элементах профиля пути.

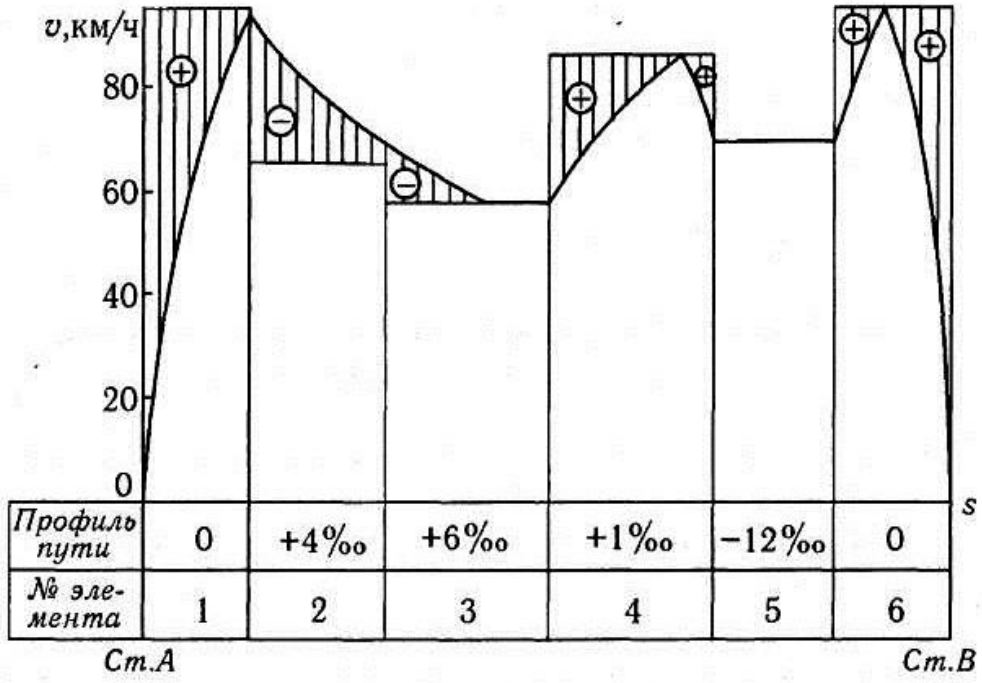


Рис. 8.19. График установившихся скоростей движения поезда по различным элементам профиля пути и принцип определения времени хода

На рис. 8.19 показан график v(s). По оси абсцисс отложен профиль пути перегона, горизонтальные линии соответствуют установившимся скоростям на каждом элементе, взятым из рис. 8.18. На первом элементе i = 0, скорость $v_{уст}$ = 95 км/ч (точка 7), на подъеме i = 4 ‰, $v_{уст}$ = 66 км/ч (точка 3) и т.д. Допустимую скорость на спуске для поездов, имеющих расчетный тормозной коэффициент не менее (0,33), рекомендуется устанавливать в зависимости от крутизны спуска. На спусках до 10 ‰ ее можно принять 90 км/ч, от 11 до 15 ‰ – 70 км/ч, от 16 до 20 ‰ – 55 км/ч, от 21 до 24 ‰ – 50 км/ч, от 25 до 30 ‰ – 40 км/ч. На пятом элементе профиля пути с i = – 12 ‰ скорость $v_{уст}$ = 70 км/ч.

Время движения поезда по каждому элементу профиля пути при равномерной скорости, мин, определяют по формуле: $t \approx 60s/v_{уст}$.

Чтобы определить время хода по перегону или участку, значения **t** на каждом элементе профиля пути суммируют. Результаты таких расчетов обычно сводят в таблицу следующей формы:

Перегон	№ элемента	Длина элемента, км	Уклон, ‰	Скорость установившегося движения, км/ч	Время прохождения элемента, мин	Поправка на разгон и замедление	Время хода по перегону

Однако поезд достигает установившейся скорости очень редко. На самом деле, на первом элементе идет разгон и скорость поезда, как правило, не достигает установившегося значения, на подъемах скорость может меняться. На рис. 8.20 на график установившихся скоростей наложена кривая скорости, полученная на основании построения кривых **v(s)** графическим методом.

Сравнивая скорости видим, что на первом элементе действительная скорость при разгоне не достигает установившегося значения. На втором элементе (подъеме 4 ‰) она снижается, но не достигает установившейся. На третьем элементе (подъеме 6 ‰) скорость уменьшается и достигает установившегося значения. При движении на четвертом элементе она снова возрастает и т.д.

Из-за этого скорость движения на первом, четвертом и шестом элементах будет больше действительной, на втором и третьем – меньше. Соответственно в обратной зависимости изменяются времена хода. Иногда для удобства расчетов используют величину $60/v_{уст}$, выражающую время прохождения 1 км пути.
Умножая ее на длину элемента, определяют время движения по нему.

Разница в действительной скорости движения и определенной методом установившихся скоростей на графике заштрихована с указанием превышения установившейся скорости над действительной (знак «+») или наоборот (знак «»). Из заштрихованных площадей видно, что без учета разгона поезда со станции **A** и замедления перед остановкой на станции **B,** разница в скоростях со знаком «+» и со знаком «-» примерно компенсируется, и ошибка в определении времени хода по перегону сравнительно небольшая. Причем она будет меньше для равнинного профиля пути с длинными, незначительно отличающимися по крутизне уклонами. При резком изменении крутизны ошибка возрастет.
Ошибка зависит также от жесткости характеристик, уменьшаясь при более жестких характеристиках.

Время $t_р$, необходимое на разгон поезда после остановки, и $t_т$, затрачиваемое на торможение до остановки на раздельном пункте, учитывают, вводя соответствующие поправки. Поправка на разгон поезда $t_р$ в среднем принимается 2 мин, на замедление поезда – 1 мин. Для электропоездов поправку на разгон принимают 0,5 мин, а на замедление – 0,4 мин.

Следовательно, время хода по перегону:

$$t_п = \frac{60 \cdot \overline{s_i}}{v_i} + t_р + t_т, \text{ мин.}$$

Чтобы снизить затраты времени на определение времени хода поезда по участку, элементы профиля пути разбивают на группы с одинаковыми уклонами, суммируют длины каждой группы и вычисляют суммарное время хода по каждой группе. Затем суммируют времена хода по всем группам и прибавляют время на один разгон и одно замедление, умноженное на число остановок на участке. Этот метод используют для оценки времени хода при предварительных прикидочных расчетах в случае, например, намечаемой электрификации участка.

Сравнительные расчеты с использованием метода установившихся скоростей и графического метода, проведенные для нескольких участков с различными профилями пути, показали, что разница в технических скоростях движения и временах хода составляет 4 ... 7 % при электрической тяге и 11 ... 17,5 % при тепловозной.

Тема 9
РАСЧЕТ МАССЫ ПОЕЗДА
9.1. Общие сведения

Масса состава – один из важнейших показателей, влияющих на эффективность работы железной дороги. Ее увеличение в допустимых пределах позволяет повысить провозную способность линий, снизить себестоимость и повысить экономичность перевозок, улучшить использование силы тяги и мощности локомотива, снизить расход электрической энергии или топлива на тягу поездов. Чрезмерно большая масса состава может вызвать преждевременный выход из строя оборудования локомотива.

Поэтому ***массу грузового состава*** рассчитывают, исходя из полного использования силы тяги локомотива при движении по наиболее тяжелому подъему. Затем ее проверяют по условиям трогания на раздельных пунктах, возможности расположения поезда в пределах длины приемо-отправочных путей на станциях и нагреванию тяговых электродвигателей или генераторов.

Массу состава пассажирских поездов с учетом категорий поезда (скорый, пассажирский), а также ускоренных грузовых и грузопассажирских поездов при движении по нескольким железным дорогам устанавливает РЖД.

Перед расчетом массы состава грузового поезда анализируют профиль пути на участке и выбирают наиболее тяжелый для движения поезда подъем, называемый ***расчетным,*** с учетом его крутизны и крутизны уклонов,

прилегающих к нему элементов профилю пути. Если наиболее крутой подъем имеет большую протяженность, и при движении по нему скорость будет снижаться и достигнет установившегося наименьшего значения, допустимого ПТР, то такой подъем принимают за расчетный. Наименьшую допустимую ПТР скорость движения по подъему называют ***расчетной скоростью,*** а реализуемую при этом локомотивом силу тяги – ***расчетной силой тяги.*** Если же наиболее крутой подъем имеет небольшую протяженность, а на подходах к нему расположены элементы, на которых поезд может разгоняться и создать запас кинетической энергии, то скорость на нем снижается, но установиться не успевает. Тогда выбор расчетного подъема усложняется, и массу поезда определяют с учетом использования запасенной в нем кинетической энергии.

На расчетном подъеме учитывают дополнительное сопротивление движению от спрямленного подъема и кривых, которые заменяют фиктивными подъемами в пределах спрямленного элемента. Если на наиболее трудном подъеме протяженностью более длины поезда находится одна или несколько кривых малого радиуса, то спрямленные элементы разбивают на элементы, длина которых должна быть не более длины поезда.

За расчетный подъем принимают тот из полученных приведенных элементов, на котором дополнительное сопротивление от кривой наибольшее. В том случае, когда отличие в крутизне приведенных элементов не превышает 0,3 ‰, их длину можно принимать больше длины поезда. Расчетный подъем выбирают для каждого направления движения. При этом массы поездов для разных направлений движения оказываются различными.

Расчетную силу тяги и расчетную скорость локомотива устанавливают по тяговой характеристике, исходя из возможно более полного использования мощности локомотива с учетом ограничений силы тяги. Для грузовых электровозов постоянного тока, как правило, берут точку на пересечении характеристики полного возбуждения **ПВ** (иногда **ОВ1**) при параллельном соединении тяговых электродвигателей с линией ограничения по сцеплению колес с рельсами или по допустимому току коммутации. Для электровозов переменного тока берут точку пересечения характеристики при наибольшем напряжении на тяговых электродвигателях при нормальном возбуждении с линией ограничения по сцеплению.

Однако в ряде случаев бывает экономически целесообразно использовать точку с большей расчетной силой тяги, которую можно реализовать на характеристиках при напряжениях ниже наибольшего — на отечественных грузовых электровозах на 29-й или даже 25-й позиции. Расчетные силу тяги и скорость тепловоза устанавливают по тяговой характеристике на последней позиции контроллера машиниста, соответствующей полному использованию мощности дизеля при токе продолжительного режима.

Так как расчетная сила тяги и расчетная скорость определяют массу состава на данном участке и, следовательно, влияют на технико-экономические показатели работы дорог, их значения утверждены РЖД и приведены в ПТР. В таблице 9.1 приведены данные для основных серий локомотивов. При наличии на расчетном подъеме кривых малого радиуса расчетный коэффициент сцепления снижается в соответствии с формулами (1.11) и (1.14). Если расчетная сила взята на пересечении характеристик с ограничивающей линией по сцеплению колес с рельсами, то ее значение должно быть также снижено пропорционально снижению коэффициента сцепления. При атмосферных условиях, отличающихся от стандартных, силу тяги тепловоза снижают в соответствии с формулой (5.5). При проектировании новых линий и электрификации участков расчетную силу тяги электровозов разрешено принимать на 5 %, а тепловозов – на 7 % меньше приведенных в ПТР.

Таблица 9.1

Серия локомотива	Режим работы на расчетном подъеме	Расчетная сила тяги $F_{кр}$, кН	Расчетная скорость $v_р$, км/ч	Сила тяги при трогании с места $F_{ктр}$, кН	Конструкционная скорость v_{max}, км/ч	Длина локомотива $l_л$, м
ВЛ10, ВЛ11 (две секции)	П	451	46,7	614	100	33
ВЛ10У	П	492	45,8	667	100	33
ВЛ80Р	0,5 зоны 4 3-я зона	540 559	41,7 35,2	731	110	33
ВЛ80С, ВЛ80Т	29-я поз. 25-я поз.	501 512	43,5 37,2	677,8	110	33
ВЛ80К	29-я поз. 25-я поз.	481 490	44,5 38,0	649,4	110	33
ВЛ60К	29-я поз. 25-я поз.	361 369	43,5 37,0	487	100	21
ВЛ82, ВЛ82М	П П	465 487	51,0 50,5	640 667	110	33
2ТЭ10В, 2ТЭ10М	-	496	23,4	797	100	34
2ТЭ116	-	496	24,2	797	100	36
М62	-	196	20,0	350	100	18
2М62	-	392	20,0	700	120	36

В условиях эксплуатации массу поезда, рассчитанную одним из указанных способов и проверенную по условиям трогания, длины приемо-отправочных путей и нагреванию электрических машин обязательно проверяют в специальных опытных поездках.

9.2. Методы расчета массы состава

При движении поезда по расчетному подъему с установившейся расчетной скоростью расчетная сила тяги $F_{кр}$ уравновешивает силы основного и дополнительного сопротивлений движению:

$$F_{кр} = W_к + W_о + W_д. \quad (9.1)$$

На рис. 9.1 показана схема сил, действующих на поезд при движении на подъеме. Сила основного сопротивления движению поезда, выраженная через удельные силы отдельно для локомотива и состава, имеет вид: $W_о = w_{о}m_л g + w_{о}m_c g$.

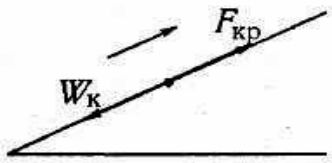


Рис. 9.1. Схема действия сил на расчетном подъеме

На расчетном подъеме $i_р$ удельные силы дополнительного сопротивления от подъема и кривых заменяют приведенным подъемом $i_р$. Тогда дополнительное сопротивление движению поезда равно:

$$W_д = i_р m_л g + i_р m_c g.$$

Подставив эти значения в выражение (9.1), получают:

$$F_{кр} = (w_{о} + i_р)m_л g + (w_{о} + i_р)m_c g.$$

откуда масса состава равна:

$$m_c = \frac{F_{кр} - (w_{о} + i_р)m_л g}{(w_{о} + i_р)g}, \quad (9.2)$$

где $F_{кр}$ – расчетная сила тяги; $m_л$, m_c – массы соответственно локомотива и состава; $i_р$ – расчетный подъем; g – ускорение свободного падения.

По этой формуле можно заранее рассчитать массы составов для различных локомотивов и построить графики $m_c(i_р)$. На рис. 9.2 приведены кривые $m_c(i_р)$ для некоторых серий электровозов (сплошные линии) и тепловозов (штриховые линии), рассчитанные при средней массе, приходящейся на одну колесную пару вагона 17,5 т для состава из четырехосных вагонов (50 % на роликовых подшипниках и 50 % шестиосных вагонов на роликовых подшипниках и 4х-осных на подшипниках скольжения) при движении по звеньевому пути.

Массу поезда с учетом использования кинетической энергии рассчитывают, когда характер профиля пути и расположение остановочных пунктов не позволяют надежно определить, какой из трудных элементов профиля нужно принять за расчетный. В этом случае используют метод подбора, заключающийся в следующем. Задаются расчетным подъемом по крутизне меньшим, чем наибольший, но имеющим большую протяженность. Для него

определяют массу состава по формуле (9.2), затем проверяют состав на возможность прохождения пути, имеющего подъемы большей крутизны, с использованием запасенной в поезде кинетической энергии. Такую проверку выполняют, используя ***аналитический или графический метод решения уравнения движения поезда.***

При ***аналитическом методе*** для проверки прохождения подъемов большей км/ч^2 крутизны используют формулу (8.27). При подстановке в нее $\beta = 120$ ____, Н/кН

$f_{у\,ср} - f_{к\,ср} - w_{к\,ср}$, начальной $v_н$ и конечной $v_к$ скоростей получают:

$$\Delta s = \frac{4{,}17\,(v_{к2} - v_{н2})}{f_{у\,ср} - w_{к\,ср}}. \qquad (9.3)$$

Для повышения точности расчета интервалы изменения скорости нужно брать в пределах 10 км/ч и суммировать полученные отрезки **Δs.** Тогда проходимый поездом путь: $s = \sum \Delta s_i = \sum \frac{4{,}17\,(v_{кi2} - v_{нi2})}{(f_{у\,ср} - w_{к\,ср})_i}$. (9.4)

где $v_{кi}$ и $v_{нi}$ – соответственно конечная и начальная скорость движения в каждом интервале; **Δs** – путь, проходимый поездом при изменении скорости от $v_{нi}$ до $v_{кi}$; $(f_{кср} - w_{к\,ср})_i$ – среднее значение удельной ускоряющей или замедляющей силы, действующей в каждом интервале скоростей $v_{нi}$ ... $v_{кi}$.

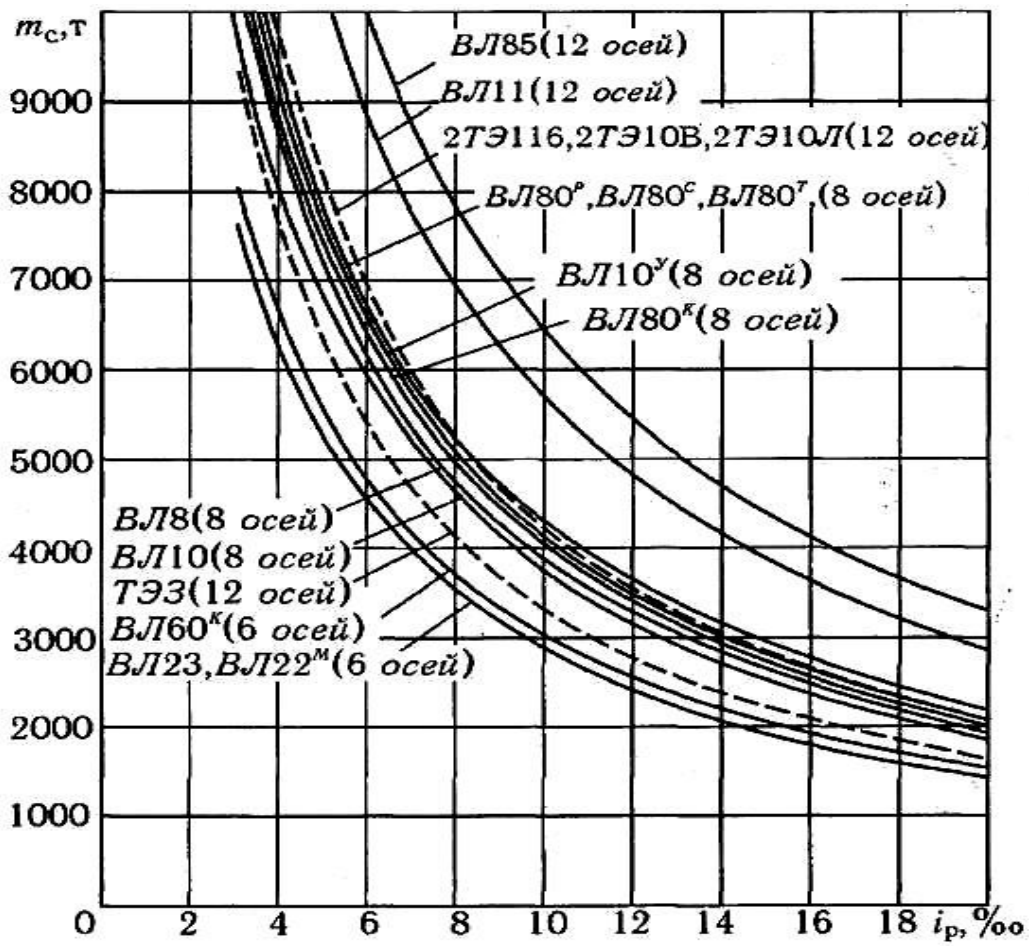


Рис. 9.2. Зависимость массы состава от крутизны расчетного подъема

В расчетах при снижении скорости числитель формул (9.3) и (9.4) будет отрицательным, однако **s** получается положительным, так как $f_{кср} - w_{к\ ср}$ также отрицательно.

Если в интервале скоростей от $v_н$ до конечной – расчетной скорости $v_р$ поезд пройдет больший путь Δs, чем длина проверяемого подъема, то поезд преодолеет этот подъем за счет работы, совершаемой локомотивом, с использованием запасенной в поезде кинетической энергии. В том случае, когда Δs окажется меньше длины проверяемого подъема, такой состав локомотив не может провести по этому подъему. Тогда массу состава уменьшают и повторяют поверочный расчет.

Формулу (9.4) удобно использовать, если известна скорость подхода к проверяемому элементу. Если же она неизвестна, то расчет приходится вести для ряда элементов от места, в котором скорость известна: от станции, где поезд имеет остановку, от места ограничения скорости или от места, где достигается наибольшая допустимая скорость движения.

При ***графическом методе*** массу состава m_{c1} рассчитывают по формуле (9.2) для подъема меньшей крутизны, чем наибольший. Для этой массы строят график удельных ускоряющих сил при тяге, а затем строят кривую **v(s),** начиная от места, на котором известна скорость движения поезда. Если на наибольшем подъеме скорость не опустится ниже расчетной v_p, то поезд можно провести по участку. Если же в конце подъема скорость окажется ниже v_p, то нужно уменьшить массу состава и повторить построения.

Практически это делают так. Задаются еще двумя массами состава m_{c2} и m_{c3}, меньшими массы m_{c1}. Для них рассчитывают удельные ускоряющие силы и строят кривые v(s) (рис. 9.3). В конце наибольшего подъема (i = 10 ‰) получены скорости v_1, v_2 и v_3 для этих масс составов. По трем значениям скоростей и массам составов m_{c1}, m_{c2} и m_{c3} строят зависимость массы состава от скорости в конце наиболее крутого подъема. Скорости удобно отложить по оси ординат, а массы составов — по оси абсцисс. На (рис. 9.3, б) точки **A, B** и **C** соответствуют выбранным массам и полученным скоростям. Чтобы определить наибольшую массу состава, которую локомотив проведет по данному подъему, полученные точки соединяют плавной кривой и на ней находят массу m_c при расчетной скорости v_p (точка D). При массе m_c поезд подойдет к концу данного подъема со скоростью v_p.

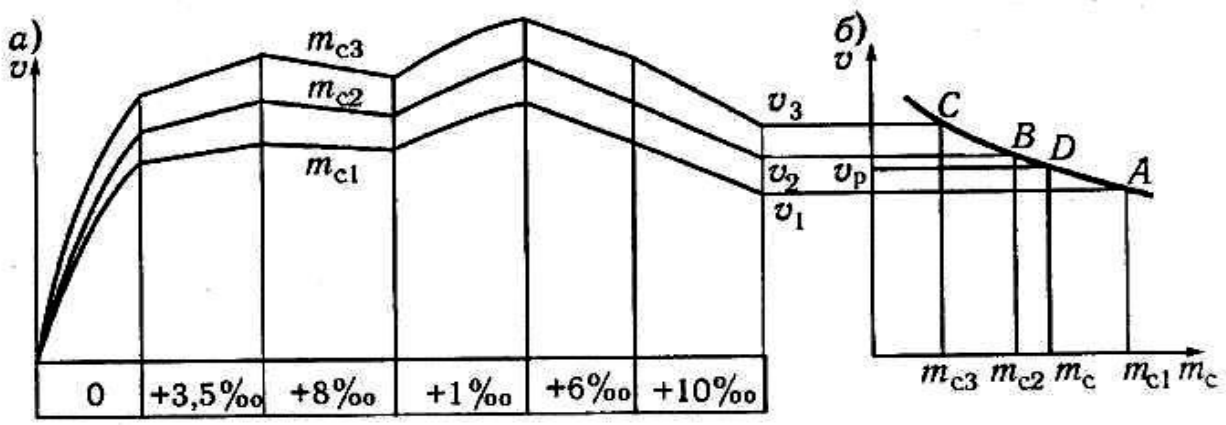


Рис. 9.3. Графический метод определения массы состава с учетом использования кинетической энергии

Как правило, скорость в конце наиболее тяжелого подъема должна быть больше или равна расчетной. Однако в отдельных случаях в зависимости от местных условий разрешается в конце подъема на протяжении не более 500 м двигаться со скоростью ниже расчетной. При этом скорость выхода с подъема для электровозов постоянного тока и двойного питания определяется по характеристике полного возбуждения последовательно-параллельного соединения, для электровозов переменного тока со ступенчатым регулированием – при нормальном возбуждении на 21-й позиции; (для электровозов с плавным

регулированием напряжения 0,5 зоны 3); для тепловозов 2ТЭ10В, 2ТЭ10М, 2ТЭ116, 3ТЭ10М – 20 км/ч, М62, 2М62 – 16 км/ч при выходе на ограничение по сцеплению с переходом на режимы, соответствующие промежуточным позициям контроллера машиниста. Путь, проходимый со скоростью, меньшей чем расчетная, не должен превышать 500 м.

Подъемы по крутизне, превышающие расчетный, которые поезд может преодолевать за счет использования кинетической энергии, называют ***скоростными.***

9.3. Проверка массы состава по условиям трогания поезда с места

После определения массы состава по движению на наиболее тяжелом подъеме необходимо ее проверить по условиям трогания с места на остановочных пунктах. Эту проверку массы состава $m_{стр}$ проводят по формуле:

$$m_{стр} = \frac{F_{ктр}}{w_{тр} + i_{тр} + g}, \quad (9.5)$$

где $F_{ктр}$ – сила тяги локомотива при трогании, которую берут из табл. 9.1 или из тяговых характеристик по ограничивающей линии при v = 0; $w_{тр}$ – удельное сопротивление состава (основное и дополнительное) при трогании, определяемое по формулам (6.52) и (6.53); $i_{тр}$ – подъем места трогания; g – ускорение свободного падения; m – масса локомотива.

Если масса состава по условиям трогания $m_{с\ тт}$ окажется больше массы состава $m_с$, рассчитанной по условиям движения на наиболее тяжелом подъеме, то поезд может тронуться с места остановки. В том случае, когда $m_{стр} < m_с$, трогание невозможно.

Иногда массу поезда проверяют не только по условиям трогания, но и ***по условиям разгона.*** Если за раздельным пунктом, где поезд имеет остановку, следует крутой подъем, то может оказаться, что поезд на нем разогнаться не может. При разгоне на каждой характеристике при ступенчатом изменении напряжения с увеличением скорости сила тяги снижается с $F_{ксц\ max}$ до $F_{ксц\ min}$. Однако на крутом подъеме может оказаться, что силы основного и дополнительного сопротивлений движению будут больше силы тяги $F_{ксц\ min}$. В поезде наступит равновесие сил $W_к$ и $F_к$ при $F_к > F_{ксц\ min}$. Тогда скорость движения увеличиваться не будет, а сила тяги не сможет снизиться до $F_{ксц\ min}$. Вследствие этого нельзя будет перейти на следующую характеристику (такой переход вызовет бросок силы тяги за пределы $F_{ксц\ max}$). Дальнейший разгон поезда в таких условиях невозможен.

Для проверки массы поезда по условиям разгона на тяговых характеристиках под ограничивающими линиями по сцеплению колес с рельсами нанесены штриховые линии, соответствующие минимальным значениям силы тяги перед переходом на следующую позицию (см. тяговые характеристики электровозов). Расчет массы состава выполняют по формуле (9.2), подставляя вместо расчетной силы тяги $F_{ксц\ min}$, т.е. значения сил основного удельного сопротивления движению состава и локомотива при скорости пересечения линий $F_{ксц\ min}(v)$ с характеристикой локомотива, на которой находится расчетная точка.

9.4. Проверка массы состава по длине станционных путей

Мощные электровозы и тепловозы, развивающие большие силы тяги, могут водить поезда повышенной массы и длины. Однако поезд должен устанавливаться в пределах полезной длины приемо-отправочных путей $l_{поп}$ на станциях участка обращения. В противном случае он займет стрелки, чем усложнит работу раздельного пункта и сделает невозможным обгон, а также скрещение поездов на однопутных участках. Поэтому длину поезда **$l_п$,** масса которого определена по условиям движения по наиболее трудному подъему и трогания с места, ***проверяют на возможность установки по длине приемо-отправочных путей.*** Длина поезда равна:

$$l_п = l_c + n_л l_л, \qquad (9.6)$$

где l_c – длина состава; $l_л$ – длина локомотива, приведенная в табл. 9.1; $n_л$ – число локомотивов. $l_c = \sum n_i l_i$,

где l_i – длина вагонов по осям автосцепки; n_i – число однотипных вагонов в сформированном составе.

Если известна масса состава m_c и процентное соотношение различных типов вагонов по массе p_i, то число вагонов каждого типа равно:

$$n_i = \frac{m_c \cdot p_i}{m_в \cdot 100}, \qquad (9.7)$$

где $m_в$ – средняя масса однотипных вагонов.

В расчетах учитывают неточности установки поезда, которое принимают равным 10 м. В этом случае $l_п + 10$ м $\le l_{поп}$,

где $l_{поп}$ – длина приемо-отправочных путей.

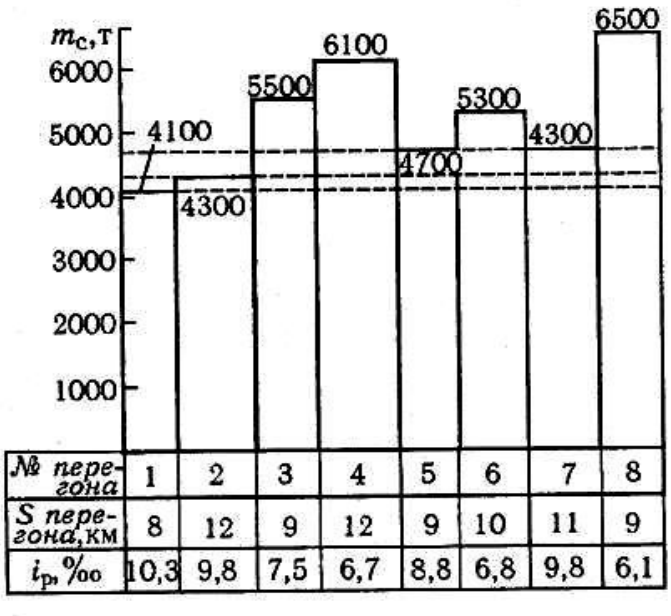
При выполнении расчетов для графика движения поездов среднюю массу вагонов определяют по структуре перевозимых грузов. Дело в том, что при перевозке грузов большой плотности (каменный уголь, руды, черные металлы) грузоподъемность вагонов используется полностью, но приходится перевозить и грузы с меньшей плотностью (лесные материалы, строительные материалы,

зерно). При этом недоиспользуется грузоподъемность вагонов. Можно также допустимую по длине приемо-отправочных путей массу состава определить, исходя из погонной нагрузки – массы поезда, приходящейся на один метр пути, которую берут из отчетных форм. Длина вагонов по осям автосцепки следующая, м:

восьмиосный полувагон 20
восьмиосная цистерна 21
шестиосный полувагон 17
четырехосный крытый вагон и изотермический 15
четырехосный полувагон и платформа 14
четырехосные цистерна, цементовоз и думпкар 12
четырехосный цельнометаллический пассажирский вагон 25

9.5. Принципы установления норм массы поездов

При следовании поездов на большие расстояния их массу нельзя изменять для каждого перегона или участка, так как это потребовало бы частого переформирования составов, при котором усложнилась бы работа станций и замедлилась доставка грузов. Для ускорения доставки грузов уменьшают также число пунктов смены локомотивов по пути следования. Поэтому устанавливают унифицированные нормы масс поездов по целым направлениям с работой локомотивов на длинных тяговых плечах.



№ перегона	1	2	3	4	5	6	7	8
S перегона, км	8	12	9	12	9	10	11	9
i_p, ‰	10,3	9,8	7,5	6,7	8,8	6,8	9,8	6,1

Рис. 9.4. Тонно-километровая диаграмма

Чтобы наглядно представить массы поездов, которые может вести локомотив на каждом перегоне, для каждого участка строят ***тоннокилометровые диаграммы,*** а затем их анализируют по всему направлению. На рис. 9.4 приведена тонно-километровая диаграмма одного из участков, обслуживаемых электровозом ВЛ80С. На каждом из восьми перегонов указаны расчетный подъем, длина перегона и рассчитанная масса состава.

Как видно из диаграммы, состав массой 4100 т может быть проведен электровозом ВЛ80С по всему участку. Если установить такую норму массы состава, то электровоз полностью будет использован только на первом перегоне. Для повышения массы состава необходимо на первом перегоне ввести дополнительные меры. Например, если масса в 4100 т установлена на нем по условиям разгона поезда на одной из станций, за которой следует расчетный подъем, то можно отменить остановки поездов на ней или ввести разгонное толкание в пределах станционных путей (без выхода толкача на перегон), или толкание на части перегона с возвратом толкача на станцию. При этом может быть удастся поднять массу состава до 4300 т, и электровоз будет полностью использован на втором и седьмом перегонах.

В том случае, когда требуется дальнейшее повышение массы состава, ее можно установить равной 4700 т, но тогда на первых двух перегонах необходимо вводить толкание поездов по обоим перегонам или по первому и части второго перегона, а на седьмом перегоне использовать один из вариантов, рассмотренных применительно к первому перегону.

Для значительного увеличения массы состава переходят на локомотивы с большими силами тяги или вводят двойную тягу на ряде перегонов.

Такой анализ тонно-километровой диаграммы с технико-экономическими расчетами проводят на каждом участке с выбором наиболее целесообразных мероприятий по повышению массы поезда для каждого перегона. По результатам анализа тонно-километровых диаграмм устанавливают унифицированную норму масс составов, которая при заданном объеме перевозок дает наибольший техникоэкономический эффект.

В условиях эксплуатации масса состава не должна быть больше критической, под которой понимают наибольшую массу грузового состава по тяговым свойствам локомотива, рассчитанную рассмотренными методами и проверенную в опытных поездках. Ее устанавливают для конкретного участка и периода эксплуатации по условиям сцепления колес с рельсами или нагревания тяговых электрических машин.

Если перечисленные условия значительно изменяются в зависимости от времени года, то при единой критической массе в отдельные периоды будет недоиспользование тяговых свойств локомотивов, а в другие – перегрузки. В этом случае критические массы составов определяют отдельно для летнего и зимнего периодов.

В тех случаях, когда на участке возникают особо неблагоприятные погодные условия с резким ухудшением условий сцепления (гололед и т.п.) и значительным увеличением сопротивления движению, для поездов критической массы вводят кратную тягу: вместо одного локомотива – двойную тягу, вместо двойной —

тройную и т.д. или снижают массу состава. Так же поступают и в случаях, когда на путях перед скоростными подъемами вводится ограничение скорости движения до уровня, при котором эти подъемы не могут быть пройдены за счет использования силы тяги локомотива и кинетической энергии поезда со скоростью, не меньшей, чем расчетная скорость локомотива.

Трогание с места поезда критической массы на расчетном или скоростном подъеме не предусматривают.

9.6. Особенности расчетов при работе поездов повышенных массы и длины

На дорогах, где число отправляемых поездов приближается к пропускной способности участков, возрастающие объемы перевозок можно освоить за счет повышения массы и длины составов с введением при необходимости кратной тяги. Длина такого поезда оказывается больше длины приемо-отправочных путей. Поэтому предусматривают его безостановочный пропуск по всему участку обращения. На конечных станциях иногда удлиняют один из путей или устанавливают разделенный состав на нескольких путях. Как показывает опыт, такие составы могут быть массой 10 000 и более тонн.

При кратной тяге расчеты выполняют аналогично одиночной тяге, силу тяги каждого локомотива принимают равной расчетной. В случае сосредоточения локомотивов в голове поезда необходимо предупредить разрывы поезда. Поэтому вводят ограничение по максимальной продольной силе, которую может воспринять автосцепка. При трогании, когда за счет зазоров в автосцепках появляются большие динамические усилия, эта сила не должна превышать 930 кН и сила тяги локомотивов при трогании не должна превышать эту силу и силу сопротивления движению локомотивов при трогании:

$$F_{к\,тг} \le 930000 \le m_л g (w_{тр} + i_{тр} + w_г).$$

Когда поезд движется по тяжелому подъему, зазоры в автосцепках выбраны и динамические силы становятся меньше. Поэтому наибольшее допустимое продольное усилие на автосцепке устанавливают 1275 кН и сила тяги локомотивов равна:

$$F_к \le 1275000 \le m_л g (w_o + i + w_г).$$

В связи с этими ограничениями второй локомотив целесообразно ставить не в голову, а в хвост или в середину длинносоставного поезда большой массы. Вторым локомотивом и в режиме тяги, и в режиме торможения должны управлять синхронно с первым локомотивом. Этого достигают или дистанционным управлением вторым локомотивом машинистом первого локомотива или

передачей по радио команд также машинистом первого локомотива машинисту второго локомотива (СМЕТ - радио).

При постановке второго локомотива в хвост поезда в нем не только значительно уменьшаются продольные силы, но и улучшается управляемость тормозами в результате снижения давления в тормозной магистрали не только в головной, но и в хвостовой части поезда, что идентично сокращению длины поезда в 2 раза. Однако при сжимающих усилиях хвостового локомотива в тяге, как и при электрическом торможении головного локомотива, должна обеспечиваться устойчивость вагонов от выжимания. Наибольшая продольно сжимающая сила в поезде зависит от типа и степени загрузки вагонов поезда. ПТР рекомендованы следующие допустимые продольные сжимающие силы в поезде:

Число колесных пар	Продольная сила, кН	
(осей) вагонов	при $m_{во}$ 12 т	при $m_{во}$ 12 т
4	490	980
6 и 8	980	без ограничений

Подъем, на котором разрешается трогание такого поезда, можно определить по эмпирической формуле, рекомендованной ВНИИЖТом:

$$0{,}77 \frac{F_{к\,тт}}{mg} - i_{тр} - w_{тр} - w_{г}$$

На дорогах разрабатывают специальные меры, исключающие остановки поездов критической массы на более крутых подъемах.

Тема 10
ТОРМОЖЕНИЕ ПОЕЗДОВ И ТОРМОЗНЫЕ ЗАДАЧИ
10.1. Принципы тормозных расчетов

Тормозные средства поезда, создающие тормозные силы, определяют уровень безопасности движения. Поэтому процесс торможения необходимо рассмотреть более подробно. При торможении поезда тормозная сила возникает не сразу после перевода рукоятки крана машиниста в тормозное положение. Требуется время на распространение воздушной волны по тормозной магистрали состава, срабатывание воздухораспределителей, перемещение тормозной рычажной

передачи до соприкосновения тормозных колодок с колесами и на увеличение нажатия, колодок до установившегося значения.

В связи с тем, что воздухораспределители вагонов головной части поезда срабатывают раньше, чем в хвостовой части, головная часть поезда начинает тормозиться раньше, а хвостовая – позднее. Таким образом, тормозная сила вагонов возникает через некоторое время, постепенно увеличиваясь до установившегося значения. В расчетах это увеличение условно заменяют мгновенным скачком тормозной силы, происходящим после установки рукоятки крана машиниста в тормозное положение через время $t_п$. Его называют *временем подготовки тормозов к действию.* В течение времени $t_п$ движение поезда считают равномерным. За это время поезд пройдет путь $s_п$, называемый ***подготовительным тормозным*** или ***предтормозным путем.*** Путь, проходимый поездом с действующими тормозами, называют ***действительным тормозным путем*** $s_д$.

Таким образом, тормозной путь, проходимый поездом после перевода рукоятки крана машиниста в соответствующее положение до остановки $s_т$, равен сумме ***подготовительного и действительного тормозных путей:***

$$s_т = s_п + s_д. \qquad (10.1)$$

При равномерном движении со скоростью $v_н$ (км/ч) ***подготовительный тормозной путь*** рассчитывают по формуле, м:

$$s = v_н t_п /3,6 = 0,278 v_н t_п. \qquad (10.2)$$

где $t_п$ – время подготовки тормозов; 3,6 – коэффициент, учитывающий соотношение между единицами скорости километр в час и метр в секунду.

Однако на самом деле скорость поезда в период подготовки тормозов $t_п$ не постоянна: при движении на выбеге по горизонтальному пути или подъему она снижается, а при следовании по крутому спуску – возрастает. Чтобы учесть ее изменения, вводят поправку на время, увеличивая его на спусках и уменьшая на подъемах. В ПТР рекомендованы следующие формулы для определения $t_п$, с, ***различных поездов при экстренном торможении.***

Для грузовых составов длиной 200 колесных пар (осей) и менее при автоматических тормозах, а также для одиночно следующих грузовых локомотивов:

$$t_п = 7 + \frac{10i}{1000 \varphi_р + \varphi_{кр}}; \qquad (10.3)$$

для грузовых составов длиной более 200 до 300 осей при автоматических тормозах:

$$\frac{15i}{}$$

$$t_п = 10 + \frac{}{1000\varphi_р\varphi_{кр}}; \quad (10.4)$$

для грузовых поездов длиной более 300 осей при автоматических тормозах:

$$t_п = 12 + \frac{18i}{1000\varphi_р\varphi_{кр}}; \quad (10.5)$$

для пассажирских поездов при пневматических тормозах и одиночно следующих пассажирских локомотивов:

$$t_п = 4 + \frac{5i}{1000\varphi_р\varphi_{кр}}; \quad (10.6)$$

Для пассажирских поездов при электропневматических тормозах:

$$t_п = 2 + \frac{3i}{1000\varphi_р\varphi_{кр}}; \quad (10.7)$$

В этих формулах:

i – приведенный уклон, ‰. Для подъемов его берут со знаком «+», для спусков – со знаком «-»; $\varphi_р$ – расчетный тормозной коэффициент поезда (при экстренном торможении); $\varphi_{кр}$ – расчетный коэффициент трения колодки о колесо при наибольшей скорости движения.

Число осей в грузовом составе **n_c** определяют по формуле:

$$n_c = \frac{p_8 m_c}{100 m_{во8}} + \frac{p_6 m_c}{100 m_{во6}} + \frac{p_4 m_c}{100 m_{во4}} + \ldots \quad (10.8)$$

где p_8, p_6, p_4 – процентное содержание в составе (по массе) соответственно восьмиосных, шестиосных, четырехосных вагонов; m_c – масса состава; $m_{во8}$, $m_{во6}$, $m_{во4}$ – масса, приходящаяся на ось соответственно восьмиосного, шестиосного, четырехосного вагона.

Если срабатывает автостоп, то время подготовки автоматических тормозов $t_п$, рассчитанное по указанным формулам, увеличивают на 14 с – на время срабатывания системы автостопа.

При ручных тормозах время подготовки к действию берут равным 60 с, причем в расчетах учитывают тормозную силу локомотива и тормозных вагонов. Расчетную силу нажатия чугунных тормозных колодок при ручном торможении

принимают следующей: для пассажирских цельнометаллических вагонов и рефрижераторных поездов – 39,2 кН на ось; для грузовых вагонов с тормозной площадкой – 19,6 кН; для локомотивов (включая электро- и дизель-поезда) – 49 кН. Число осей ручного торможения у локомотивов указано в табл. 7.3.

Тормозная сила локомотива, развиваемая вспомогательным тормозом при удержании остановившегося поезда на раздельном пункте, имеющем уклон: $B_т$ □ 0,25□$K_р$.

Действительный тормозной путь определяют аналитическим или графическим методом при действии замедляющей силы $b_т + w_{ох} + i_с$. При аналитическом методе разность скоростей начала и конца торможения делят на интервалы. **Длина тормозного пути** в метрах, равна:

$$s_д \quad \square\text{———}\square\square\square\frac{}{1000\square_р\square_{кр}}{}^2 \quad \square\ v\ \square\ w^{12}\square_{ох} \quad \square i\square, \qquad (10.9)$$

$$500\square v_2$$

где v_2 и v_1 – начальная и конечная скорости в каждом интервале скоростей; □1000□$_р$□$_{кр}$ □ $w_{ох}$ □i□□ замедляющая сила при экстренном торможении, при средней скорости в каждом интервале; □ □ замедление поезда, при действии удельной замедляющей силы в 1 Н/кН.

В расчетах на замедление оно принимается равным:

км/ч^2 для грузового и пассажирского поезда □120 ———,

Н/кН

км/ч^2 для одиночно следующего электровоза □107 ———,

Н/кН

км/ч^2 для одиночно следующего тепловоза □114 ———,

Н/кН

для электропоезда □119 км/ч^2 ———,

Н/кН

км/ч^2 для дизель-поезда □116 ———. Н/кН

В случае применения полного служебного торможения время подготовки тормозов считают таким же, как и для экстренного, а расчетный тормозной коэффициент уменьшают на 20 %.

10.2. Тормозные задачи и методы их решения

Поскольку режим торможения является важнейшим в обеспечении безопасности движения поездов, тормозным расчетам уделяют большое внимание. При этом приходится иметь дело с длиной тормозного пути $s_т$, наличием тормозных средств в поезде, определяемых расчетным тормозным коэффициентом $\theta_р$, начальной $v_Н$ и конечной $v_К$ скоростями движения и уклонами i.

Конечную скорость принимают равной нулю. Из этих пяти параметров определяют один по четырем заданным, используя аналитический или графический метод решения уравнения движения поезда. В зависимости от того, какую величину из пяти определяют, тормозные задачи подразделяют на три типа.

Первый тип тормозных задач или просто – первая тормозная задача – сводится к определению длины тормозного пути по заданным значениям $v_н$, $v_к$, $\theta_р$ и i. ***Во втором*** *типе* рассчитывают допустимые скорости движения $v_н$ на различных уклонах **i** исходя из условия остановки поезда в пределах заданного тормозного пути $s_т$ при заданном значении $\theta_р$. ***В третьем типе*** определяют, сколько тормозных средств нужно иметь в поезде (или какой должен быть $\theta_р$), чтобы поезд, движущийся с заданной скоростью $v_н$, можно было остановить на заданном уклоне i в пределах тормозного пути $s_т$.

Определение длины тормозного пути. Подготовительный тормозной путь рассчитывают по формуле (10.2) при заданной скорости $v_н$ и времени $t_п$, определенному по одной из формул (10.3) ... (10.7). Число осей в грузовом составе рассчитывают по формуле (10.8).

Действительный тормозной путь при снижении скорости от $v_н$ до $v_к$=0 определяют аналитически по формуле (10.9), имея удельные замедляющие силы при экстренном торможении, или графическим методом, построив кривую v(s) на основании диаграммы удельных замедляющих сил при экстренном торможении. Тормозной путь определяют по формуле (10.1).

Определение допустимых скоростей движения на уклонах различной крутизны методами, которые использовали в первой задаче, невозможно. Дело в том, что для определения подготовительного тормозного пути на каждом уклоне необходимо знать неизвестную нам начальную скорость $v_н$. Если она неизвестна, то нельзя определить и время $t_п$, так как неизвестны величина $\theta_{кр}$, зависящая от скорости, и действительный тормозной путь, зависящий от $v_н$ и $b_т$. Поэтому задачу решают графическим методом.

Наибольшая скорость по условиям остановки поезда в пределах тормозного пути ограничивается обычно на спусках, где поезд может развить большие

скорости даже в режиме выбега. Замедляющие силы при этом уменьшаются за счет составляющей веса поезда, действующей на спуске по направлению движения, удлиняя тормозные пути.

На подъемах поезд не может развивать большие скорости движения, а дополнительное сопротивление движению от подъема увеличивает замедляющие силы при торможении. Поэтому тормозные пути получаются меньшими.

В связи с этим наибольшую скорость определяют обычно для движения по спускам или горизонтальному участку пути. При решении задачи строят диаграмму удельных замедляющих сил по заданному значению $□_р$ (рис. 10.1, а) и по ней строят кривую $v(s_д)$ при действующих тормозах (рис. 10.1, б) для заданного спуска i, которому соответствует точка М на рис. 10.1, а. Поскольку начальная скорость неизвестна, то построение ведут в обратном порядке, строя отрезок $v(s_д)$.

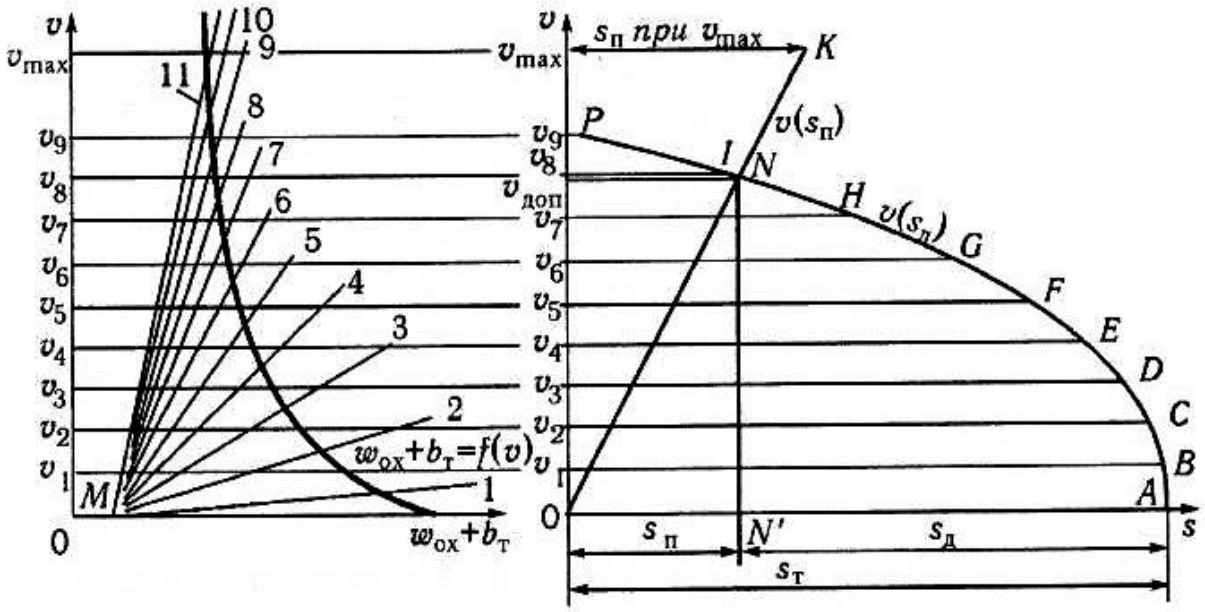


Рис. 10.1. Определение допустимых скоростей движения на спусках

В пределах $v_1 – 0$ и проводя его через точку $s = s_т$ при $v = 0$ (отрезок ВА на рис. 10.1, б). Затем из конца первого отрезка (точка **В**) строят второй в интервале скоростей $v_2 – v_1$ и т.д. В результате получают линию $v(s_д)$ **АВС...IР.**

В связи с тем, что начальная скорость $v_Н$ неизвестна, подготовительный тормозной путь $s_п$ можно определить, задаваясь различными скоростями, например, v_1, v_2 и т.д. до v_9. Однако полученная при этом линия будет близка к прямой, проходящей через начало координат. Поэтому на практике зависимость длины подготовительного тормозного пути от скорости движения определяют проще. Задаются наибольшей скоростью движения локомотива или наибольшей скоростью на участке v_{max} и для нее рассчитывают $s_п$. Откладывают его на графике (см. рис. 10.1, б) при v_{max} и получают точку **К.** Вторую точку определяют при $v = 0$ и $s_п = 0$. Прямая **0К** дает зависимость между $s_п$ и v.

Точка пересечения прямой **ОК** с кривой **АР** (**N** на рис. 10.1, б) показывает допустимую скорость $v_{доп}$ на заданном спуске. Действительно, при скорости $v_{доп}$ отрезок **ON** соответствует подготовительному тормозному пути $s_п$, а отрезок **N'A** – действительному тормозному пути $s_д$. Их сумма как раз равна заданной длине тормозного пути $s_т$.

Чтобы не выполнять такие построения для каждого спуска, встречающегося на участке, на практике делают подобные расчеты и построения для трех значений уклонов: обычно для горизонтального прямолинейного пути (i = 0), наибольшего спуска i = – i_{max} и среднего спуска i = – $i_{ср}$. Определяют для них $v_{доп}$ и по полученным трем точкам строят кривую допустимых по тормозам скоростей в зависимости от крутизны спуска. По полученной кривой $v_{доп}$ (i, ‰) находят допустимые скорости на любом спуске. Рассмотрим решение такой тормозной задачи на примере.

Пример: Определить допустимые скорости движения поезда на спусках различной крутизны. Поезд состоит из электровоза ВЛ80С массой 192 т и состава массой 3850 т длиной 216 осей. Расчетный тормозной коэффициент поезда $\theta_р$ = 0,39. Диаграмма удельных замедляющих сил этого поезда приведена на рисунке 10.2, а. Участок имеет спуски от 0 до 12 ‰, длина тормозного пути 1200 м. **Решение:** 1. Расчет подготовительных тормозных путей проведем для трех уклонов: i = 0; i = – i_{max} = – 12 ‰ и i = – $i_{ср}$ = – 6 ‰.

1.1. Время подготовки тормозов к действию определяем по формуле (10.4). При v_{max} = 110 км/ч; $\varphi_{кр}$ = 0,087 (см. табл. 7.2):

для i = 0; $t_{п1}$ = 10 + 15i / 1000$\theta_р\varphi_{кр}$ = 10 + 150 / 1000 · 0,39 · 0,087 = 10 с;

для i = – 6 ‰; $t_{п2}$ = 10 + 15i / 1000$\theta_р\varphi_{кр}$ = 10 + 15 · (– 6) / 1000 · 0,39 · 0,087 = 12,65 с;

для i = – 12 ‰; $t_{п2}$ = 10 + 15i / 1000$\theta_р\varphi_{кр}$ = 10 + 15 · (– 12) / 1000 · 0,39 · 0,087 = 15,31 с.

1.2. Подготовительный тормозной путь $s_п$ определяем по формуле (10.2): для i = 0; $s_{п1}$ = 0,278 · v_{max} · $t_{п1}$ = 0,278 · 110 · 10 = 306 м; для i = – 6 ‰; $s_{п1}$ =

$0{,}278 \cdot v_{max} \cdot t_{п1} = 0{,}278 \cdot 110 \cdot 12{,}65 = 387$ м; для i = – 6 ‰; $s_{п1} = 0{,}278 \cdot v_{max} \cdot t_{п1} = 0{,}278 \cdot 110 \cdot 15{,}31 = 468$ м.

Эти значения $s_п$ откладываем на рисунке 10.2, б (точки E, G, H) и соединяем с точкой 0. Получаем прямые, по которым можно определить подготовительный тормозной путь $s_п$ при любой скорости.

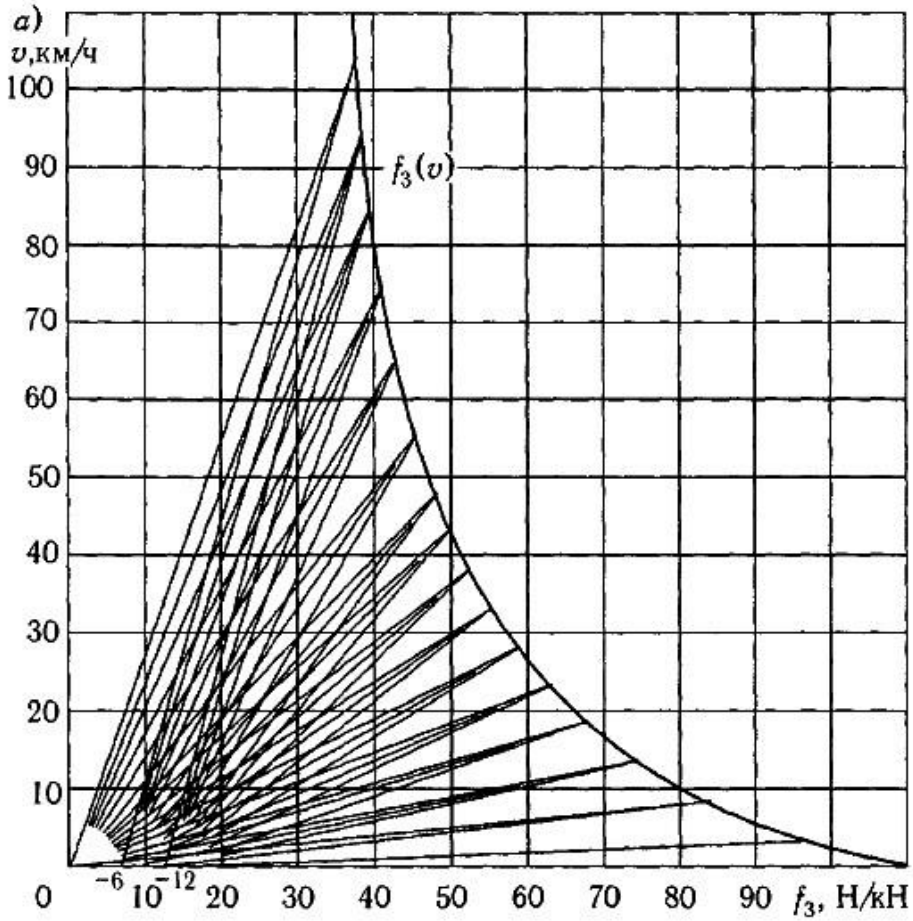


Рис. 10.2,а. Зависимость наибольших допустимых скоростей движения по тормозам от уклонов

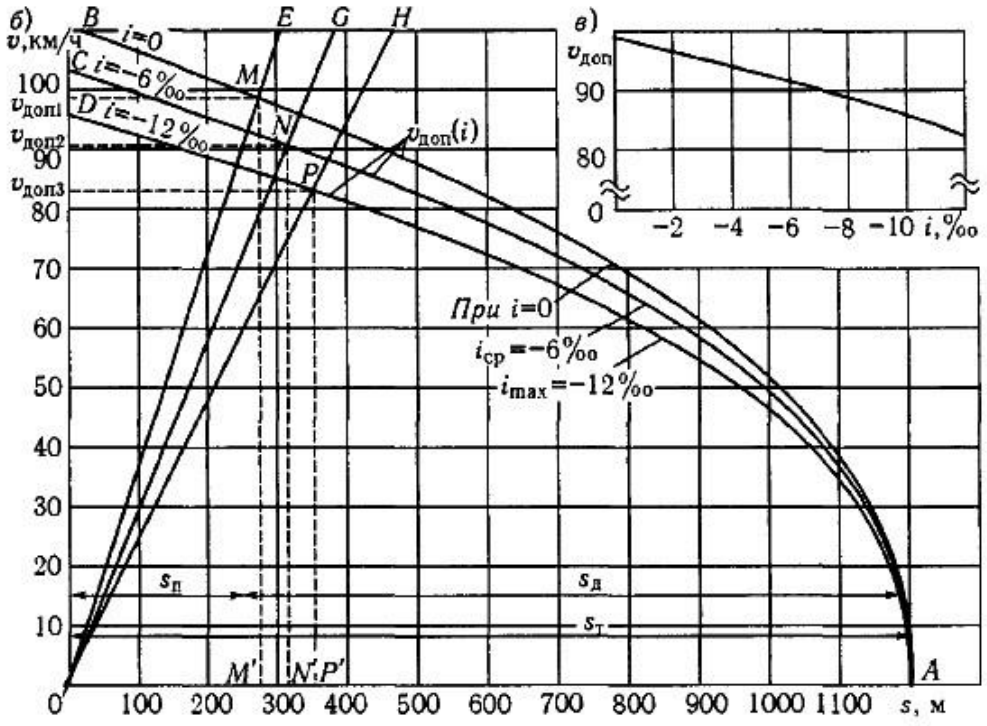


Рис. 10.2,б и в. Зависимость наибольших допустимых скоростей движения по тормозам от уклонов

2. Построение кривых $v(s_д)$ и определение $v_{доп}$ для трех уклонов начинаем с точки (А) по диаграмме удельных замедляющих сил(см. рис. 10.2, а) при i = 0; i = – 12 ‰ и i = – 6 ‰. В результате получаем три кривые на рис. 10.2, б: АВ при i = 0, АС при i = – 6 ‰, AD при i = – 12 ‰. Точка М пересечения кривой АВ с прямой 0Е показывает допустимую скорость $v_{доп1}$ при i = 0 (98 км/ч). При этом отрезок ОМ соответствует $s_п$, МА $s_д$. Аналогично в точке N $v_{доп2}$ равно 91 км/ч на спуске i = – 6 ‰ и в точке Р $v_{доп3}$ равно 83 км/ч на спуске i = – 12 ‰.

3. Кривую $v_{доп}(i)$ строим следующим образом. По трем полученным значениям $v_{доп}$ для различных i вычерчиваем график $v_{доп}(i)$, откладывая на (рисунке 10.2, в) по оси абсцисс i, а на оси ординат – допустимые скорости. По этому графику можно определить $v_{доп}$ для любого спуска от 0 до 12 ‰.

Необходимые тормозные средства в поезде так же, как и допустимые скорости движения, нельзя определить, используя формулы для тормозных расчетов, в связи с тем, что $s_п$ и $s_д$ зависят от расчетного тормозного коэффициента $_р$, значение которого неизвестно. Поэтому третью задачу решают графическим методом в следующем порядке. Поскольку расчетный тормозной коэффициент изменяется в сравнительно небольших пределах, задаются тремя его значениями $_{р\ min}$, $_{р\ ср}$ и $_{р\ max}$ (для грузового поезда, например, 0,33; 0,4; 0,5) и строят диаграммы удельных замедляющих сил при экстренном торможении (рис. 10.3, а).

По этим диаграммам проводят кривые $v(s_д)$, начиная с заданной скорости $v_н$ до нуля (рис. 10.3, б). Точки начала построения этих кривых берут на расстоянии длины подготовительных тормозных путей, рассчитываемых по формуле (10.2). Кривую $v(s_д)$ можно также начинать при $s = 0$, но тогда к полученному пути $s_д$ нужно прибавить $s_п$. Три найденные суммы действительного и подготовительного путей **($s_т$)** соответствуют трем значениям $\varphi_р$. По ним строят кривую зависимости $s_т$ $\varphi_р$ (рис. 10.4), а затем находят значение $\varphi_р$ при заданном тормозном пути $s_т$.

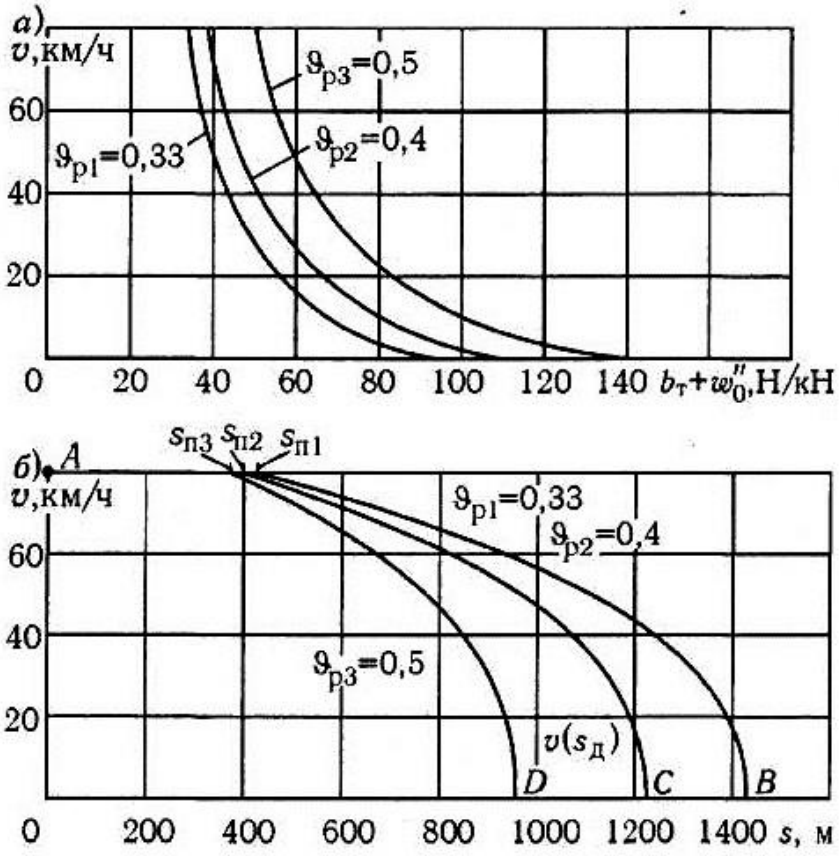


Рис. 10.3. Определение тормозных путей при различных расчетных тормозных коэффициентах

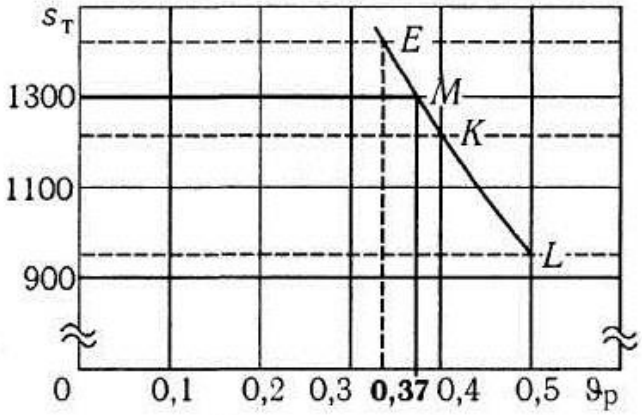


Рис. 10.4. Зависимость длины тормозного пути от расчетного тормозного коэффициента

10.3. Тормозные расчеты с помощью номограмм

Чтобы облегчить тормозные расчеты, специалисты ВНИИЖТа разработали **номограммы** – графики, связывающие тормозные пути при экстренном торможении с расчетными тормозными коэффициентами и со скоростями движения в начале торможения. Такие номограммы выполнены для разных

уклонов и приведены в ПТР для площадок и спусков через 2 ‰ для грузовых и пассажирских поездов.

На рис. 10.5 приведен график $s_т(□_р)$ при скоростях движения от 30 до 120 км/ч для грузового поезда на горизонтальном прямолинейном пути (i = 0).

Для определения тормозного пути с начальной скорости, например 90 км/ч при $□_р$ □ 0,4; находим точку А пересечения кривой $s_т(□_р)$ при v = 90 км/ч с вертикальной линией, соответствующей $□_р$ □ 0,4 (40 кН на 100 кН веса поезда). Сносим эту точку на ось ординат и получаем тормозной путь 900 м (при i = 0). Если необходимо определить тормозной путь при снижении скорости, например, от 90 до 60 км/ч, находим дополнительно точку на кривой $s_т(□_р)$ при v = 60 км/ч (точка **В**). Тормозной путь при снижении скорости от 90 до 60 км/ч будет равен разности ординат точек **А** и **В** (900 – 405 = 495 м).

Эту номограмму можно использовать и для определения необходимого расчетного тормозного коэффициента, при котором поезд можно было остановить с заданной скорости в пределах заданного тормозного пути. Например, чтобы остановить грузовой поезд на горизонтальном прямолинейном пути со скорости 90 км/ч в пределах тормозного пути 1000 м, находим точку пересечения кривой, соответствующей скорости 90 км/ч, с горизонтальной линией при $\mathbf{s_т = 1000}$ **м** (точка С). Получаем: $□_р$ = 35 кН на 100 кН веса состава (или $□_р$ = 0,35).

Чтобы определить $s_т$ или $J_р$ на спусках, необходимо использовать соответствующую номограмму из ПТР. Наибольшую скорость на горизонтальном прямолинейном пути находят по заданному тормозному пути и расчетному тормозному коэффициенту. Например, при $s_т$ = 900 м и $□_р$ = 0,3 (точка **D**) допустимая скорость $v_{доп}$ = 80 км/ч. Если точка оказывается между кривыми скорости, то ее находят методом интерполяций.

На рис. 10.6 показаны номограммы для экстренного торможения пассажирского поезда на спуске 10 ‰ при использовании электропневматического (сплошные линии) и пневматического (штриховые линии) тормозов. Из них видно, что тормозные пути при одинаковых скоростях движения и одинаковых $□_р$ при электропневматических тормозах меньше, чем при пневматических. Так, при v = 100 км/ч и $□_р$ = 0,6 тормозные пути $s_т$ составляют 805 и 870 м

(точки **А** и **В**). При одном и том же тормозном пути расчетный тормозной коэффициент $□_р$ при пневматических тормозах должен быть больше. При v = 100 км/ч и $s_т$ = 800 **м** $□_р$ соответственно равен 0,6 и 0,66 (точки **А** и **С**).

Имея набор номограмм, можно находить результаты тормозных расчетов без выполнения самих расчетов.

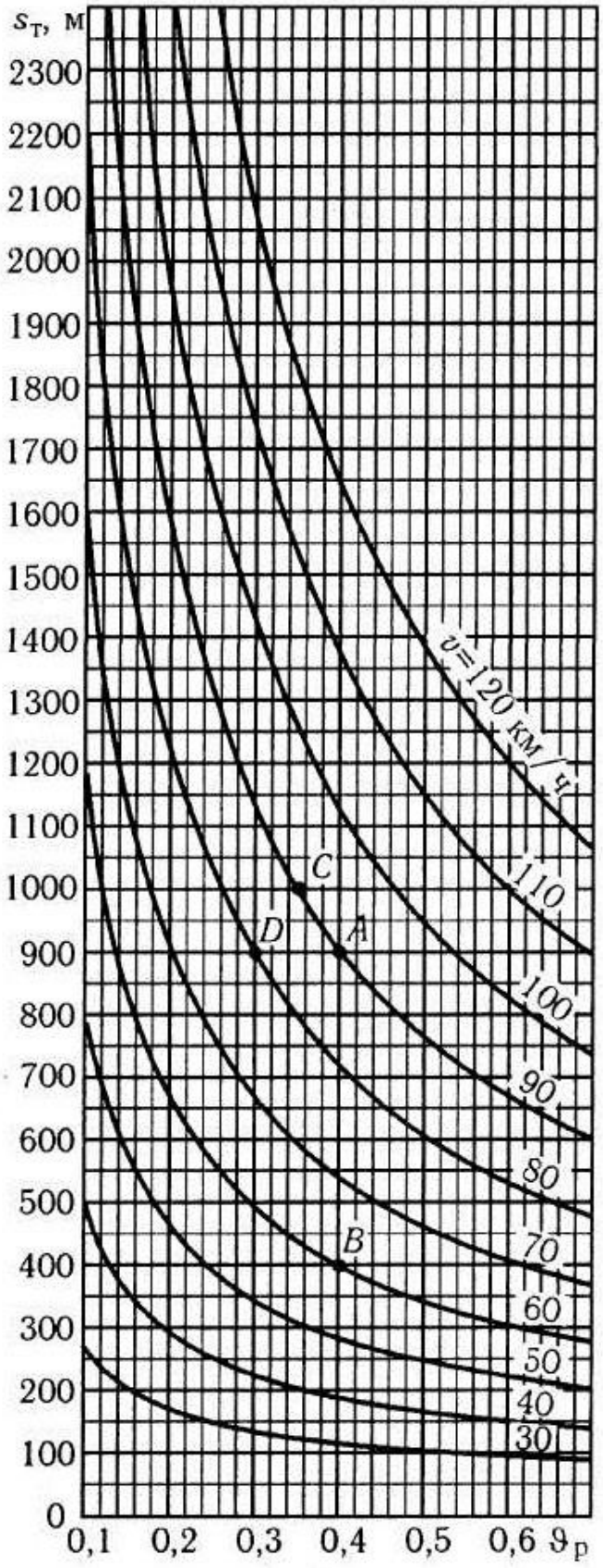


Рис. 10.5. Номограмма для тормозных расчетов грузового поезда при i = 0

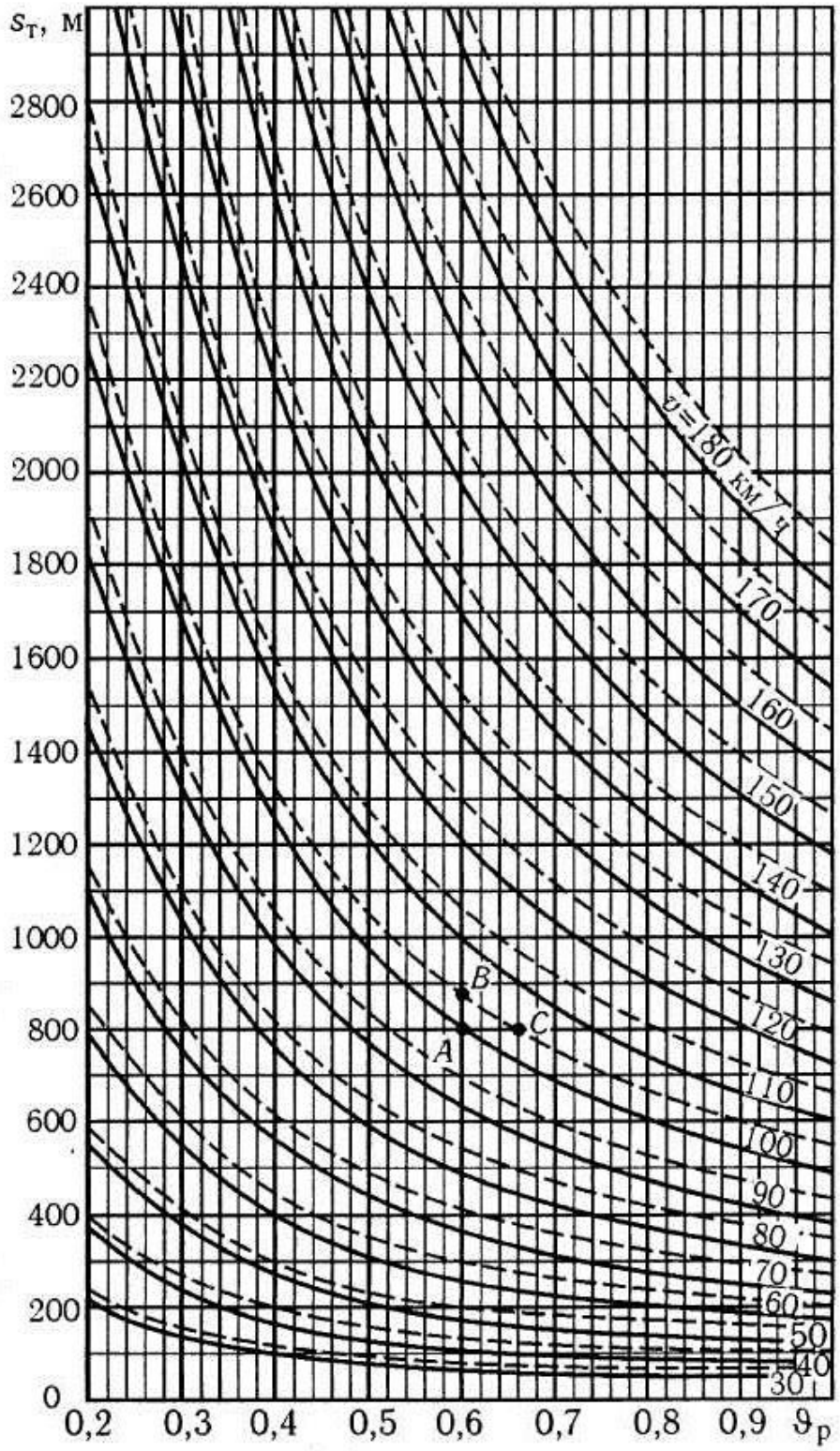


Рис.10.6. Номограмма для тормозных расчетов пассажирского поезда на спуске 10 ‰ при электропневматическом (сплошные линии) и пневматическом (штриховые) торможении

Тема 11
ТОКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КРИВЫЕ ТОКА
11.1. Токовые характеристики электроподвижного состава постоянного тока

Напомним, что ***токовыми характеристиками*** называют зависимость тока тягового электродвигателя, или тока, потребляемого электроподвижным составом, или тока тягового генератора тепловоза от скорости движения. Их используют для нахождения токов при движении поезда с различными скоростями, которые необходимы, чтобы оценить использование мощности тяговых электродвигателей и генераторов, а на электроподвижном составе – и для определения расхода энергии на тягу поезда и расчета элементов системы электроснабжения. Зная ток, проходящий через обмотки электродвигателя или генератора, и время его протекания, определяют нагрев обмоток. При длительной работе локомотива с большими токами нагревание электрических машин может ограничивать наибольшую массу поезда. Поэтому после определения массы состава, скоростей движения и времен хода проверяют выбранную массу состава по условиям нагревания обмоток электрических машин.

При работе электроподвижного состава постоянного тока для расчетов необходимы токовые характеристики, показывающие зависимость тока $I_э$ от скорости v.

Токовые характеристики электроподвижного состава $I_э(v)$ строят, исходя из скоростных характеристик тягового электродвигателя. Для определения тока электроподвижного состава $I_э$ задаются скоростью движения v и по скоростной характеристике $v(I_д)$ находят ток тягового электродвигателя $I_д$. Ток, потребляемый электроподвижным составом, равен току $I_д$, умноженному на число параллельных цепей тяговых электродвигателей:

$$I_э = aI_д,$$

где a – число параллельных цепей тяговых электродвигателей.

Например, для восьмиосного электровоза при последовательном (С) соединении $a_с = 1$, следовательно, $I_э = I_д$. При последовательно-параллельном (СП) – $a_{сп} = 2$ и $I_э = 2I_д$, при параллельном (П) – $a_п = 4$ и $I_э = 4I_д$. Для шестиосного электровоза соответственно $a_с = 1$, $a_{сп} = 2$, $a_п = 4$.

На характеристики наносят ограничивающую линию, которая соответствует току при наибольшей допустимой силе тяги электровоза по сцеплению колес с рельсами или по току тягового электродвигателя.

Токовые характеристики $I_э(v)$ шестиосного пассажирского электровоза ЧС2, построенные на основании скоростных характеристик $v(I_д)$, приведены на рис. 11.1. На них нанесена ограничивающая линия **ABCDEG** по наибольшему току тягового электродвигателя. Ограничивающая линия по току проведена следующим образом: средний ток тягового электродвигателя $I_{дп}$ при пуске электровоза равен 730 А, а пиковое значение $I_{д\ max}$ – примерно 800 А. При разгоне электровоза до выхода на ходовую характеристику последовательного соединения тяговых электродвигателей (v = 25 км/ч) ток $I_э = I_{дп} = 730$ А (линия **AB**).

При изменении скорости движения среднее значение тока поддерживается за счет уменьшения сопротивления реостата (использованием маневровых позиций при разгоне в зоне малых скоростей, когда ток $I_д < I_{дп}$, пренебрегаем).

Обычно при тяговых расчетах не учитывают разгон с использованием позиций ослабления возбуждения на последовательном и последовательно-параллельном соединениях. Поэтому при v = 25 км/ч тяговые электродвигатели должны быть переприсоединены на последовательно-параллельное соединение и включен пусковой реостат. Ток $I_э$ увеличится с 730 до 1460 А (линия **BC**) и не будет изменяться до выхода на ходовую характеристику СП–соединения при v = 53,8 км/ч (точка **D**).

Затем группы тяговых электродвигателей переводят на параллельное соединение. При этом $a_п = 3$, ток увеличится до 2190 А (730 • 3) (линия **DE**). В цепь тяговых электродвигателей включают пусковой реостат, который выводят до скорости 80,3 км/ч, поддерживая ток $I_э$ – 2190 А неизменным (линия **EG**). При этой скорости выходят на ходовую характеристику полного возбуждения параллельного соединения, и электровоз работает на ней до скорости 84 км/ч.

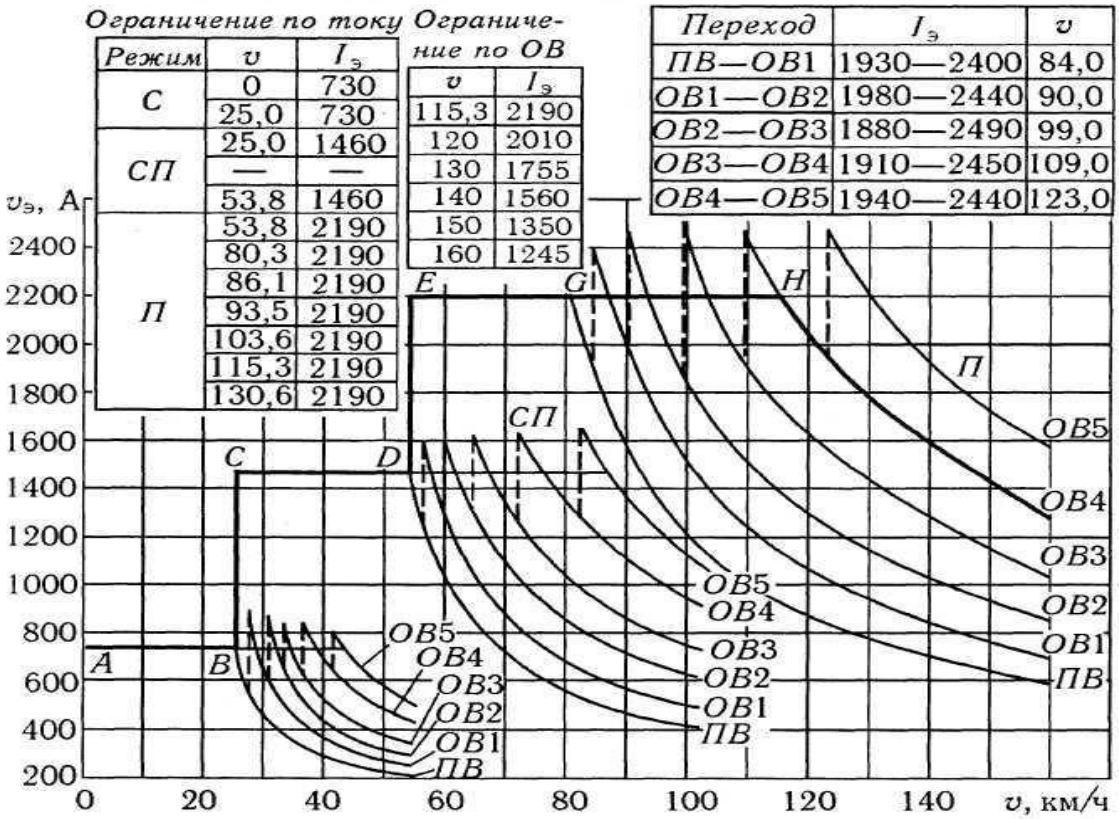


Рис. 11.1. Токовые характеристики электровоза ЧС2

Далее переходят на характеристику ослабленного возбуждения **ОВ1** по вертикальной линии (при неизменной скорости). Изменения токов приведены в таблице на рис. 11.1. При этом ток в соответствии с таблицей точек перехода изменяется от $I_{эmjn}$ (1930 А) до $I_{эmax}$ (2400 А). Затем электровоз работает на характеристике **ОВ1** до скорости 90 км/ ч, при которой ток изменяется от 1980 до 2440 А.

Дальнейшие изменения тока легко установить из таблицы на рис. 11.1. После перехода на характеристику **ОВ4** (на предпоследнюю токовую характеристику) значение тока берут по этой кривой. Характеристику **ОВ5** – последнюю на электровозе ЧС2 – подобно последним характеристикам других локомотивов (как было указано при рассмотрении тяговых характеристик), для расчетов не используют, и она остается в резерве машиниста.

Чтобы упростить расчеты, ток при переходах на характеристики ослабленного возбуждения часто приравнивают среднему току: $I_э$ = 2190 А (по линии **GH**).

Если в расчетах были использованы тяговые характеристики на ступенях ослабления возбуждения при С- и СП- соединениях тяговых электродвигателей, то переходы на СП- и П- соединения нужно брать при более высоких скоростях.

Токовые характеристики электровозов ВЛ10 и ВЛ10У приведены на рис. 11.2. Их строят на основании скоростных характеристик тягового

электродвигателя ТЛ-2К (см. рис. 3.21). Линию ограничения на них наносят, исходя из допустимой силы тяги по сцеплению. Для этого из тяговой характеристики электровоза (см. рис.3.22, а) или по формулам рассчитывают силу тяги по сцеплению и определяют $F_{к\ сц}$. Затем, разделив ее на число движущих осей, получают силы тяги, развиваемые каждой колесной парой, соединенной с тяговым электродвигателем
$F_{кд}$.

Эти расчеты выполняют для разных скоростей. Для каждого значения скорости по силе тяги $F_{кд}$ определяют пусковой ток $I_д$ из электротяговых характеристик $F_{кд}(I_д)$. Полученное значение $I_д$ умножают на число параллельных ветвей электродвигателей а и получают значение $I_э$, которое откладывают при этой скорости. В связи с уменьшением силы тяги по сцеплению, в зависимости от скорости, токи $I_д$ и $I_э$ также снижаются.

Так, электровоз ВЛ10 при скорости **v,** равной нулю, развивает силу тяги по сцеплению $F_{ксц}$ = 614 кН (см. рис. 3.22, а). Следовательно, каждый тяговый электродвигатель развивает при этом на ободах колес силу тяги $F_{кд}$= 614000 / 8 = 76750 Н. Как видно из рис. 3.21, она реализуется при токе $I_д$ = 685 А. Так как при последовательном соединении тяговых электродвигателей $I_д = I_э$, этот ток будет потреблять электровоз при v = 0 (точка **А**). Аналогично можно определить ток при v = 5 км/ч, исходя из $F_{к\ сц}$ = 535 кН. Следовательно, $F_{кд}$ = 66 875 Н и $I_д = I_э$ = 615 А (точка В).

Когда скорость достигает 10 км/ч, сила тяги $F_{ксц}$ = 514 кН, $F_{кд}$= 64230 Н и $I_д$ = 595 А (точка С). До этой скорости тяговые электродвигатели были соединены последовательно, а при v = 10 км/ч их переводят на последовательнопараллельное соединение и включают в цепь реостат. Для реализации одинаковой силы тяги до и после перехода на СП-соединение каждый тяговый электродвигатель должен потреблять тот же ток $I_д$ = 595 А, а электровоз при $a_{сп}$ = 2 – ток, в 2 раза больший: $I_э$ = 595 • 2 = 1190 А (точка D).

При **v = 22 км/ч** выходят на безреостатную характеристику **ПВ** последовательно-параллельного соединения. Далее переходят на параллельное соединение групп электродвигателей. Сила тяги при этой скорости $F_{к\ сц}$ = 497 кН и $F_{кд}$ = 62145 Н, ток $I_д$ = 575 А. Следовательно, при этой скорости на СП-соединении ток $I_э$ = 575 • 2 = 1150 А (точка G), а после перехода на параллельное соединение ($a_п$ = 4) – $I_э$ = 575 • 4 = 2300 А (точка **Н**).

Затем определяют токи в точках **L** и **M (**v = 30 и 40 км/ч). В точке **N** (при v = 46,7 км/ч, $I_э$ = 2140 А) выходят на безреостатную характеристику при полном возбуждении параллельного соединения групп тяговых электродвигателей и работают по ней до точки **R.** Далее переходят на характеристику ослабленного

возбуждения **ОВ1,** ток изменяется по вертикальной тонкой линии **RS** при скорости 48,5 км/ч. Значения токов при переходах можно взять из табл. 3.1. Ток $I_э$ при переходе на **ОВ1** изменяется с 1970 до 2480 А.

Точку **S** можно также найти следующим образом: из тяговых характеристик после перехода на **ОВ1** мы видим, что $F_К$ = 508,2 кН, следовательно, $F_{кд}$ = 63 520 Н. По электротяговым характеристикам $F_{кд}(I_д)$ при **ОВ1** определяем, что этой силе тяги соответствует ток $I_д$ = 620 А и $I_э$ = 620 • 4 = 2480 А. Аналогично находят или берут из таблиц точек перехода значения токов при переходах на характеристики **ОВ2** и **ОВ3** (характеристика **ОВ3** является расчетной).

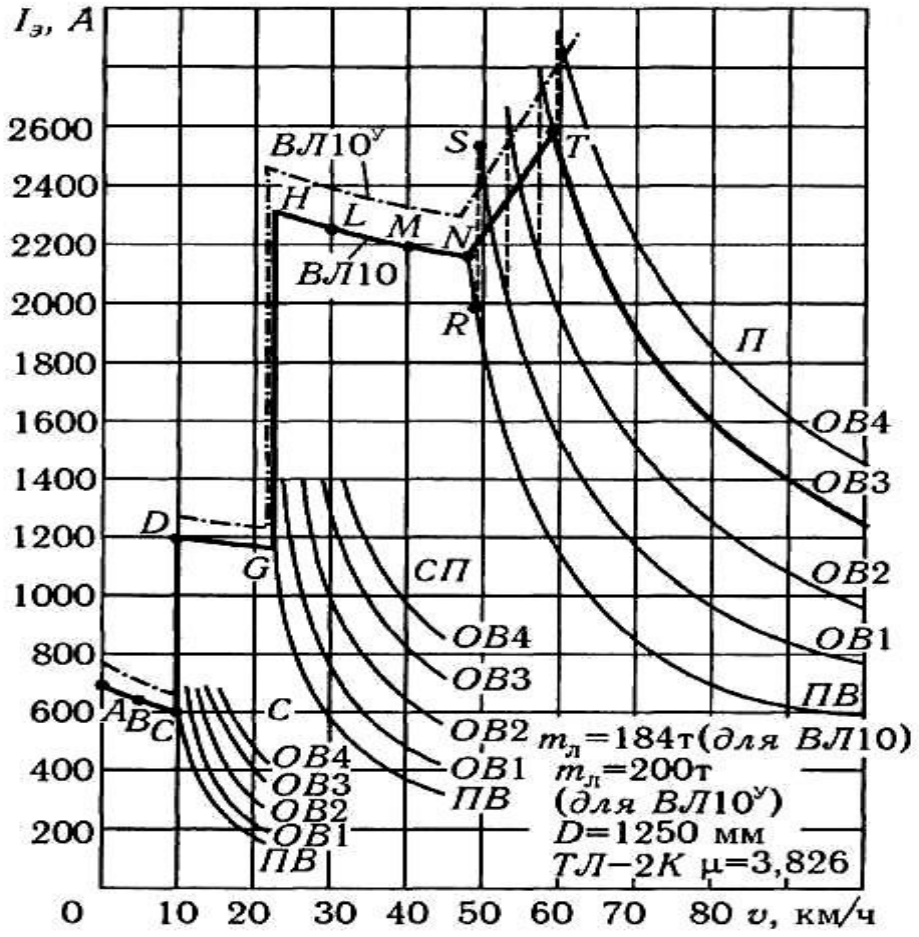


Рис. 11.2. Токовые характеристики электровозов ВЛ10 и ВЛ10У

Чтобы упростить расчеты токов в зоне переходов на ослабленное возбуждение, иногда пользуются средними значениями токов – линией **NT.** При ограничении силы тяги электроподвижного состава сцеплением колес с рельсами ток с уменьшением коэффициента регулирования возбуждения возрастает (на **ОВ4** – $I_э$ = 2720 А, а на **ПВ** – $I_э$ = 2140 А), хотя $F_{ксц}$ на **ПВ** больше, чем на **ОВ4.** Это объясняется тем, что электромагнитная сила тяги пропорциональна произведению тока на магнитный поток ($F_{кд\ эм}$ = 3,6СФ$I_д$). При одном и том же токе $I_д$ магнитный поток при меньшем □ будет меньше и, следовательно, сила тяги

также будет меньше. Чтобы получить большую силу тяги при меньшем □, тяговый электродвигатель должен потреблять больший ток.

На рис. 11.2 штрихпунктирной линией показаны ограничивающие линии по сцеплению колес с рельсами электровоза ВЛ10У, имеющего большую массу (200 вместо 184 т у электровоза ВЛ10).

Токовые характеристики $I_Э(v)$ используют для построения кривых тока $I_Э(s)$, по которым рассчитывают расход электроэнергии на тягу поезда. Поделив значения токов $I_Э$ на число параллельных цепей тяговых двигателей, определяют токи $I_д$, а по ним – степень нагревания обмоток двигателей.

11.2. Токовые характеристики ЭПС переменного тока

Скоростные и электротяговые характеристики $v(I_д)$ и $F_{кд}(I_д)$ тяговых электродвигателей электроподвижного состава переменного тока приводят только для высшей ступени регулирования. Для расчетов нагревания тягового электродвигателя необходимо иметь токовые характеристики $I_д$**(v),** построенные с учетом внешних характеристик преобразовательной установки для всех ходовых позиций и всех ступеней ослабления возбуждения. На эти характеристики должны быть нанесены ограничивающие линии по сцеплению колес с рельсами или по коммутации тяговых электродвигателей, из которых берут значения пускового тока.

Токовые характеристики $I_д(v)$ тягового электродвигателя НБ-418К при работе на электровозах ВЛ80^т и ВЛ80^с для ходовых позиций приведены на рис. 11.3, а. На них нанесена линия ограничения тока по сцеплению колес с рельсами **AS,** показаны переходы на позиции ослабленного возбуждения вертикальными штриховыми линиями и средние токи при этих переходах (линия **ST**). Токовые характеристики электродвигателя НБ-418К при работе на электровозе ВЛ80^р показаны на рис. 11.3, б для разных зон регулирования.

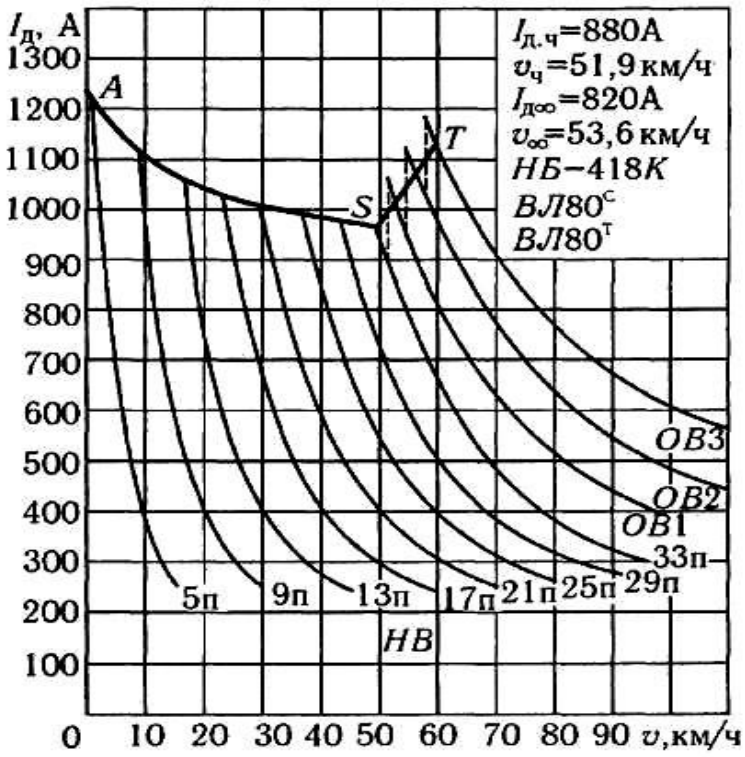


Рис. 11.3, а. Токовые характеристики $I_д(v)$ тягового электродвигателя НБ-418К электровозов ВЛ80^С и ВЛ80^Т

Аналогичные характеристики тягового электродвигателя НБ-514 электровоза ВЛ85 изображены на рис. 11.4 для четырех зон регулирования. На рис. 11.5 приведены токовые характеристики $I_д(v)$ тягового электродвигателя AL-4442nP электровозов ЧС4^Т и ЧС4 с ограничением тока по коммутации (линия **AST**) и изменениями тока при переходе на позиции ослабленного возбуждения **ОВ1 ... ОВ3** (штриховые вертикальные линии).

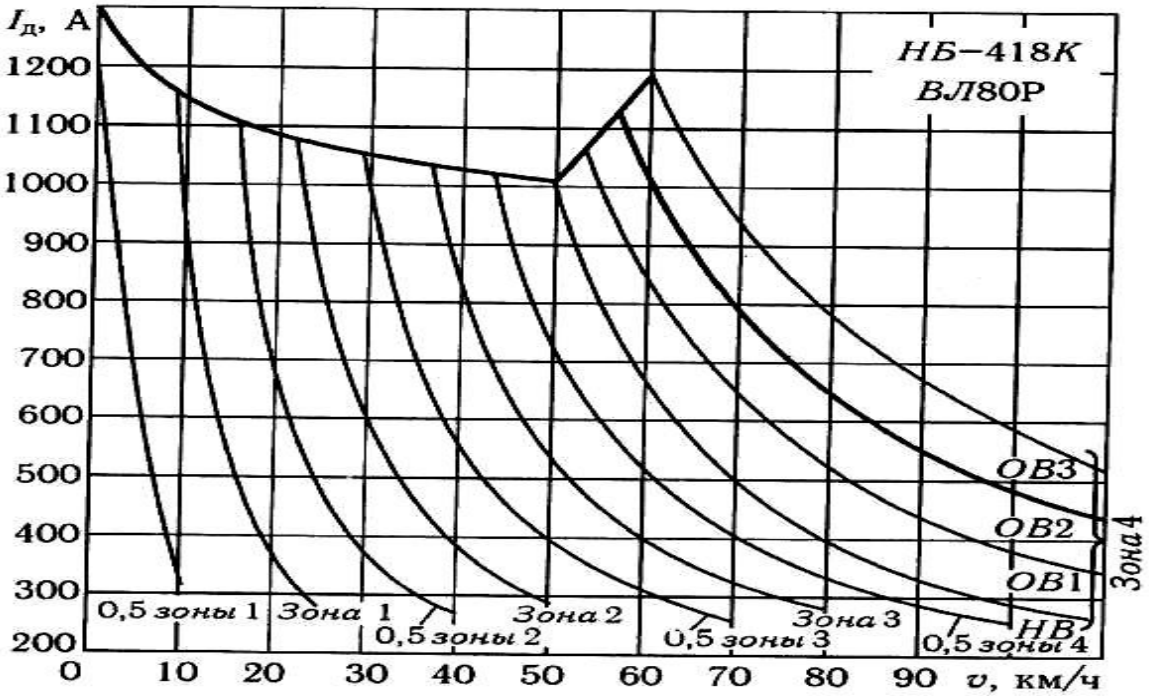


Рис. 11.3, б. Токовые характеристики $I_д(v)$ тягового электродвигателя НБ-418К электровоза ВЛ80Р

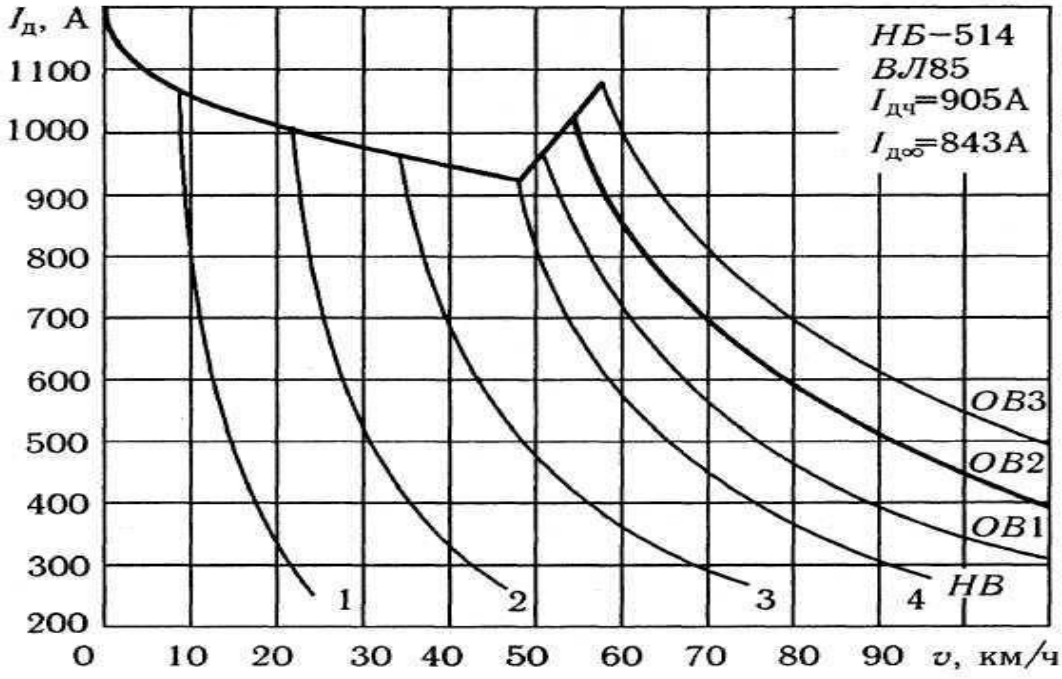


Рис. 11.4. Токовые характеристики $I_д(v)$ тягового электродвигателя НБ-514 электровоза ВЛ85

Как известно из электротехники, в системе переменного тока расход электрической энергии определяют не по току, потребляемому электроподвижным составом, а по его активной составляющей. Следовательно, при системе переменного тока необходимо знать не только полный ток I_d, потребляемый электровозом или электропоездом, по которому определяют

нагрузки в обмотках тягового трансформатора электроподвижного состава и системе электроснабжения, но и его активную составляющую I_{da}. В связи с этим должны быть известны токовые характеристики $I_d(v)$ и $I_{da}(v)$, по которым строят кривые этих токов в функции пути.

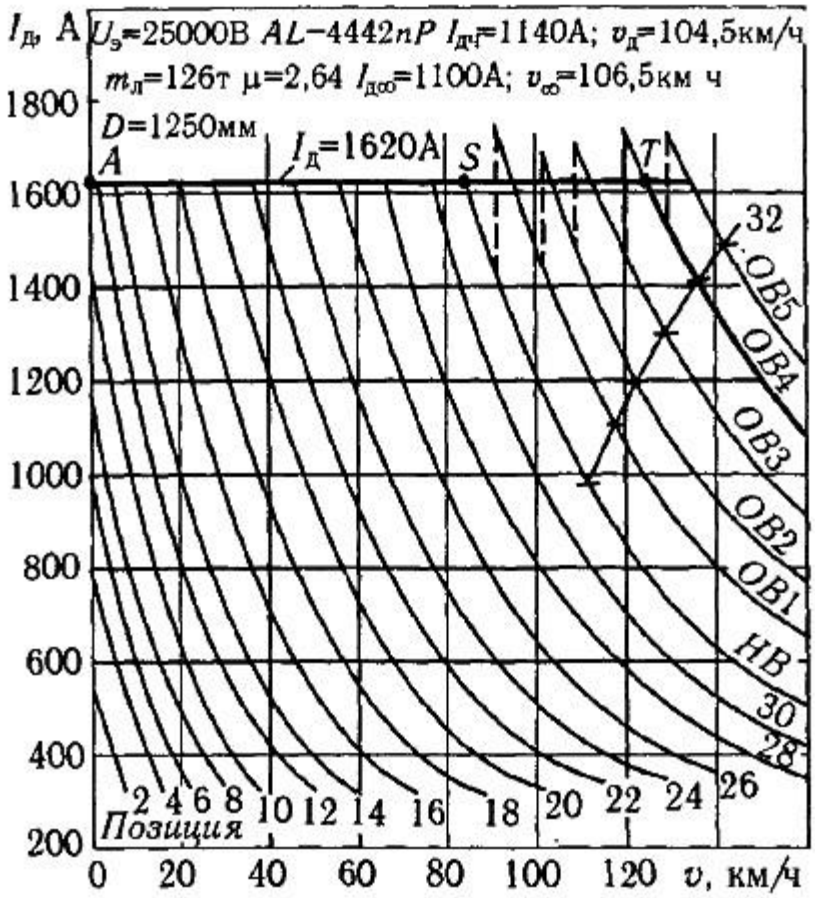


Рис. 11.5. Токовые характеристики $I_д(v)$ тягового электродвигателя AL-4442nP электровозов ЧС4^Т и ЧС4

Токовая характеристика, показывающая зависимость действующего значения тока, протекающего по первичным обмоткам трансформатора электроподвижного состава I_d от скорости *v*, может быть построена на основании токовой характеристики $I_д(v)$ с учетом параметров преобразовательной установки.

Ток в первичной обмотке трансформатора без учета расхода электроэнергии на собственные нужды при мостовой схеме выпрямления:

$$I_1 \approx I_2 / к_т;$$

где I_2 – действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора;

$к_т$ – коэффициент трансформации.

Полный ток электроподвижного состава, состоящего из $n_т$ одинаковых секций, на каждой из которых есть преобразовательная установка:

$$I_d \approx I_1 n_т;$$

или, так как при мостовой схеме $I_2 \approx к_{эф} I_в$,

$$I_d \approx n_т I_в к_{эф} / к_т. \qquad (11.1)$$

где $к_{эф}$ – коэффициент эффективности переменного тока.

Коэффициент трансформации определяют из формулы (4.4) – $к_т \approx 0{,}9U_с / U_{во}$, а выпрямленный ток – из выражения $I_в \approx aI_д$, где а – число параллельных цепей тяговых электродвигателей на секции электровоза или моторного вагона.

Подставив эти выражений в уравнение (11.1), получим, ***полный ток***:

$$I_d \approx \frac{an_т U_{во}}{0{,}9U_с} к_{эф} I_д. \qquad (11.2)$$

Пользуясь этой формулой, для каждого значения тока $I_д$ можно определить ток, потребляемый электроподвижным составом, а значит, построить токовые характеристики $I_d(v)$. Значения а и $n_т$ принимают на основании схем соединения электродвигателей и числа трансформаторов на электроподвижном составе. $U_{во}$ берут из внешней характеристики преобразователя на данной ступени регулирования, $U_с$ – номинальное напряжение на токоприемнике принимают равным 25 кВ; $к_{эф}$ – коэффициент эффективности переменного тока обычно принимают равным 0,97 (для приближенных расчетов иногда принимают 1,0).

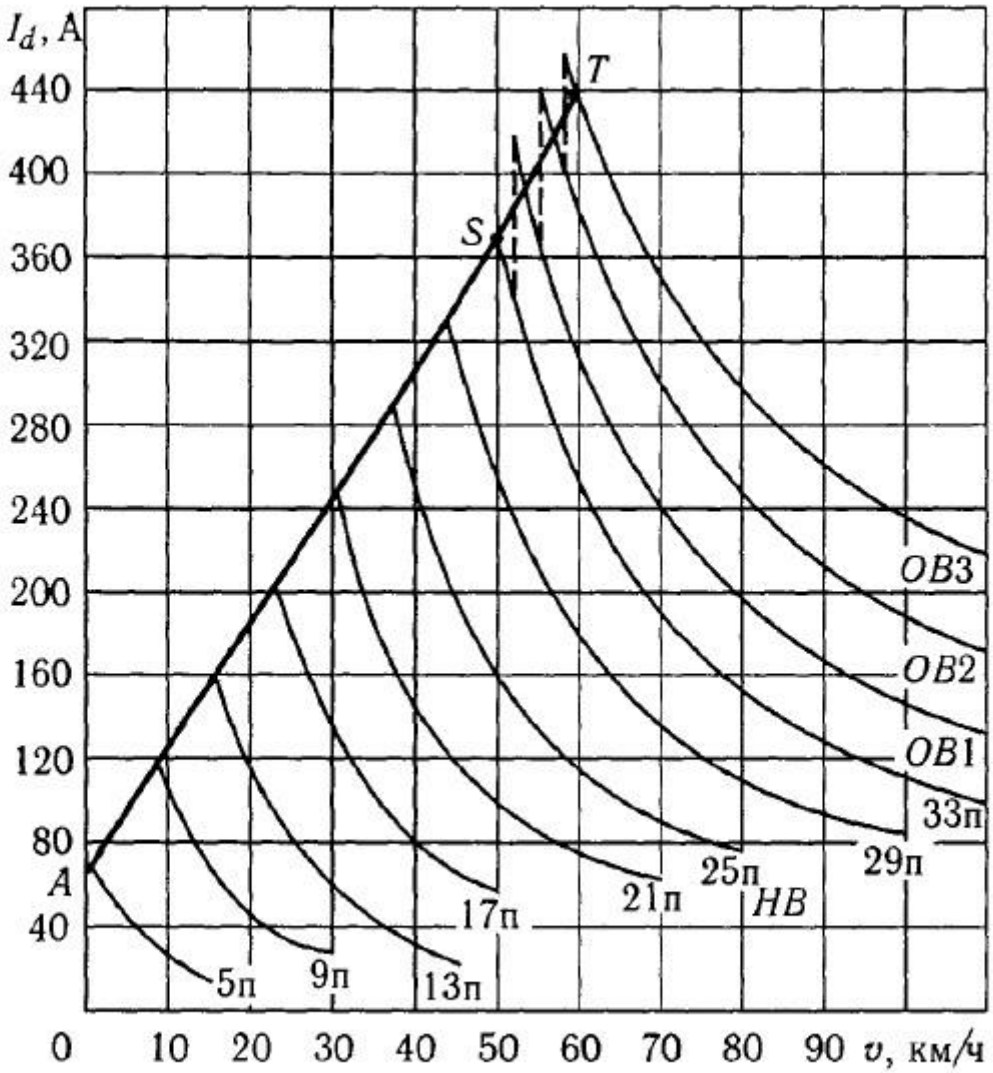


Рис. 11.6. Токовые характеристики $I_d(\upsilon)$ электровозов ВЛ80^С и ВЛ80^Т

Пересчет выполняют в следующем порядке. Задают несколько значений $\mathbf{I_д}$ во всем диапазоне возможных нагрузок и из указанных характеристик для каждой ступени регулирования определяют скорости движения. Затем для этих значений тока подсчитывают величины $\mathbf{I_d}$ по формуле (11.2).

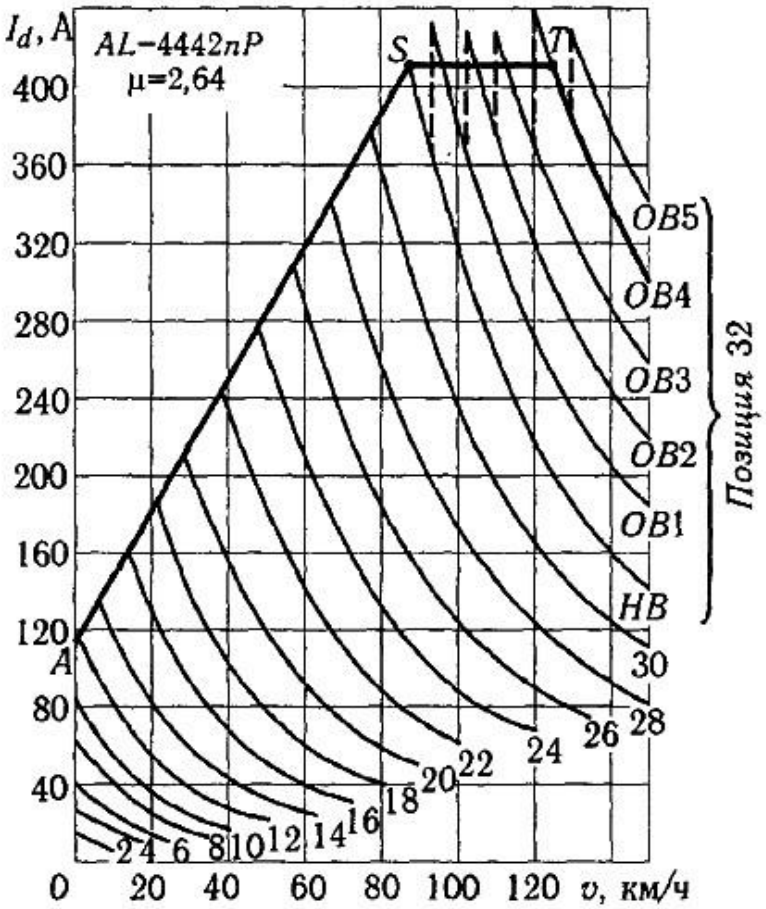


Рис. 11.7. Токовые характеристики $I_d(v)$ электровозов ЧС4^т и ЧС4

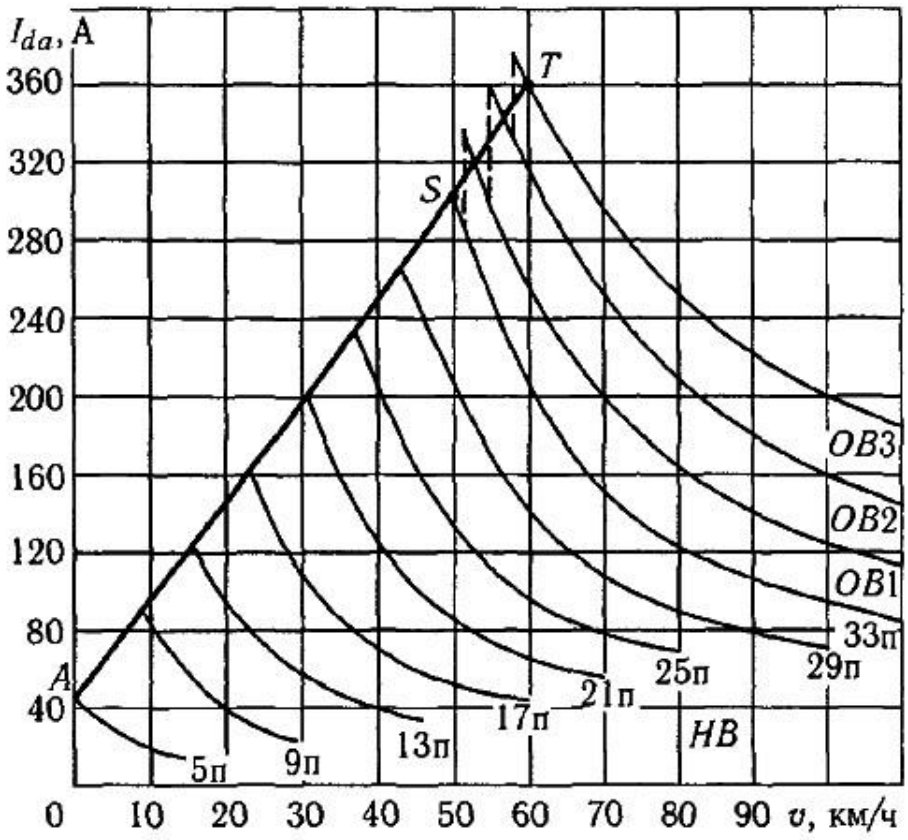


Рис. 11.8. Токовые характеристики $I_{da}(v)$ электровозов ВЛ80^с и ВЛ80^т

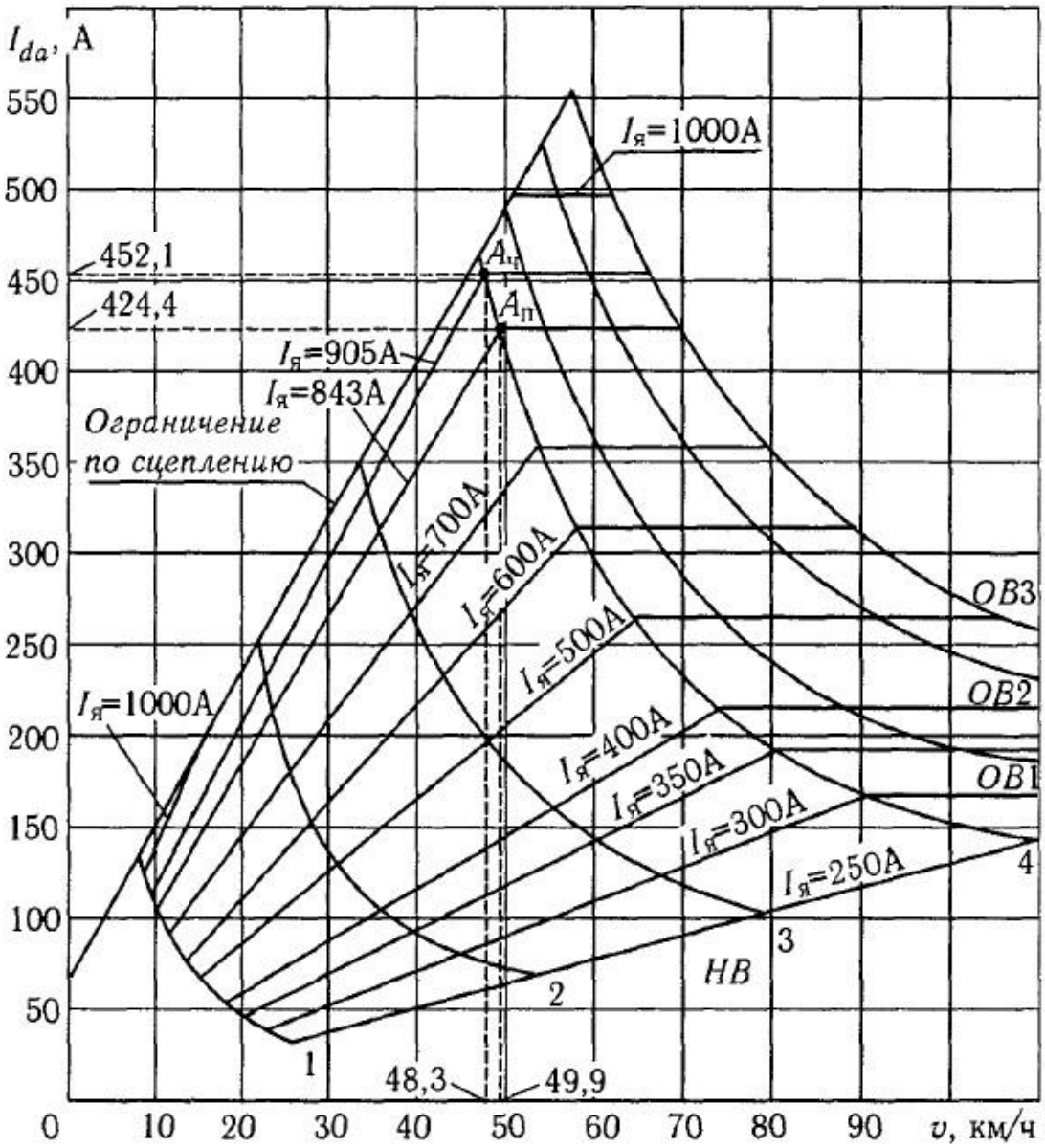


Рис. 11.9. Токовые характеристики $I_{da}(v)$ электровоза ВЛ85

Таким образом, для каждого значения скорости движения находят ток I_d на данной ступени регулирования, и строят кривые $I_d(v)$. На рис. 11.6 показаны характеристики $I_d(v)$ электровозов ВЛ80^с и ВЛ80^т с тяговыми электро-двигателями НБ418К. На них нанесены ограничивающие значения токов по сцеплению колес с рельсами (линия AST). Поскольку при ограничении по сцеплению колес с рельсами ток $I_д$ изменяется в зависимости от скорости по кривой линии, на графике рис. 11.6 ограничивающие линии также должны быть кривыми. На практике эту кривую заменяют прямой **AS,** допуская очень небольшую погрешность. Как видно из графика, ток возрастает с увеличением скорости. Это объясняется уменьшением коэффициента трансформации $\mathbf{к_т}$ трансформатора в процессе пуска и разгона ЭПС, необходимого для увеличения подводимого к

двигателям напряжения. Точки перехода на позиции ослабления возбуждения пересчитывают с учетом использования максимальных значений тока. Штриховыми вертикальными линиями показаны переходы на позиции ослабления возбуждения.

На рис. 11.7 приведены токовые характеристики электровозов ЧС4^{Т} и ЧС4 с тяговыми двигателями AL-4442nP. Буквенные обозначения на них аналогичны рис. 11.6.

Для определения расхода электрической энергии на тягу поездов нужно построить зависимость активной составляющей полного тока (активного тока) I_{da}, потребляемого электроподвижным составом, от скорости. Активный ток —

$$I_{da} \square I_d \square\square; \qquad (11.3)$$

где □□ коэффициент мощности электроподвижного состава, определяемый по уравнениям (4.18) или (4.19).

Ток I_{da} можно также рассчитать непосредственно по току электродвигателя $I_д$. Для этого в уравнение (11.3) подставим значения I_d из выражения (11.2) и □ из равенства (4.19): $an^{т} \square U_{во} \square\square R_{э} \square aR_{об} \square I_{д} \square I_{д}$. (11.4)

$$I_{da} \square U_c$$

По этой формуле можно подсчитать значения I_{da} и, имея зависимость $I_д(v)$, построить токовую характеристику активного тока $I_{da}(v)$. На кривые наносят ограничивающие линии и линии перехода на характеристики ослабления возбуждения.

Токовые характеристики активного тока $I_{da}(v)$ электровозов ВЛ80^{т} и ВЛ80^{с} с тяговыми электродвигателями НБ-418К приведены на рис. 11.8, соответствующие кривые для электровозов ВЛ85 с тяговыми двигателями НБ-514 – на рис. 11.9 и электровозов ЧС4 и ЧС4^{т} с двигателями AL-4442nP – на рис. 11.10.

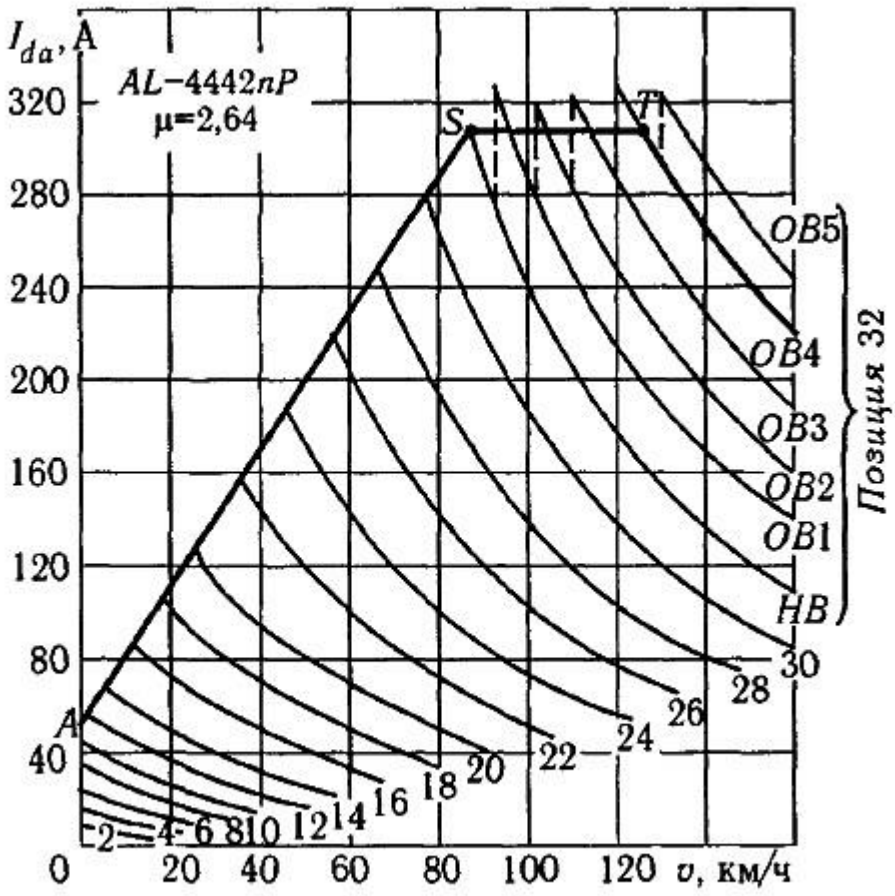


Рис. 11.10. Токовые характеристики $I_{da}(v)$ электровозов ЧС4^{Т} и ЧС4

Ограничивающие линии на характеристики активного тока рассчитывают и наносят с учетом тех условий, которые принимали при нахождении ограничивающих линий на характеристиках полного тока.

11.3. Построение кривых тока электроподвижного состава

На основании кривых скорости движения в функции пути v(s) и токовых характеристик электроподвижного состава постоянного тока $I_Э(v)$ строят кривую тока, потребляемого электровозом или электропоездом, в функции пути $I_Э(s)$.

Соответствующий ток определяют с помощью токовых характеристик $I_Э(v)$. Эти построения выполняют следующим образом. Для точек изломов кривой v(s) (на границах приращений скорости □v) по токовым характеристикам $I_Э(s)$ находят токи $I_Э$, которые откладывают в произвольно выбранном масштабе в соответствующих точках пути. Соединив полученные точки прямыми линиями, получают кривую тока.

Для уяснения порядка построения кривой $I_Э(s)$ рассмотрим пример.

Пример. По заданной кривой v(s) на рис. 11.11 и токовой характеристике электровоза ВЛ10 (см. рис. 11.2) построить кривую тока, потребляемого этим электровозом, в функции пути $I_Э(s)$.

Решение: В соответствии с токовой характеристикой электровоза ВЛ10 отметим интервалы скоростей, в которых электровоз работает при различных соединениях и возбуждениях тяговых электродвигателей: при v = 0...10 км/ч – последовательное соединение, при v = 10...22 км/ч – последовательно-параллельное, при v = 22...46,7 км/ч – параллельное с включенными пусковыми резисторами, при v = 46,7...48,5 км/ч – параллельное при полном возбуждении **ПВ,** при v = 48,5...52 км/ч – при ослабленном возбуждении **ОВ1,** при v = 52...56 км/ч – **ОВ2**, при v = 56 км/ч и выше – **ОВ3.** На графике этими буквами показаны начала каждого режима.

Из токовой характеристики электровоза видно, что при v = 0 ток $I_Э$ = 685 А (точка **А,** см. рис. 11.2). Это значение тока откладывают в произвольном масштабе при v = 0 (точка **0** на рис. 11.11). При v = 10 км/ч ток $I_Э$ = 595 А (точка **С** на рис. 11.2). Его откладывают в точке **1'** на рис. 11.11 при скорости v = 10 км/ч. При этой скорости происходит переключение тяговых электро-двигателей с последовательного на последовательно-параллельное соединение (см. рис. 11.2), и ток удваивается (1190 А). Это значение наносят на график и получают точку **1".** При скорости v = 22 км/ч ток $I_Э$ = 1150 А – получают точку **2.**

Так как при v = 22 км/ч электродвигатели переводят с последовательнопараллельного соединения на параллельное, ток увеличивается в 2 раза (точка **2"** — 2300 А). При v = 30 км/ч, ток равен 2230 А (точка **3**), при v = 40 км/ч – 2170 А (точка **4**). В точке 5 при скорости 46,7 км/ч выходят на безреостатную характеристику полного возбуждения параллельного соединения групп тяговых электродвигателей, и ток электровоза $I_Э$ равен 2140 А (точка **5**). Далее движение происходит по ходовой характеристике до v = 48,5 км/ч, при которой ток на характеристике **ПВ** равен 1970 А (точка **6**).

В связи с переходом с **ПВ** на **ОВ** ток возрастает до 2480 А (точка **6"**). При движении по ходовой характеристике **ОВ1** от 48,5 до 52 км/ч ток $I_Э$, снова снижается до 2060 А (точка **7**). Переход на ОВ2 вызывает увеличение тока до 2670 А (точка **7**). Движение по характеристике **ОВ2** от 52 до 56 км/ч вызывает уменьшение тока $\mathbf{I_Э}$ до 2270 А (точка **8**). Переход на **0В3** сопровождается увеличением тока $I_Э$ до 2780 А (точка **8"**).

Далее двигаются на **ОВ3.** При увеличении скорости до 60 км/ч ток снижается до 2420 А (точка **9'**), при скорости 65 км/ч ток равен 2090 А (точка **10**), при v = 70 км/ч – 1870 А (точка **11**), при v = 72 км/ч – 1800 А (точка **12'**). Затем скорость снижается (в связи с движением на подъем), а ток соответственно возрастает.

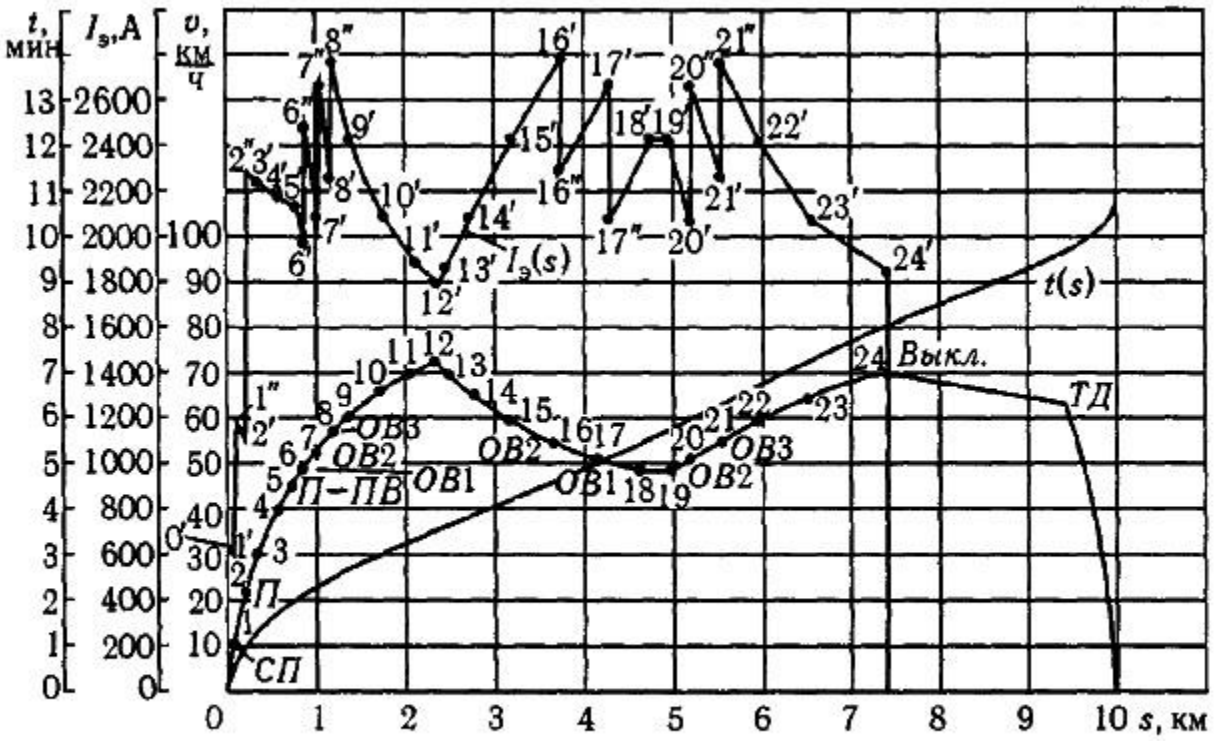


Рис. 11.11. Построение кривой тока электровоза постоянного тока

Его значение легко определить для любой точки рассмотренным методом. В точке **16** ток возрастает до наибольшего значения (2780 А в точке **16'**). Поэтому переходят с **ОВ3** на **ОВ2.** Ток уменьшается до 2270 А (точка **16"**), а затем при снижении скорости снова растет и в точке **17**достигает наибольшего значения для **ОВ2** – 2670 А. Переход на **ОВ1** вызывает уменьшение тока $I_Э$, до 2060 А и т.д. Между точками **18** и **19** скорость остается постоянной (v = 49 км/ч), ток $I_Э$ также остается постоянным (2420А). В точке **24** ток выключен, он снижается от 1860 А до нуля.

Если считать, что ток между найденными точками изменяется прямолинейно и соединить **точки 0, 1, 1, 2', 2", 3', 4, 5, 6** и т.д. прямыми, то получат ломаную линию, показывающую изменение тока $I_Э$ в функции пути.

Когда для электроподвижного состава постоянного тока не требуется определять расход электроэнергии, а нужно рассчитать только нагревание тяговых электродвигателей, можно построить зависимость тока одного электродвигателя от пути – $I_д(s)$. Эту кривую строят по скоростным характеристикам без использования токовых характеристик ЭПС.

Для электроподвижного состава переменного тока строят кривые $I_д(s)$, $I_d(s)$ и $I_{da}(s)$ по кривой скорости v(s), используя токовые характеристики $I_д(v)$, $I_d(v)$ и $I_{da}(v)$. Порядок их построения аналогичен построению кривой тока, потребляемого электроподвижным составом постоянного тока.

На рис. 11.12 показаны кривые $I_д(s)$, $I_d(s)$ и $I_{da}(s)$, построенные по кривой v(s) на основании токовых характеристик.

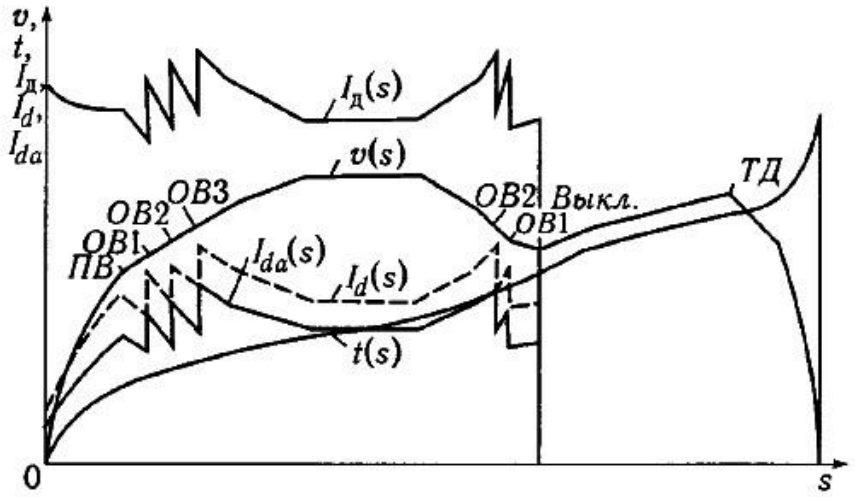


Рис. 11.12. Кривые $I_д(s)$, $I_d(s)$, $I_{da}(s)$ электровоза переменного тока

11.4. Кривые тока тяговых электрических машин тепловозов

Нагревание обмоток генератора или тяговых электродвигателей определяют соответственно по току генератора $I_г$ или току электродвигателя $I_д$ и времени работы. Для этого должна быть известна зависимость тока от скорости движения тепловоза. Ее определяют по току генератора при каждом значении скорости с учетом схемы соединения тяговых электродвигателей. Кривые зависимости тока генератора от скорости движения при номинальной мощности, снимаемые при испытании этих агрегатов, приведены в паспортных данных тепловоза (см. таблицы на тяговых характеристиках тепловозов, рис. 5.13 ... 5.17).

Токовые характеристики генераторов тепловозов 2ТЭ10В и 2ТЭ10М на различных положениях рукоятки контроллера машиниста даны на рис. 11.13. Из этих кривых видно, что при работе в пределах какой-либо характеристики ток генератора плавно изменяется, снижаясь с увеличением скорости движения. Токовые характеристики на низших положениях рукоятки располагаются ниже. При переходе с одного режима на другой при неизменной скорости движения появляются броски тока.

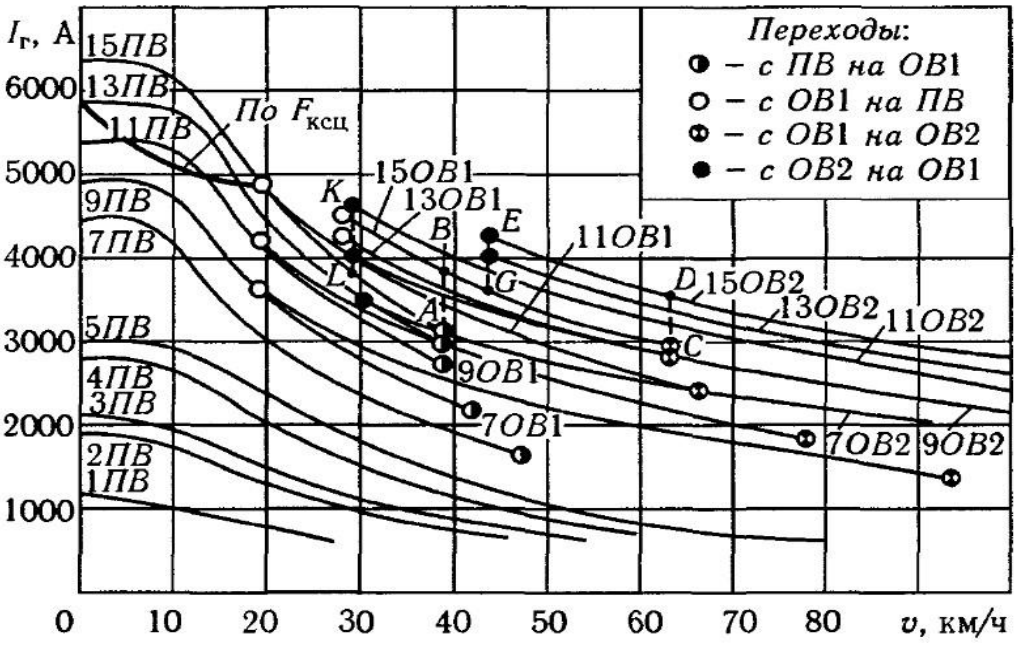


Рис. 11.13. Зависимость тока генератора тепловозов 2ТЭ10В и 2ТЭ10М от скорости

Так, на рис. 11.13 на позиции **15** контроллера тепловоза 2ТЭ10В при скорости 38 км/ч переход с **15-ПВ** на **15 ОВ1** вызывает бросок тока с 3100 до 3800 А (штриховая линия **АВ**). Переход с **15-ОВ1** на **15-ОВ2** при скорости 62,5 км/ч сопровождается броском тока с 2900 до 3500 А (штриховая линия **CD**). Обратные переходы происходят с **15-ОВ2** на **15-ОВ1** при
43 км/ч со снижением тока с 4250 до 3550 А (штриховая линия **EG**); с **15-ОВ1** на **15-ПВ** при v = 27,5 км/ч со снижением тока с 4500 до 3750 А (штриховая линия **KL**). Эти токи можно найти в таблице на рис. 5.13, На рис. 11.14 приведены кривые выпрямленного тока генератора тепловоза 2ТЭ116.

Пользуясь кривыми $I_г$ □v□, по кривым движения v(s) строят токовые кривые $I_г$(s). На ранее построенной кривой v(s) с пометками о режиме работы тяговых электродвигателей берут точки перелома, и для каждой из них по кривой $I_г$ □v□ определяют ток генератора в данном режиме. Нанесенные на график точки соединяют прямыми линиями, показывающими изменение тока генератора в зависимости от пути **s.** При изменении режима работы тяговых электродвигателей (переход с полного возбуждения на ослабленное **ОВ1,** с **ОВ1** на **ОВ2** и наоборот) появляются броски тока.

На рис. 11.15 приведены токовые характеристики генератора тепловоза ТЭП60, а на рис. 11.16 – кривая v(s) движения пассажирского поезда с тепловозом ТЭП60. Кривую $I_г$(s) строят следующим образом. До скорости 23 км/ч ток генератора не меняется и составляет 6150 А. На пути движения поезда до скорости v = 23 км/ч ток $I_г$ изображен горизонтальной линией. Далее, при

движении по характеристике полного возбуждения **15-ПВ** отмечены значения тока $I_г$ при каждом изломе кривой скорости v(s). Полученные точки нанесены в осях координат $I_г$, s.

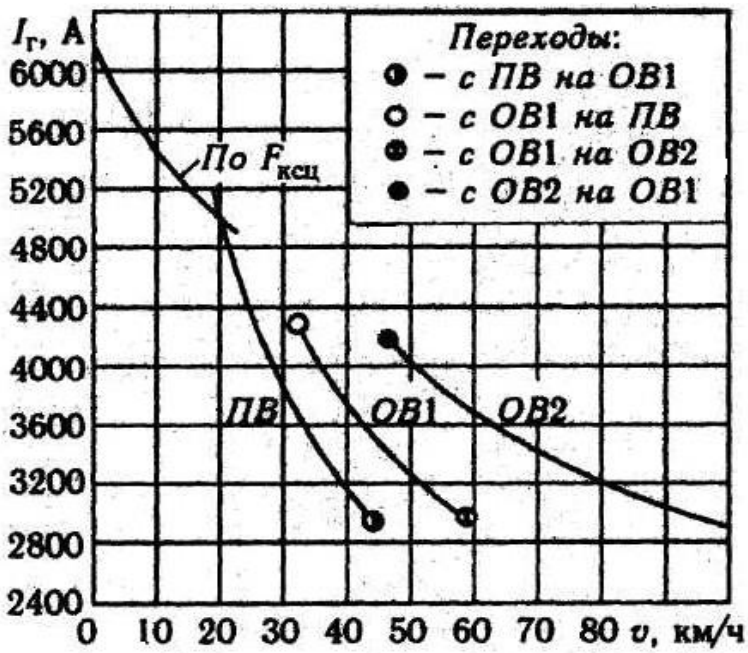


Рис. 11.14. Зависимость тока генератора (после выпрямителя) тепловоза 2ТЭ116 от скорости

При скорости 71,5 км/ч включается первая ступень ослабления возбуждения **15-ОВ1.** Ток возрастает броском с 3100 до 3950 А. Затем токи $I_г$ снова определяют для точек излома кривой v(s) при движении на **15-ОВ1.** При скорости 118 км/ч включается вторая ступень ослабления возбуждения, и ток $I_г$ возрастает с 2950 до 3950 А. Далее токи снова определяют для точек излома кривой скорости. После достижения скорости 140 км/ч начинается ее снижение, вызванное движением по подъему, ток при этом возрастает. При скорости 105 км/ч снимается вторая ступень ослабления возбуждения (переход с **15-ОВ2 на 15-ОВ1**), ток уменьшается с 4200 до 3150 А.

Дальнейшее движение на позиции **15-ОВ1** со снижением скорости до 59 км/ч вызывает увеличение тока до 4400 А. Переход на более легкие участки профиля пути сопровождается повышением скорости и уменьшением тока. Здесь снова по достижении скорости 118 км/ч включается ступень ослабления возбуждения **15ОВ2,** и ток увеличивается с 2950 до 3950 А. Перед станцией при скорости 120 км/ч, которой соответствует ток 3900 А, машинист выключает ток. Соединив найденные точки, получаем кривую $I_г$(s) для данной кривой скорости v(s). Полученные токи для некоторых скоростей можно также брать из таблиц, приведенных на тяговых характеристиках тепловоза ТЭП60 (см. рис. 5.16).

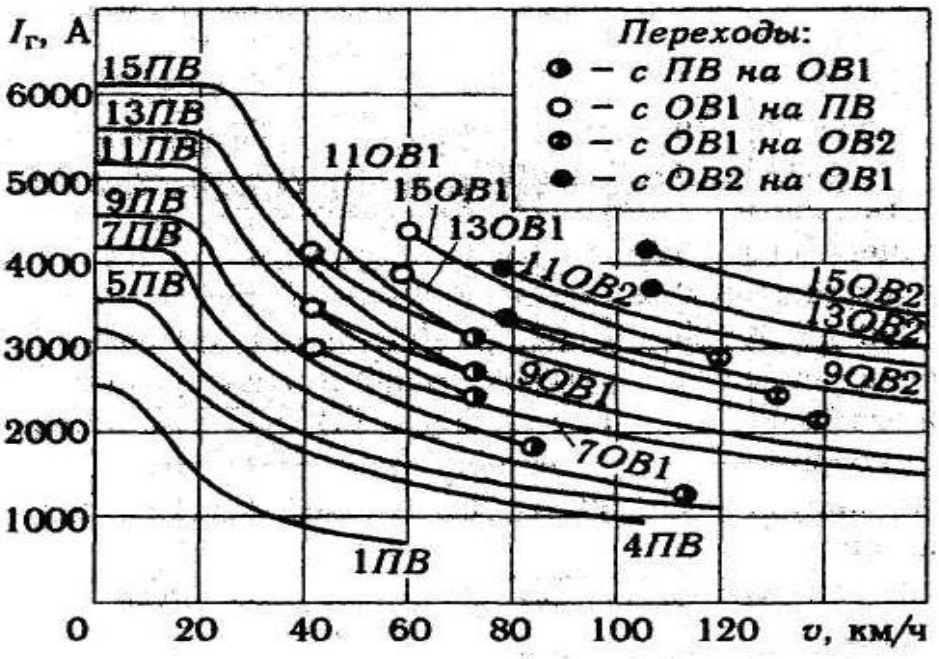


Рис. 11.15. Зависимость тока генератора тепловоза ТЭП60 от скорости

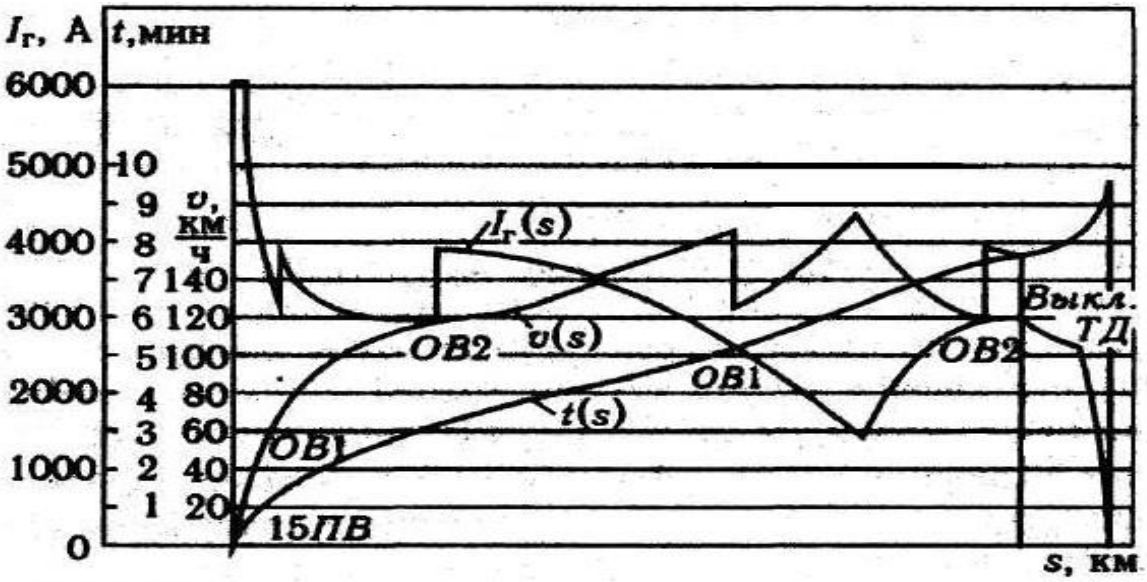


Рис. 11.16. Построение кривой тока генератора тепловоза ТЭП60

Тема 12 НАГРЕВАНИЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ГЕНЕРАТОРОВ

12.1. Общие сведения

Наибольшую силу тяги при расчете массы поезда принимают с учетом ограничения по коммутации тяговых электродвигателей или по сцеплению колес с рельсами. Однако, кроме этих ограничений, на электроподвижном составе необходимо учитывать еще и ограничение по использованию мощности или нагреванию электродвигателей, а на тепловозах – по нагреванию главного генератора или тяговых электродвигателей.

Ранее было установлено, что при работе тягового электродвигателя или генератора в них неизбежны потери энергии, вызывающие нагрев их частей и деталей. Нагревание электрических машин зависит от потерь мощности, продолжительности нагревания и интенсивности охлаждения. Потери в них зависят от нагрузки. Чем больший ток проходит через обмотки машины, тем больше потери энергии в ней и тем сильнее нагреваются ее части (в первую очередь обмотки и коллектор).

Чтобы уменьшить нагрев тяговых электрических машин, их охлаждают воздухом, поступающим снаружи с помощью вентилятора. Он проходит внутри машины и отводит часть тепла. Для электродвигателей с принудительной вентиляцией устанавливают номинальное количество продуваемого через них воздуха. В электродвигателях и генераторах с самовентиляцией, где вентилятор находится на валу якоря, интенсивность охлаждения возрастает с увеличением частоты вращения якоря.

При малом нагреве изоляции, ее изоляционные свойства сохраняются долго. При высоких температурах она интенсивно стареет и теряет свои свойства. Обмотки тяговых электрических машин допускают нагрев до разных температур в зависимости от класса изоляции – **B, F, H.**

Рассматривая процессы нагревания тел, удобнее пользоваться не температурой тела, а превышением его температуры над температурой окружающего воздуха. В зависимости от класса изоляции допускаются различные превышения температур обмоток электрических машин. В табл. 12.1 приведены класс изоляции, ее комитенты, предельно допустимые превышений температур обмоток тяговых электрических машин, их коллекторов над температурой наружного воздуха, не выше 40°С (по ГОСТ 2582-81), В качестве наибольшей температуры наружного воздуха принимают среднюю многолетнюю, по данным метеорологических станций (не менее пяти лет). Если $t_{нв\ max}$ окажется больше 40°С, то допустимые превышения температур уменьшают на число градусов, равное $t_{нв\ max} - 40^{o}C$.

Изоляция класса **F** использована в тяговых электродвигателях электровозов ВЛ85, ВЛ65 ВЛ82^{M}, ВЛ82, тепловозах 2ТЭ10В, 3ТЭ10М, 2ТЭ116, ТЭМ2 и 2М62. С изоляцией класса **H** выполнены обмотки якорей тяговых электродвигателей локомотивов ЧС4^{T}, ЧС4, ТЭП70, полюсов тяговых электродвигателей тепловозов 2ТЭ10Л. В остальных тяговых машинах электровозов и тепловозов и тяговых генераторов тепловозов применена изоляция класса **B.**

Таблица 12.1

Класс изоляции	Компоненты изоляции	Предельно допустимые превышения температур, °С		
		обмотки вращающихся частей	обмотки неподвижных частей	коллектора
B	На основе слюды, асбеста с органическими связующими	120	130	95
F	На основе слюды, асбеста, стекловолокна с синтетическими связующими	140	155	95
H	На основе слюды, асбеста, стекловолокна с кремнийорганическими связующими	160	180	105

При большом токе обмотки электрической машины нагреваются до предельно допустимой температуры быстро, а при малом токе – медленнее. Зависимость времени нагревания обмоток до предельно допустимой температуры от тока тяговых электрических машин показана на рис. 12.1.

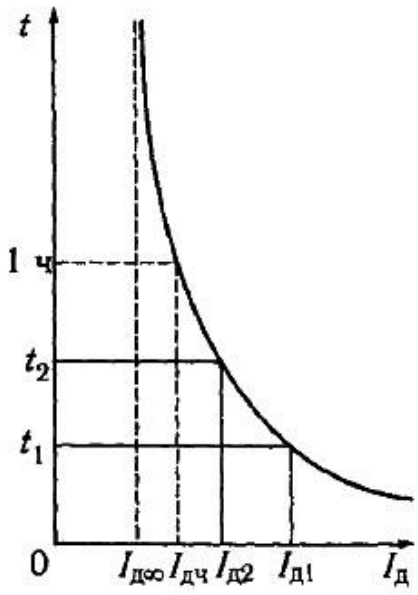


Рис. 12.1. Зависимость времени нагрева обмоток тяговых электрических машин до предельно допустимой температуры от тока

Из нее видно, что при токе $I_{д1}$ обмотки нагреваются до предельно допустимой температуры в течение времени t_1, а при меньшем токе $I_{д2}$ – в течение более длительного времени t_2. Если отложить время $t_ч$, равное 1 ч, то соответствующий ему ток $I_{дч}$ будет нагревать обмотку до предельно допустимой температуры в течение часа. Значение тока $I_{д\infty}$, к которому кривая асимптотически приближается, является током продолжительного режима.

В соответствии с ГОСТ 2582-81 устанавливают **продолжительный и кратковременный режимы работы тягового электродвигателя.** ***Продолжительный режим*** определяется

наибольшим током, при котором в течение неограниченного времени при номинальном напряжении с возбуждением и вентиляцией, соответствующими данному режиму, не превышаются предельно допустимые температуры. ***Часовой режим*** электродвигателей определяется наибольшим током $I_{дч}$, при котором работа с практически холодного состояния (20...25°С) в течение 1 ч при номинальном напряжении и соответствующих возбуждении и вентиляции тягового электродвигателя не вызывает превышения предельно допустимых температур.

Для тяговых генераторов устанавливают номинальные продолжительные режимы при наименьшем и наибольшем напряжениях. В первом случае продолжительный номинальный режим работы генератора определяется наибольшим током якоря, при котором в течение неограниченного времени при номинальной мощности не превышаются предельно допустимые температуры. Во втором случае продолжительный номинальный режим работы тягового генератора определяют по нагреванию обмотки возбуждения, которая в течение неограниченного времени при номинальной мощности не должна превышать предельно допустимых температур.

Таким образом, мощность продолжительного или часового режима определяется нагревом частей тягового двигателя или генератора и прежде всего его обмоток до наибольшей допустимой температуры.

От теплостойкости изоляционных материалов зависят мощность и габаритные размеры электрических машин. Тяговые электродвигатели или генераторы с изоляцией более высокой теплостойкости и одинаковой мощности имеют меньшие габаритные размеры или при сохранении одинаковых габаритов смогут развивать повышенную мощность. Изоляция класса **F** позволяет увеличить мощность тягового электродвигателя примерно на 10 %, а изоляция класса **H** – на 15…20 % по сравнению с изоляцией класса **B.**

На грузовых электровозах устанавливают тяговые электродвигатели мощностью часового режима 400...950 кВт, на пассажирских — от 700 до 1050 кВт, на моторных вагонах электропоездов – 200...250 кВт. Главные генераторы магистральных тепловозов имеют мощности продолжительного режима 1400...3000 кВт, а маневровых тепловозов – 700...1400 кВт. Тяговые электродвигатели тепловозов (при электрической передаче) обычно имеют мощности 340...500 кВт.

Нагревание тяговых электродвигателей электровозов проверяют в летних и зимних условиях. На тепловозах проверку нагревания электрических машин делают только в том случае, если вводится ограничение скорости движения на труднейших подъемах до величин, ниже расчетных. Это связано с работой

тяговых электродвигателей или генераторов с токами, не превышающими номинальные значения.

12.2. Аналитический метод расчета нагревания электрических машин

Проверяя нагревание электрических машин – тяговых электродвигателей электроподвижного состава и тепловозов или главных генераторов тепловозов, — определяют превышение температуры наиболее нагретой части – обмотки якоря или катушек главных или дополнительных полюсов над температурой наружного воздуха. При стендовых испытаниях установлено, что их температура изменяется по закону нагревания однородного твердого тела, известному из физики. Тела обладают теплоемкостью, теплоотдачей и теплопроводностью. При бесконечно большой теплопроводности часть сообщаемого телу тепловой энергии идет на повышение температуры тела, так как оно обладает теплоемкостью, часть тепла отдается в окружающую среду, так как тело обладает теплоотдачей.

Изменение превышения температуры обмотки тягового электродвигателя или генератора над температурой окружающего воздуха во времени t при неизменной нагрузке и одинаковом выделении тепла приведено на рис. 12.2. В начале процесса, когда температура обмотки близка к температуре окружающей среды, нагревание идет интенсивно, так как почти вся тепловая энергия расходуется на повышение температуры тяговой машины; С повышением все больше энергии отдается в окружающую среду, а при установившейся температуре вся выделяемая в тяговой машине тепловая энергия отдается в окружающую среду. Если бы отсутствовала теплоотдача, процесс нагревания характеризовался бы линией **ОА.**

В соответствии с законом нагревания однородного твердого тела превышение температуры тяговых электродвигателей или главных генераторов при номинальных для данной машины условиях охлаждения определяют аналитически:

$$\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-t/T}) + \tau_0 e^{-t/T}, \qquad (12.1)$$

где $\tau_{уст}$ – превышение температуры обмотки при длительном выделении тепла (рис. 12.2); τ_0 – начальное превышение температуры для расчетного промежутка времени; e – основание натуральных логарифмов; T – тепловая постоянная времени, соответствующая такому условному времени, в течение которого нагрелась бы обмотка тягового электродвигателя или генератора до установившейся

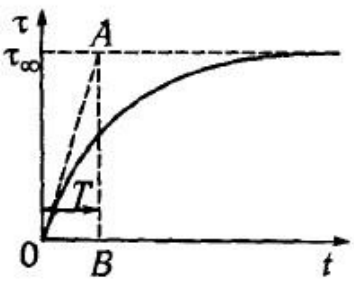


Рис. 12.2. График нагревания тяговой электрической машины при неизменном токе

температуры при полном отсутствии теплоотдачи (отрезок **ОВ** на рис. 12.2).

Когда локомотив движется на выбеге, при механическом торможении или во время стоянки при $I_д = 0$, а следовательно, и $\theta_д$, выделение тепла прекращается, и обмотки остывают. В этом случае превышение температуры:

$$\theta = \theta_0 e^{-t/T}.$$

Для упрощения расчетов используют более простую приближенную формулу, незначительно снижающую точность расчета, при условии, что отношение $\Delta t/T \leq 0{,}1$:

$$\theta = \theta_д \Delta t/T = \theta_0 (1 - \Delta t/T), \quad (12.2)$$

где Δt интервал времени, в течение которого по обмоткам идет неизменный средний ток, мин. Он должен удовлетворять условию выполнения указанного соотношения Δt и Т. При $I_д = 0$ ($\theta_д = 0$):

$$\theta = \theta_0 (1 - \Delta t/T). \quad (12.3)$$

Установившееся превышение температуры $\theta_д$ и постоянная времени Т являются тепловыми параметрами данной обмотки тягового электродвигателя или генератора. Их значения устанавливают при испытании электрических машин на стенде.

На рис. 12.3 приведена зависимость установившегося превышения температуры $\theta_д$ от тока $I_д$ лимитирующей по нагреванию компенсационной обмотки тягового электродвигателя ТЛ-2К электровоза ВЛ10. У этого электродвигателя, как и у некоторых других тяговых машин, постоянная времени Т не зависит от тока и равна 20 мин. На рис. 12.4 показаны тепловые характеристики электродвигателя AL4846eT электровоза ЧС2, на рис. 12.5 – обмотки якоря электродвигателя НБ418К локомотивов ВЛ80 всех индексов, на рис 12.6 – электродвигателя AL-4442nP электровозов $ЧС4^Т$ и ЧС4.

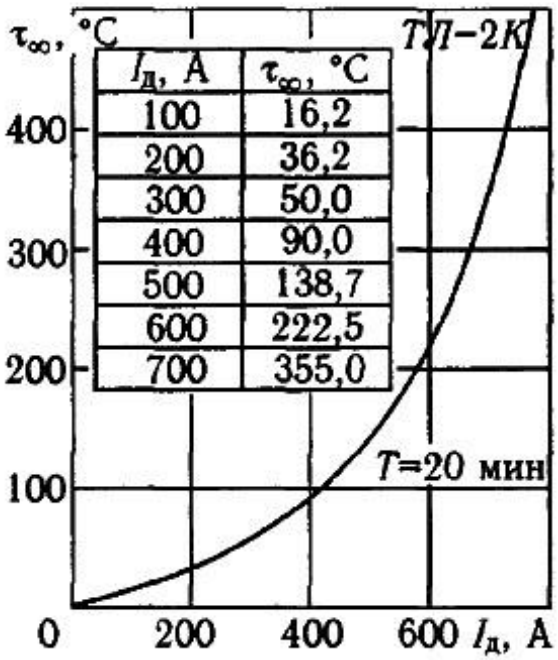


Рис. 12.3. Тепловые характеристики компенсационной обмотки тягового электродвигателя ТЛ-2К при Qв = 95 м³/мин

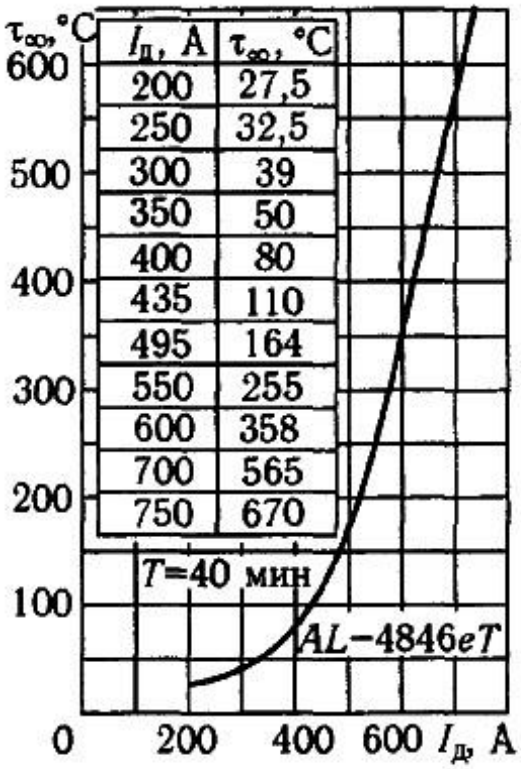


Рис. 12.4. Тепловые характеристики обмотки якоря тягового электродвигателя AL-4846eT при Qв = 120 м³/мин

Тепловые характеристики □□□Iд □ и T□Iд □ тяговых электродвигателей ЭД-118, ЭД-107А и ЭД-107 тепловозов 2ТЭ116, 2ТЭ1ОВ, 2ТЭ10Л, ТЭП10 приведены на рис. 12.7, тяговых электродвигателей ЭД-108 тепловозов ТЭП60 – на рис. 12.8. На тепловозах ТЭ3 и ТЭ7 ограничивающей является температура обмоток главного генератора. Их тепловые характеристики приведены на рисунке 12.9.

Если локомотив или электропоезд отправляется со станции после длительной стоянки (свыше 2 ч), начальное превышение температуры □₀ тяговых электродвигателей принимают равным 15°С. Для меньших стоянок его определяют расчетом на основании температуры в момент прибытия из предыдущего рейса и ее снижения за время стоянки по кривой охлаждения □(t). Значения Т на рис. 12.3 ... 12.8 приведены для принудительного охлаждения электродвигателей. В случае выключения мотор-вентилятора величину Т увеличивают в 3 раза (так как теплоотдача при этом будет значительно меньше).

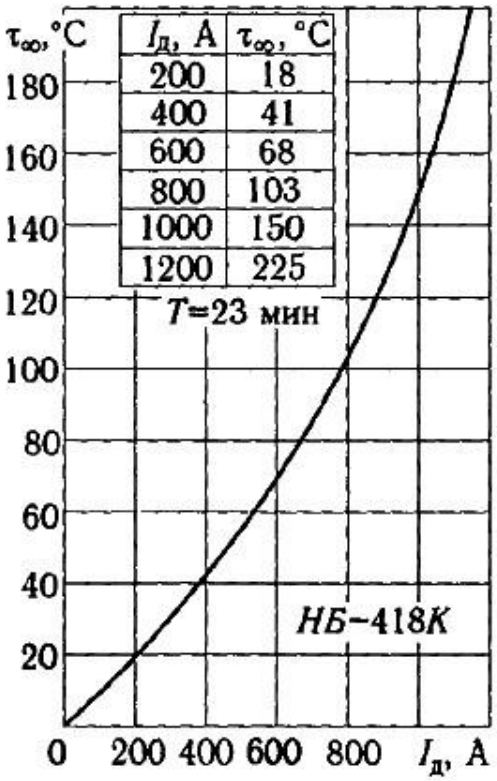


Рис. 12.5. Тепловые характеристики обмотки якоря тягового электродвигателя НБ-418К при Qв = 110 м³/мин

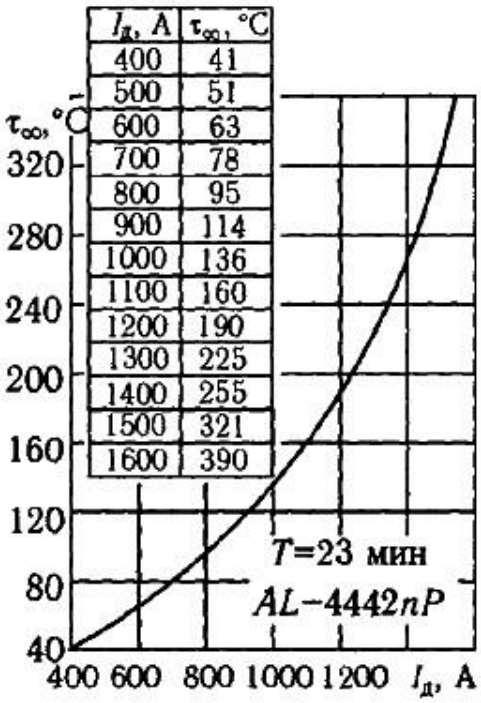


Рис. 12.6. Тепловые характеристики обмотки якоря тягового электродвигателя AL-4442nP при Qв = 96 м³/мин

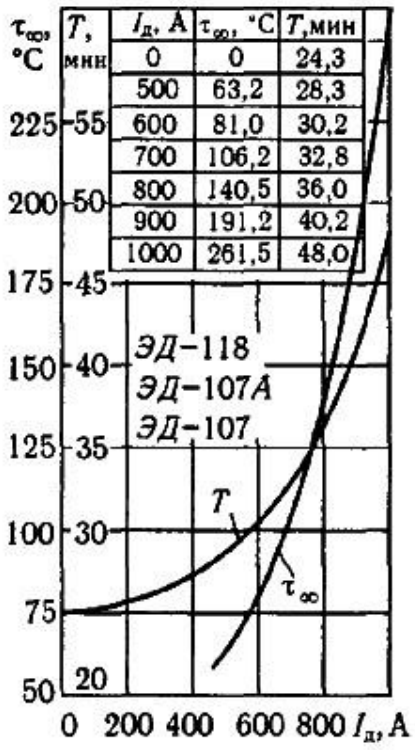


Рис. 12.7. Тепловые характеристики тяговых электродвигателей ЭД107, ЭД107А, ЭД118 тепловозов 2ТЭ116, 2ТЭ10В, 2ТЭ10Л, ТЭ10, 2М62

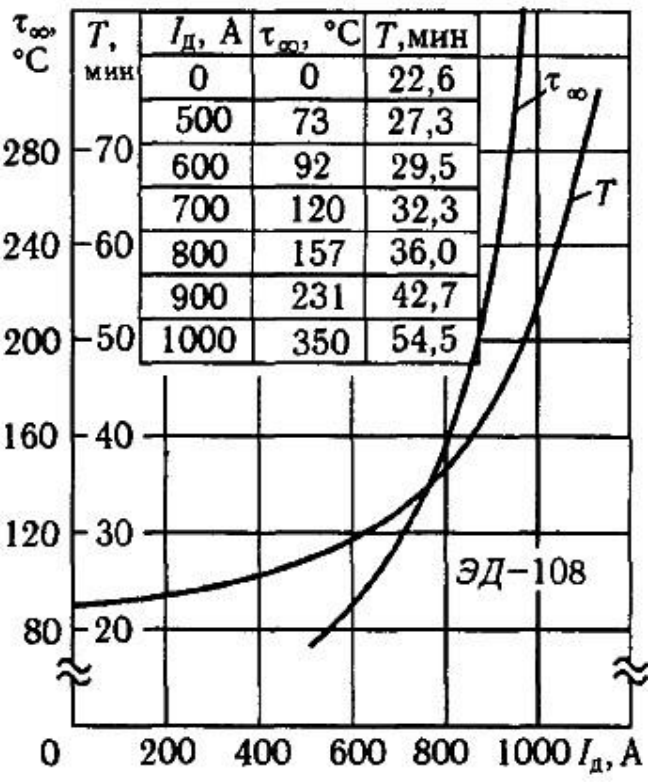
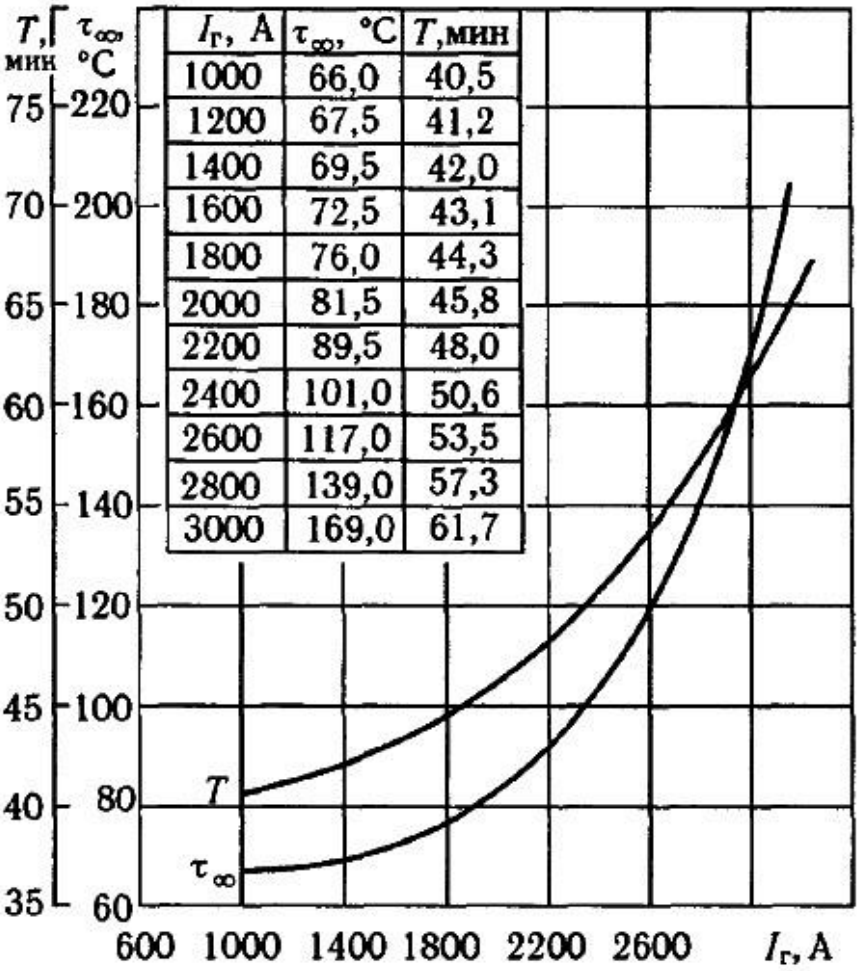


Рис. 12.8. Тепловые характеристики тягового электродвигателя тепловозов ТЭП60, 2ТЭП60



$I_г$, A	τ_∞, °C	T, мин
1000	66,0	40,5
1200	67,5	41,2
1400	69,5	42,0
1600	72,5	43,1
1800	76,0	44,3
2000	81,5	45,8
2200	89,5	48,0
2400	101,0	50,6
2600	117,0	53,5
2800	139,0	57,3
3000	169,0	61,7

Рис. 12.9. Тепловые характеристики тягового генератора тепловозов ТЭ3, ТЭ7

Превышение температуры тягового электродвигателя или генератора над температурой наружного воздуха при аналитическом методе рассчитывают по формуле (12.2) следующим образом. Необходимые токи $I_д$ или $I_г$ определяют при работе электроподвижного состава переменного тока и тепловозов из графика $I_д(s)$ или $I_г(s)$, а при работе электроподвижного состава постоянного тока пересчитывают из тока электровоза, который берут из графика $I_э(s)$. Для каждого расчета берут токи в двух соседних точках, между которыми на графике ток изменяется прямолинейно, начиная со станции отправления. Изменяющийся на этом отрезке ток заменяют неизменным средним током $I_{дср}$ или $I_{гср}$, которые определяют по формулам:

при электроподвижном составе переменного тока или тепловозах средний ток тягового электродвигателя — $I_{дср} = (I_{д1} + I_{д2})/2$;

или средний ток генератора — $I_{гср} = (I_{г1} + I_{г2})/2$;

при электроподвижном составе постоянного тока средний ток тягового

электродвигателя — $I_{дср} = (I_{д1} + I_{д2})/2a$; где а – число параллельных цепей тяговых электродвигателей.

Затем по тепловым характеристикам или кривым $\tau_д(I_д)$ (см. рис. 12.3…12.8) находят значения тепловых параметров $\tau_д$ и Т, а по кривым t(s) определяют время, в течение которого проходил ток $I_{дср}$ или $I_{гср}$. Подставляя указанные величины в формулу (12.2), рассчитывают превышение температуры тягового электродвигателя или генератора для первого отрезка пути.

На втором отрезке кривой тока превышения температуры электродвигателя рассчитывают аналогично, но за начальную температуру τ_o принимают превышение температуры τ, в конце первого отрезка. Расчет превышений температур тягового электродвигателя или генератора на последующих участках выполняют таким же порядком.

В том случае, когда применяют кратную тягу грузовыми электровозами второй и третий электровозы могут реализовать большую силу тяги по сцеплению, чем первый, поскольку колеса идут по очищенным первыми колесными парами рельсам. Поэтому на втором локомотиве можно применять более высокие позиции контроллера машиниста (более высокое напряжение на тяговых электродвигателях или более высокие ступени ослабления возбуждения). При одинаковых позициях контроллеров большие силы второго и третьего электровозов можно реализовать за счет избыточного проскальзывания движущих колес первого локомотива. Чтобы учесть более высокие нагрузки тяговых электродвигателей второго, третьего электровозов при проверке их на нагревание, токи $I_д$, взятые из кривых, умножают на коэффициент $к_{Iд}$, равный 1,06 при трех четырехосных секциях (12 осей), 1,04 – при двойной тяге и 1,02 – при тройной тяге.

При следовании локомотива без тока на выбеге или при использовании автоматических тормозов превышение температуры на данном участке определяют по формуле (12.3). В случае применения рекуперативного или реостатного торможения расчет выполняют обычным порядком, как и при следовании в тяговом режиме.

Из полученных превышений температур тягового электродвигателя или генератора выбирают, наибольшую и затем приводят ее к расчетной температуре наружного воздуха. Если на локомотиве есть устройства снегозащиты, то влияние снижения количества продуваемого воздуха оценивают соответствующим коэффициентом. Расчетное превышение температуры равно:

$$\Delta_р = \Delta к_{сз} к_{нв}, \quad (12.4)$$

где $к_{сз}$ – коэффициент сезона, принимаемый летом равным 1,0; а зимой – 1,1;

$к_{нв}$ – коэффициент наружного воздуха, принимаемый из таблицы 12.2.

Таблица 12.2

Обмотки тягового электродвигателя	Значение коэффициента наружного воздуха $к_{нв}$ при расчетной температуре наружного воздуха $t_{нв}$, °С.							
	0	5	10	15	20	25	30	35
полюсов	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	1,0	1,02	1,04
якоря	0,94	0,95	0,96	0,98	0,99	1,0	1,01	1,02

Расчетную температуру наружного воздуха $t_{нв}$ определяют по данным метеорологической станции как среднюю многолетнюю, (не менее пяти лет) по замерам в **7, 13** и **19** часов по местному времени:

$$t_{нв} = \frac{t_7 + 2t_{13} + t_{19}}{4}. \quad (12.5)$$

где t_7, t_{13} и t_{19} – средняя температура наружного воздуха в 7, 13 и 19 ч.

По этой формуле расчетную температуру определяют отдельно для летнего и зимнего периодов: в летний период – по измерениям в июне, июле и августе, если температура не меньше 15° С, а в зимний период – по измерениям в декабре, январе и феврале, если температура не ниже нуля. В том случае, когда температура оказывается летом менее 15° С, а зимой ниже нуля, за расчетную берут соответственно 15° С и ноль.

Если тепловоз работает на промежуточных (частичных) позициях контроллера, то превышение температуры, приведенной по формуле (12.4) к расчетной температуре наружного воздуха, умножают на коэффициент $к_{п}$, учитывающий уменьшение расхода охлаждающего воздуха. Коэффициент $к_{п}$ для позиций 14 и

15 равен 1,0; 12 и 13 – 1,05; 11 – 1,08; 10 – 1,15; 9 – 1,2.

Когда расчетное превышение температуры окажется выше допустимого, необходимо принять меры к снижению температуры. Такими мерами являются:

 переход на ЭПС с позиции ослабленного возбуждения на полное (нормальное) возбуждение или на позиции менее глубокого ослабления возбуждения; подталкивание поезда на лимитирующем перегоне или участке; обслуживание участка более мощным локомотивом.

Если позволяют условия перевозок грузов и пассажиров, температуру можно также понизить, введя вынужденную остановку поезда на промежуточной станции для охлаждения тяговых электродвигателей или уменьшив массу поезда.

После выбора мероприятий, направленных на снижение температуры нагрева, следует еще раз рассчитать нагревание тяговых электрических машин и убедиться, что их температура не превышает допустимые нормы.

Пример: Определить превышение температуры обмоток тяговых электродвигателей НБ-418К (ВЛ80Р) аналитическим методом при расчетной температуре окружающего воздуха в летний период $t_{нв}$ □ □10 °С. Начальное превышение температуры двигателей □$_0$ примем равным □15 °С. Токи $I_д$ и время □t приведены в таблице 12.3.

Таблица 12.3

Режим	$I_{дср}$	□t	□□	□t/T	□□ □t/T	□$_0$□1□ □tT□	□
	А	мин	°С	-	-	°С	°С
Тяговый	1075	0,5	165	0,022	3,59	14,67	18,3
	1025	0,4	152	0,017	2,64	17,94	20,6
	980	0,3	140	0,013	1,83	20,32	22,1
	960	0,6	137	0,026	3,57	21,57	25,1
	950	1,8	132	0,078	10,33	23,17	33,5
	940	0,8	130	0,035	4,52	32,34	36,9
	1090	1,6	169	0,070	11,76	34,30	46,1
	900	2,0	123	0,087	10,70	42,05	52,7
	830	1,4	108	0,061	6,57	49,53	56,1
Выбег	0	2,1	0	0,091	0	51,0	51,0
	0	2,3	0	0,100	0	45,9	4,9
Рекуперативное торможение	520	1,6	58	0,070	4,03	42,69	46,7
	800	2,2	103	0,096	9,85	42,25	52,1
	760	1,9	96	0,083	7,93	47,81	55,7

Решение: Вначале тяговые электродвигатели работают с током ($I_{дср}$ = 1075 А) в течение 0,5 мин. Чтобы рассчитать превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающего воздуха за это время, из рисунка 12.5 находим Т = 23 мин, при ($I_{дср}$ = 1075 А) и □□ □165 °С. Тогда:

□ □ □□□t/T □ □$_o$□1□ □t/T□□165□ ___0,5 □15□□ □1□ ___ 0,5□ □ □18,3 °С.

23 □ 23 □

Аналогично рассчитываем □ при последующем токе $I_{дср}$ = 1025 А. При этом

τ_0 будет равно 18,3 °С температуре τ, полученной при первом расчете. Так же рассчитываем τ при остальных токах, причем если электровоз следует без тока, температуру определяем по формуле (12.3). В связи тем, что Δt на выбеге равно 4,4 мин и $\frac{\Delta t}{T} = \frac{4,4}{23} = 0,1$, разбиваем Δt на 2 отрезка, например, 2,1 и 2,3 мин. В режиме рекуперативного торможения температуру рассчитываем так же, как и в режиме тяги. Все расчеты сводим в таблицу 12.3.

Наибольшее превышение температуры обмотки якоря тягового электродвигателя равно 56,1 °С (см. табл. 12.3). При расчетной температуре наружного воздуха $t_{нв} = 10$ °С из таблицы 12.2 находим для обмотки якоря $к_{нв} = 0,96$ (для летнего периода $к_{сз} = 1,0$) и по формуле (12.4) определяем расчетной превышение температуры обмотки якоря:

$$\tau_р = \tau к_{нв} к_{сз} = 56,1 \cdot 1,0 \cdot 0,96 = 53,9 \text{ °С}.$$

Эта температура ниже допустимой для изоляции класса В (120 °С).

12.3. Другие методы расчета нагревания электрических машин

Метод определения τ по сетке температурных кривых. Превышение температуры обмоток тяговых электрических машин над температурой наружного воздуха можно определить по графикам, показывающим зависимость τ от времени **t** при определенных значениях тока. Их строят по результатам испытаний электрических машин на стенде. При постоянной нагрузке измеряют температуры обмоток через определенные промежутки времени и наносят на график. Затем подобные графики строят при других токах.

На рис. 12.10 приведены кривые нагревания $\tau(t)$ соответственно при токах I_1, I_2 и I_3. В том случае, когда нагретая машина будет работать без тока (нагрузки), ее температура будет уменьшаться по линии (I = 0). Если же машина длительное время работала с большими перегрузками и нагрелась, то при токе I_1 ее температура будет уменьшаться по закону охлаждения (кривая, показывающая снижение τ при токе I_1).

Кривые нагревания и охлаждения при токе I_1 стремятся к установившемуся превышению температуры $\tau_{уст1}$. Аналогично кривые нагревания и охлаждения при токах I_2 и I_3 стремятся к установившимся температурам соответственно $\tau_{уст2}$ и $\tau_{уст3}$. Это объясняется тем, что при превышении температуры обмоток над температурой воздуха, равном $\tau_в$, все выделяемое в электрической машине тепло отдается в окружающую среду. При превышениях температур $\tau < \tau_в$ в окружающую среду отдается меньше тепла, и оставшаяся часть вызывает повышение температуры обмотки до $\tau_в$. При $\tau > \tau_в$в окружающую среду отдается больше тепла, чем выделяется в машине, поэтому машина охлаждается и ее температура понижается до $\tau_в$. С увеличением тока I температура $\tau_в$ также растет вследствие выделения большего количества тепла.

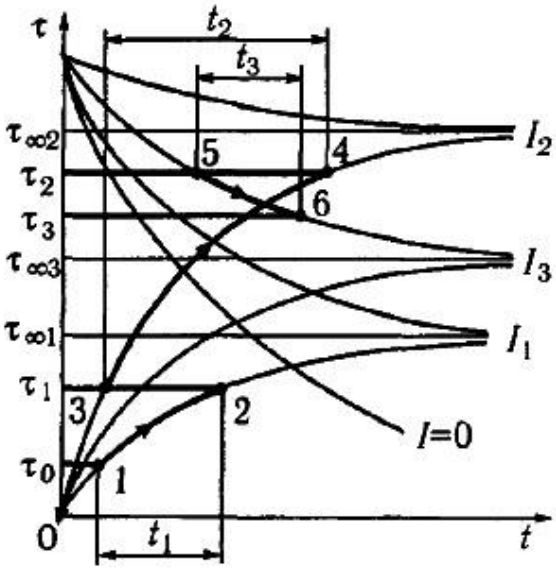


Рис. 12.10. Кривые нагревания и охлаждения тяговой электрической машины

Если, например, тяговый электродвигатель или генератор, имевший, начальное превышение температуры $\tau_о$, работал вначале со средним током I_1 в течение времени t_1, то процесс нагревания шел по отрезку **1 – 2** линии $\tau = f(t)$ при I_1. Точку **1** находят на кривой, соответствующей току I_1, при $\tau_о$. От нее вправо откладывают время t_1, проводят вертикаль до пересечения с кривой $\tau = f(t)$ в точке **2.** Следовательно, превышение температуры после этого режима работы будет равно τ_1.

В том случае, когда после работы с током I_1 электрическая машина будет работать с током I_2 в течение времени t_2, превышение температуры определяют следующим образом. Находят начальную точку **3** на кривой $\tau = f(t)$ при I_2 и превышении температуры τ_1. Процесс увеличения τ пойдет по отрезку линии **3 – 4** при I_2, и в течение времени $\mathbf{t_2}$ превышение температуры возрастет до значения, определяемого точкой **4,** и достигнет τ_2. При последующей работе электрической машины с током I_3 в течение времени начальную точку находим на кривых при токе I_3 и превышении температуры τ_2 (точка **5**). Она окажется на кривой охлаждения, следовательно τ будет снижаться. Отложив от точки **5** вправо время t_3, проведя вертикаль, находят точку **6,** а следовательно, и $\tau < \tau_3$.

На рис. 12.10 используемые части кривых □□t□ и полученные значения □ выделены жирными линиями. Аналогично можно определять превышения температур и далее. Если для данного среднего тока нет кривой □□t□, то положение точек определяют интерполяцией.

Полученное наибольшее превышение температуры (в нашем случае τ_2) приводят к расчетному превышению температуры, как указано в разделе 12.2, и сравнивают с допустимым превышением температуры.

На рис. 12.11 для примера приведены кривые нагревая и охлаждения тяговых электродвигателей НБ-406 электровозов ВЛ8 и ВЛ23, на рис 12.12 – главного генератора тепловоза ТЭ3 и ТЭ7.

Метод среднего квадратичного тока используют для приближенных расчетов. Он основан на предположении, что обмотки тяговых электрических машин нагреваются только за счет электрических потерь, которые зависят от квадрата тока. Средний квадратичный ток тяговой машины за рейс или эффективный ток:

$$I_{эф} = \sqrt{\int I_{ср2}\,dt,\ \int dt}$$

где $I_{ср}$ □средний ток электрической тяговой машины за время □t, который можно взять из графика $I_Д(s)$ или $I_г(s)$;

□□t □ время работы локомотива за рейс, включая время следования в режимах тяги, выбега, торможения и время остановок и стоянок.

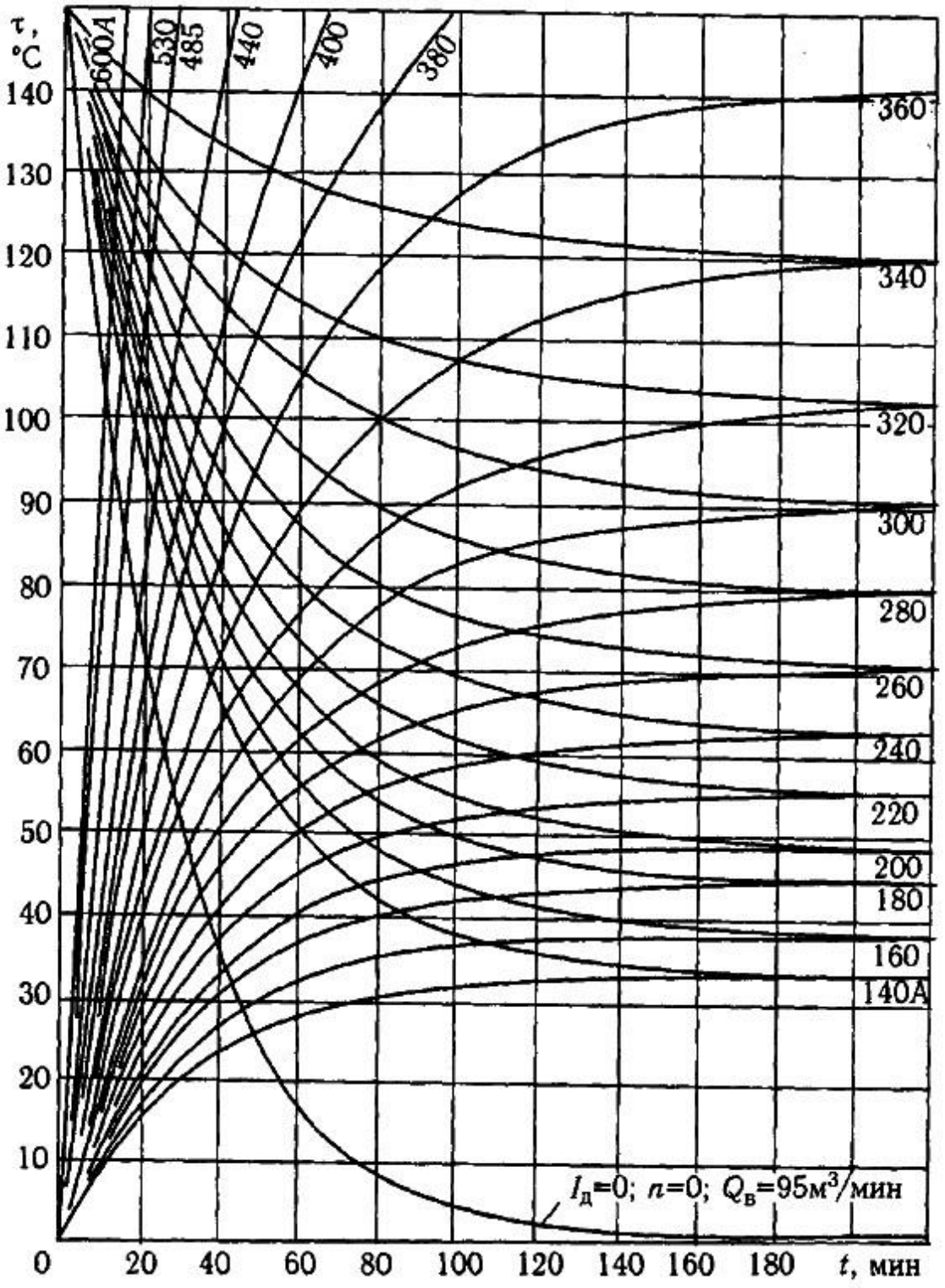


Рис. 12.11. Кривые нагревания и охлаждения обмотки якоря тягового электродвигателя НБ-406

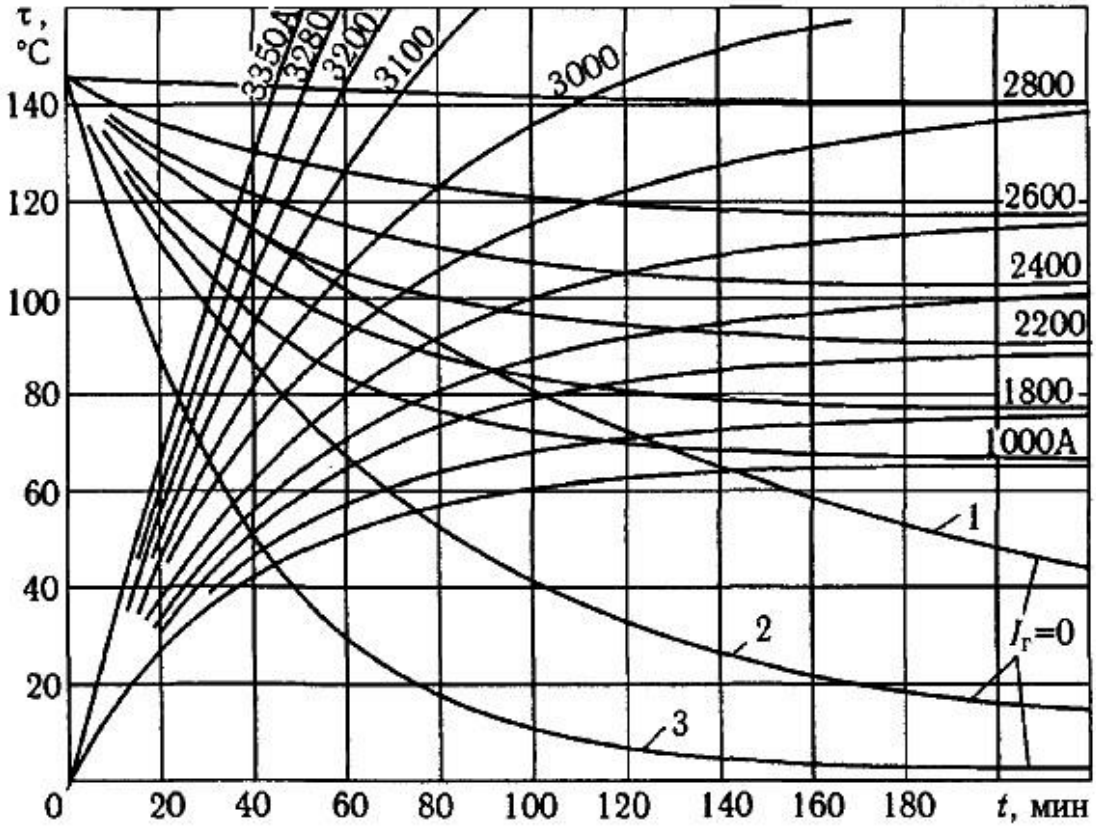


Рис. 12.12. Кривые нагревания и охлаждения обмотки якоря тягового генератора тепловозов ТЭ3 и ТЭ7:
1 — при остановленном дизеле ($n_д$ = 0);
2 — при частоте вращения $n_д$ = 610 об/мин.;
3 — при $n_д$ = 850 об/мин

Если расчетный ток $I_{эф}$ окажется меньше тока продолжительного режима I_{∞}, то машина не может нагреться выше допустимых температур. Однако в этом методе не учитываются изменения токов тяговых электродвигателей или генераторов при движении по различным элементам профиля пути, особенно по крутым подъемам, где токи значительно превышают средние квадратичные значения, неодинаковые условия теплоотдачи электрических машин и неодинаковые температуры окружающего воздуха. Чтобы учесть эту разницу в режимах, вводят поправочный коэффициент $к_{зап}$, равный в среднем 1,15... 1,25, следовательно: $I_{эф}$ □ I□ /$к_{зап}$.

При соблюдении этого неравенства недопустимого превышения температуры обмоток не будет. В случае невыполнения условия, возможно, превышение температуры обмоток окажется выше допустимых значений, указанных в табл. 12.1.

Тема 13

РАСХОД ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ТОПЛИВА

13.1. Факторы, влияющие на расход электрической энергии и топлива

Как известно, локомотивы совершают механическую работу при передвижении поезда. ЭПС для этого использует электрическую энергию, получаемую от систем электроснабжения электрифицированной дороги, а тепловозы и дизельпоезда – химическую энергию, заключенную в топливе. Механическая работа локомотива сопровождается неизбежными потерями энергии в тяговых электродвигателях, тяговых передачах, преобразовательных установках и пускорегулирующих устройствах, а на тепловозах – также в дизеле и тяговом генераторе.

Механическая работа локомотива $A_м$ затрачивается на преодоление сил основного сопротивления движению, сил сопротивления движению в кривых участках пути, а также на повышение кинетической и потенциальной энергии поезда. Сила основного сопротивления движению W_o возрастает с увеличением скорости. Поэтому при следовании поезда с повышенными скоростями локомотив должен совершать большую механическую работу. Сопротивление движению от кривых W_r мало изменяется в зависимости от скорости. Поэтому в расчетах его принимают зависящим только от радиуса кривой.

Кинетическая энергия $A_к$ равна произведению массы поезда на половину квадрата скорости. Следовательно, перед отправлением поезда и после остановки на станции прибытия (при v = 0) она равна нулю, и при энергетических расчетах по участку ее можно не учитывать. При ускоренном движении локомотив должен совершать большую работу, чем при движении с равномерной скоростью. В случае снижения скорости запас кинетической энергии можно использовать для движения поезда без затраты энергии.

Потенциальная энергия поезда $A_п$ определяется его весом и высотой расположения **H.** При движении поезда по подъему его потенциальная энергия возрастает, поэтому локомотив должен совершать большую механическую работу, выражаемую дополнительной силой сопротивления движению от подъема. Запасенная в поезде потенциальная энергия может быть использована для совершения механической работы при движении по спуску без затрат энергии, а при ускоренном движении она, кроме того, частично переходит в кинетическую энергию.

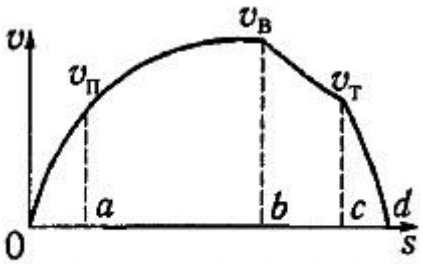


Рис. 13.1. Кривая движения поезда v(s)

Если для поддержания постоянной скорости движения на спуске или для замедления движения поезда применяется механический или реостатный тормоз, то часть запасенной потенциальной или кинетической энергии теряется в тормозах, несмотря

на то, что в этот момент локомотив не потребляет энергию. Это объясняется тем, что для создания запаса и потенциальной, и кинетической энергии ранее была выполнена дополнительная механическая работа локомотива, которая вызвала более высокий расход электрической энергии или топлива.

Расход энергии на совершение механической работы при движении поезда по участку определяют как отношение механической работы к среднему КПД локомотива (так называемому эксплуатационному КПД).

На рис. 13.1 показана простейшая кривая v(s) при следовании поезда по прямолинейному горизонтальному пути перегона **Od.** Часть пути **Ob** поезд проходит в режиме тяги с потреблением электрической энергии или топлива, остальной путь – в режиме выбега и торможения. На отрезке **Oa** идет пуск и разгон поезда. На отрезке **ab** локомотив работает на ходовых характеристиках, на отрезке **bc** – на выбеге и на отрезке **cd** – при торможении механическими тормозами.

В период пуска энергия, потребляемая локомотивом, затрачивается на преодоление сил сопротивления движению и создание запаса кинетической энергии.

Часть потребляемой электроэнергии при пуске электроподвижного состава постоянного тока теряется в пусковом реостате, а также в тяговых электродвигателях и передаче, а на участках переменного тока – в тяговых электродвигателях, передаче и преобразовательной установке. Часть энергии, заключенной в топливе тепловоза или дизель-поезда, теряется в дизеле и тяговой передаче.

На отрезке **ab** механическая работа идет на преодоление сил сопротивления движению и на дальнейшее увеличение кинетической энергии, так как скорость в точке **b** выше, чем в точке **a.** В точке **b** начинается режим выбега, и поезд движется за счет запаса кинетической энергии, который постепенно снижается. Если бы в точке (**c**) не были включены тормоза, то движение на выбеге продолжалось бы без затрат энергии и топлива за пределами отрезка **cd.** После включения механических тормозов в точке (**c**) большая часть кинетической энергии поезда теряется в тормозах, превращаясь в тепловую энергию, нагревающую тормозные колодки, колеса и окружающий воздух и только небольшая ее часть используется для преодоления сил сопротивления движению на отрезке **cd.**

13.2. Определение расхода электрической энергии на движение поезда графоаналитическим методом

При расчете полного расхода электрической энергии, потребляемой электроподвижным составом, ее подразделяют на отдельные составляющие: энергию, расходуемую на движение поезда, собственные нужды, отопление

пассажирских и почтово-багажных вагонов, а также на маневровые передвижения по деповским и станционным путям.

Расход электроэнергии на тягу поезда можно установить несколькими способами. Наиболее точно его определяют по кривым тока и времени в функции пути графоаналитическим методом.

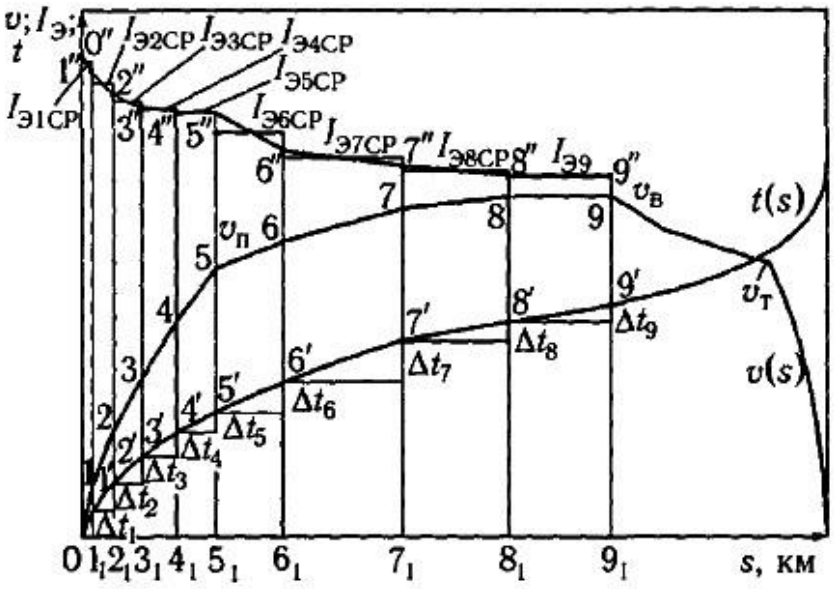


Рис. 13.2. Определение средних токов и времени для расчета расхода электроэнергии

При системе постоянного тока расход электрической энергии на тягу зависит от напряжения на токоприемнике U_c, тока $I_э$ и времени движения с этим током t. На рис. 13.2 показаны кривые изменения скорости движения, тока и времени в зависимости от пути s. При постоянном значении тока $I_э$ в течение времени t расход электроэнергии на тягу поезда:

$A_т = U_c I_э t$. Однако ток изменяется по линии **0"1"2" ... 9".** Этот изменяющийся ток на каждом отрезке пути заменяют средним по значению током.

Например: при изменении тока от точки **0** до **1** средний ток:

$$I_{э1ср} = (I_0 + I_1)/2.$$

Аналогично находят токи $I_{э2ср}$, $I_{э3ср}$ и т. д. Тогда:

$$A_{т1} = U_{c1} I_{э1ср} t_1;$$

$$A_{т2} = U_{c2} I_{э2ср} t_2 \text{ и т.д.}$$

Проведя аналогичные расчеты и просуммировав результаты, подсчитывают расход электроэнергии на перегоне **ОА** (Вт-мин) с учетом отклонений напряжения на токоприемнике от номинального:

$$A_г = A_{г1} + A_{г2} + \ldots + U_{c1} I_{э1ср} t_1 + U_{c2} I_{э2ср} t_2 + \ldots \ .$$

В расчетах без учета колебаний напряжения U_c расход энергии определяют по формуле:

$$A_г = U_c I_{эср} t.$$

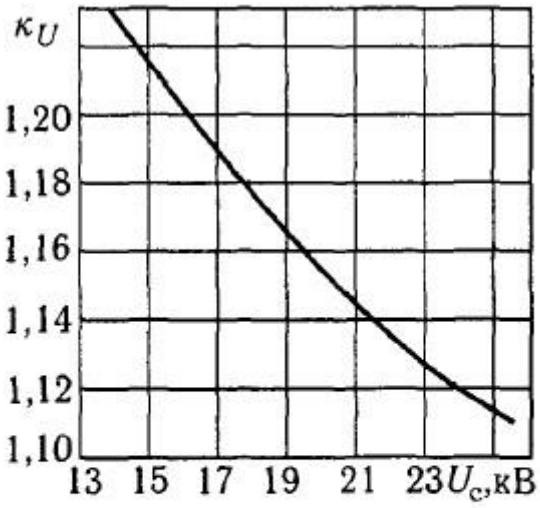


Рис. 13.3. Зависимость коэффициента формы кривой напряжения от напряжения на токоприемнике

В связи с тем, что расход электроэнергии на практике измеряют в киловаттчасах, ток в тяговых расчетах приводят в амперах, напряжение — в вольтах и время в минутах, полученный расход электроэнергии необходимо разделить на 60 (перевод минут в часы) и на 1000 (перевод ватт-часов в киловатт-часы). Тогда расход электроэнергии, квт·ч, без учета колебания напряжения:

$$A_г = U_c I_{эср} t / 60 \cdot 1000.$$

Для электроподвижного состава переменного тока расход электрической энергии на тягу поезда определяют по активной составляющей полного тока I_{da}, которую берут из кривых $I_{da}(s)$. С учетом фактического напряжения на токоприемнике U_c расход энергии $\mathbf{A_т}$, кВт-ч:

$$A_т = \frac{\sum U_c \kappa_U I_{dacp} t}{60 \cdot 1000}, \qquad (13.1)$$

где I_{dacp} – активная составляющая тока, средняя за время t; U_c – среднее напряжение на токоприемнике за время t; κ_U – коэффициент формы кривой напряжения при данном U_c, который определяют из графика рис. 13.3.

Если колебания напряжения невелики, их в расчетах не учитывают и в соответствии с ПТР произведение U_c κ_U берут равным 25000 В. При использования рекуперативного торможения возвращенная электроэнергия вычитается из полученного расхода электроэнергии. Напряжение на токоприемнике в расчетах при рекуперации на постоянном токе принимают 3300 В, на переменном – 25000 В.

13.3. Графический метод определения расхода электроэнергии

Графический метод позволяет определить расход электроэнергии без построения кривой тока в зависимости от пути, использовав только кривую скорости v(s) и токовую характеристику $I_э(v)$ или $I_{da}(v)$. На рис. 13.4 в правой части приведена кривая v(s), а в левой – кривая $I_э(v)$. Ток $I_э$ отложен в масштабе l

(мм/А), скорость – в масштабе $m = \frac{\text{мм}}{\text{км/ч}}$.

Расход электроэнергии на элементе s, по которому поезд движется со средней скоростью $v_{ср}$, можно вычислить по формуле (13.1) или (13.2), используя кривую движения v(s) и токовую характеристику $I_э(v)$. Если отложить полученную энергию $A_т$ в масштабе p, мм/(Вт-ч), расход электроэнергии в пределах этого элемента будет изменяться по прямой линии **ab.**

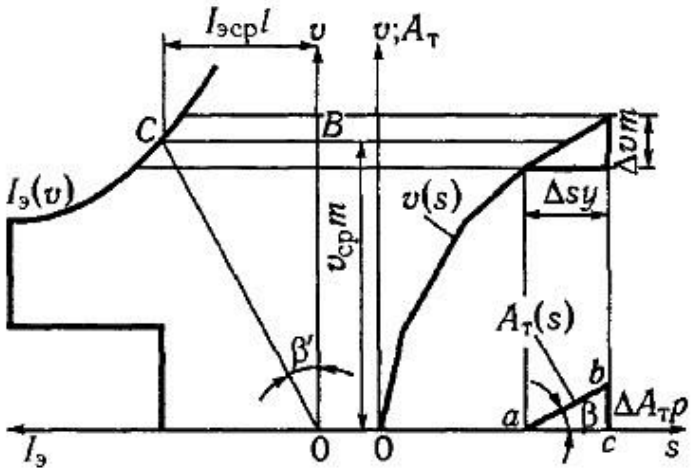


Рис. 13.4. Графический метод построения кривой расхода электроэнергии

Необходимо выяснить, при каких условиях можно было бы построить линию **ab** геометрически, не рассчитывая $A_т$. При средней скорости $v_{ср}$ электроподвижной состав потребляет ток $I_{э\,ср}$ (точка **C**). Если эту точку соединить с началом координат, то из полученного прямоугольного треугольника **OCB** можно определить tg ':

$$\operatorname{tg}\beta' = \frac{CB}{OB} = \frac{I_{эср}l}{v_{ср}m}.$$

Умножив числитель и знаменатель на U_c и t, получают:

$$\frac{I_{эср}U_c\Delta tl}{v_{ср}U_c\Delta tm} \quad \frac{\Delta A_т l}{v_{ср}mU_c\Delta t} \cdot \operatorname{tg}\alpha\alpha$$

Искомая линия **ab** будет направлена перпендикулярно линии **OC** при равенстве углов и . Из треугольника **abc** следует:

$$\operatorname{tg}\alpha\alpha = \frac{bc}{ac} = \frac{\Delta A_т p}{\Delta s y},$$

где **y –** масштаб пути, мм/км.

Но $\Delta s = v_{ср}\Delta t$, тогда

$$\operatorname{tg}\alpha\alpha = \frac{bc}{ac} = \frac{\Delta A_т p}{\Delta t y}.$$

Приравняв tg и tg, получим:

$$\frac{\Delta A_т p}{v_{ср}mU_c\Delta t} = \frac{\Delta A_т l}{y mU_c}, \text{ или } p = l \cdot \frac{v_{ср}\Delta t}{y}. \qquad (13.3)$$

где p, y, l и m – выбранные масштабы построения, а напряжение сети U_c принимаем постоянным.

Для графического построения линии **ab** как перпендикуляра к линии **OC** нужно выдержать масштабы из равенства (13.3) и строить кривую расхода электроэнергии, пользуясь угольником и линейкой. Поскольку масштабы y и m берут из построений кривых движения, можно выбирать масштабы l или p. Если токовая характеристика $I_э(v)$ уже построена в масштабе l, то масштаб p, мм/(Вт-ч), определяют из уравнения:

$$p \square \frac{yl}{mU_c}. \qquad (13.4)$$

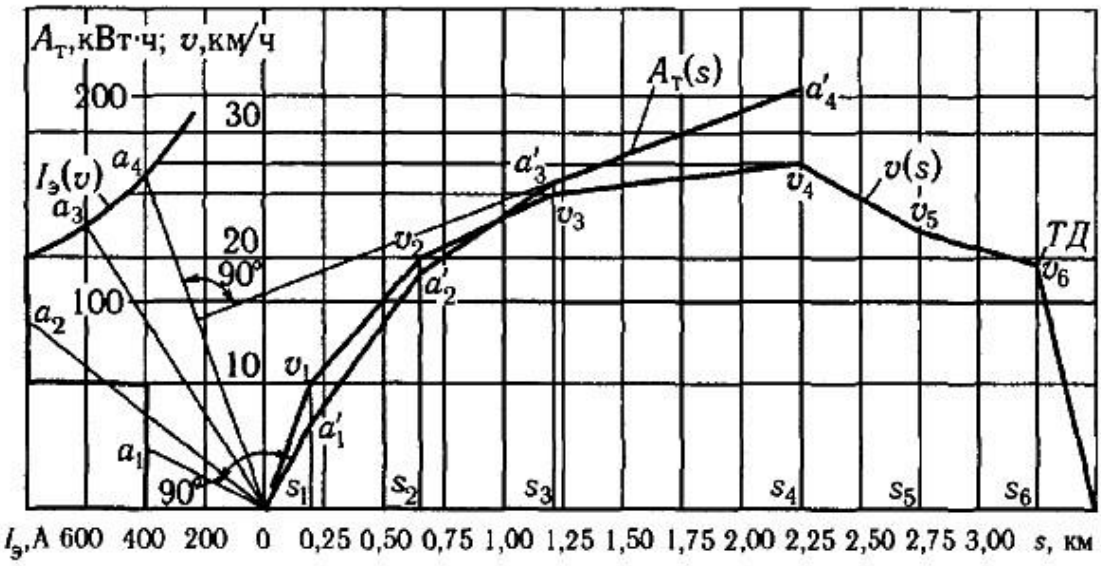


Рис. 13.5. Построение кривой $A_m(s)$ по кривой скорости и токовой характеристике

Построение линии $A_т(s)$ по кривым $v(s)$ и $I_э(v)$ при движении четырехосного электровоза с поездом показано на рис. 13.5 (интервалы □v для укрупнения построения завышены). Здесь: y = 20 мм/км, m □ 1 ____ мм , l □ 0,025мм/А, U_c = 3000 км/ч В. Тогда из равенства (13.4) получим масштаб:

20□0,025 мм . p □ ___/___ □
0,000165
1□3000 Вт□ч

Линию $A_т(s)$ строят следующим образом. В интервале скоростей от 0 до v □ 10 км/ч средняя скорость $v_{ср}$ = 5 км/ч и средний ток $I_{эср}$ = 400 А (точка a_1). К точкам 0 и a_1 прикладывают линейку, а к ней — угольник одной стороной прямого угла. Вторая сторона покажет направление искомого луча из точки 0 в пределах первого отрезка пути $0s_1$ (отрезок $0a_1'$). Ордината точки a_1' соответствует расходу электроэнергии на отрезке $0s_1$ равном 40кВт-ч. Затем находим точку a_2, соответствующую средней скорости $v_{ср}$=15 км/ч и $I_{эср}$ □ 800 А, и проводим линию (a_1□a□$_2$), перпендикулярную к **$0a_2$** и т.д. Ордината общего расхода электроэнергии a□$_4$ составила 206 кВт-ч.

Расход электроэнергии при движении под нагрузкой все время возрастает. При движении без тока линия $A_т(s)$ должна быть горизонтальной. В случае

применения рекуперации токовые характеристики следует наносить правее оси v в системе координат $I_э$ и v. Тогда перпендикуляр к линии, соединяющей точку **0** с точкой на кривой тока рекуперации, будет направлен вниз под углом, что соответствует уменьшению расхода электроэнергии на тягу.

13.4. Аналитический метод определения расхода электрической энергии

Определение расхода электрической энергии рассмотренными способами требует больших затрат времени на построение кривых скорости, времени и тока (или расхода электроэнергии). Для ориентировочных расчетов используют аналитический способ, основанный на определении составляющих расхода электроэнергии, без построения указанных кривых.

Электрическая энергия, затрачиваемая на движение поезда, расходуется на преодоление сил основного и дополнительного сопротивлений движению. Часть ее теряется в тормозах, тяговых электродвигателях, передаче, преобразователях, в пусковом реостате электроподвижного состава постоянного тока. Расчет каждой из этих составляющих аналитическим методом выполняют следующим образом.

Энергия, расходуемая на преодоление сил сопротивления движению *(A_w)*, равна работе, вычисленной как произведение силы на путь. Силы основного и дополнительного сопротивлений движению поезда на каждом элементе профиля пути равны $mg(w_0 + i)$. Работа в джоулях на перегоне или участке равна сумме работ, совершаемых на каждом элементе:

$$A_w \square 1000^{mg} \square \square w_0 \square i_i \square s_i, \qquad (13.5)$$

где i_i □ приведенный уклон каждого элемента профиля пути; s_i □ длина каждого элемента; 1000 – переводной коэффициент километров в метры.

С изменением скорости, силы основного сопротивления движению изменяются в сравнительно небольших пределах. Для ориентировочных расчетов их можно взять при средней скорости движения (для грузовых поездов — около 50...60 км/ч). Элементы профиля пути (подъемы и спуски) можно заменить одним эквивалентным уклоном, при движении по которому будет затрачено столько же энергии, сколько и по действительному профилю. Эквивалентный уклон –

$$i_э \square 1000 \frac{\square H_к \square H_н}{\square \square \square \square i_{вр} \square w_{оср} \square s_{вр} \square \square \square w_{кр} s_{кр}} \square, \qquad (13.6)$$

где ($H_к$ $H_н$)разница высот конечного и начального пунктов над уровнем моря; $i_{вр}$ вредные спуски, на которых i > $w_{ох\ шах}$ при наибольшей допустимой скорости движения. При движении по такому спуску на выбеге скорость возрастает и приходится включать тормоза; $s_{вр}$– длина вредного спуска; $w_{кр}$– удельное дополнительное сопротивление движений от кривой; $s_{кр}$ длина кривой; s – длина участка.

При переходе к $i_э$ уравнение (13.5) примет вид:

$$A_w \ 1000mg w_{оср} i_э s. \qquad (13.7)$$

Потери энергии в тормозах. Основная часть кинетической энергии, запасенной в поезде перед торможением 1000m1 $v^2_т$ /2, теряется в тормозах, а часть используется для совершения работы по преодолению сил сопротивления движению в пределах тормозного пути.

Следовательно, потери энергий в тормозах, при каждом торможении до остановки:

$$A_т \ \frac{1000m1}{2 3,6} v_{2т} \ mg w_{от} i_т s_т, \qquad (13.8)$$

где m1 приведенная масса поезда; $v_т$ скорость начала торможения; 1/3,6 – переводной коэффициент в м/с; $w_{от}$ – удельное основное сопротивление движению при торможении; $s_т$ – тормозной путь.

Если принять движение поезда при торможении равнозамедленным с замедлением $a_т$, то проходимый путь равен:

$$s_т \ \frac{v^2_{2т}}{2a_т \ 2 . 3,6}$$

Тогда потери энергии в тормозах при одной остановке поезда равны:

$$A_т \ 2\frac{mv^2_{2т}}{3,6^2 \ 2 \ 1000} 1 g w_{от} i_т /a_т . \qquad (13.9)$$

Энергия, затраченная на преодоление сил сопротивления движению, в сумме с потерями энергии в тормозах равна механической работе тяговых электродвигателей.

$$A_м \square A_w \square \square A_т. \qquad (13.10)$$

Потерн энергии в тяговых электродвигателях и преобразователях. Механическая работа, совершенная тяговыми электродвигателями, равна $A_м$. Из сети при этом потребляется энергия, равная $A_м / \square_{ср}$, где $\square_{ср} \square$ средний КПД электроподвижного состава с учетом потерь в тяговом электродвигателе, передаче и преобразовательной установке (его принимают на 1…1,5 % ниже максимального значения).

Потери энергии в тяговых электродвигателях, передаче и преобразователях равны:

$$\square A_э \square A_м / \square_{ср} \square A_м. \qquad (3.11)$$

Потери энергии при пуске. Потери мощности в пусковом реостате равны произведению электромагнитной мощности тяговых электродвигателей и коэффициента пусковых потерь $к_п$ (см. раздел 3.7). Если пренебречь механическими и магнитными потерями в тяговых электродвигателях и передаче, то электромагнитная мощность будет равна механической мощности, развиваемой на ободах колесных пар. В период пуска энергия $A_п$ расходуется на преодоление сил сопротивления движению на участке пуска $s_п$ и на накопление запаса кинетической энергии. Потери энергии при пуске:

$$\square A_п \square \square \overline{\square 10002m \square 3 \square 1,6} \square_2 \square \square v_{п2} \square mg \square w_{оп}$$

$$\square i_п \square s_п \square \square \square к_п.$$

$\square$

Если принять движение равноускоренным с ускорением $\mathbf{a_п}$, получаем: $s_п$

$$\square v_п^2 / \square 2a_п \square 3,6^2 \square.$$

С учетом этого потери энергии, при каждом пуске равны:

$$\square A_п \square {}^{mv}2 \square 3^{п2}, {}^{к}6^{п}{}_2 \square \overline{1000} \square 1 \square \square \square \square g \square w_{оп} \square i_п \square / a_п \square. \qquad (13.12)$$

Электрическую энергию в ватт-часах, которую нужно затратить на движение поезда, определяют как сумму составляющих [формулы (13.7), (13.9), (13.11) и (13.12)]. Полученные значения в джоулях можно перевести в ватт-часы, умножив число джоулей на переводной коэффициент $1/3600 \square 2,78 \square 10^{\square 4}$

□1 Дж □ 2,78□10^{-4} Вт□ч □ 2,78□10^{-7} квт□ч□. Рассмотренным методом вычисляют ориентировочный расход электроэнергии, например при намечаемой электрификации участка. При этом задаются средними ускорениями при разгоне и замедлениями при торможении, средними значениями сил сопротивления движению, средними скоростями начала торможения и конца пуска, средними КПД ЭПС при заданном эквивалентном уклоне без построения кривых движения. Вследствие этого затраты времени на расчет значительно снижаются по сравнению с другими методами.

13.5. Полный и удельный расход электрической энергии

Чтобы установить полный расход электроэнергии, к расходу энергии на движение поезда прибавляют расход энергии на собственные нужды, отопление пассажирских вагонов, движение по деповским путям и маневровые работы. Расходы электроэнергии на собственные нужды $A_{сн}$ складываются из энергии, необходимой для работы вспомогательных машин, питания цепей управления, освещения и отопления ЭПС. Его определяют по средней потребляемой мощности или току и полному времени работы этого оборудования. Средний расход электроэнергии одним электровозом на вспомогательные машины в течение 1 минуты и потребляемые ими токи приведены в ПТР. Для некоторых серий электровозов эти данные приведены в таблице 13.1.

Таблица 13.1

Серия электровоза	Потребляемая вспомогательными машинами энергия за 1 мин, кВт-ч/мин	Ток, потребляемый вспомогательными машинами, А
ВЛ10, ВЛ10^{У}, ВЛ11	2,08	42
ВЛ82, ВЛ82^{М}	4,17	12
ВЛ80^{С}, ВЛ80^{Т}	5,5	16
ВЛ80^{Р}	5,83	18
ВЛ80^{К}	4,83	14
ВЛ60^{К}, ВЛ60^{ПК}	3,33	10
ЧС2^{Т} (ЧС2)	1,33 (1,17)	27 (23)
ЧС4^{Т} (ЧС4)	2,33 (2,0)	7 (6)

В отопительный сезон, кроме того, необходимо учитывать дополнительный расход электроэнергии на отопление, исходя из полного времени работы электровоза и мощности 4...8 кВт на электровоз. Расход электрической энергии на отопление пассажирских и почтово-багажных вагонов в 1 мин и потребляемые токи приведены в табл. 13.2 (в числителе указан ток при $U_с$ = 3000 В, в знаменателе — при $U_с$ = 25 кВ).

Расход электроэнергии на вспомогательные машины, освещение, а в отопительный сезон – и на отопление электропоездов принимают, исходя из полного времени их работы при средней потребляемой мощности. В таблице 13.2 приведены значения расхода энергии и токов, потребляемых вспомогательными машинами и идущих на освещение и отопление некоторых серий электропоездов.

Таблица 13.2

Серия электропоезда или тип вагона	Вспомогательные машины		Освещение		Отопление	
	Расход энергии в 1 мин, кВт·ч/мин	Ток, А	Расход энергии в 1 мин, кВт·ч/мин	Ток, А	Расход энергии в 1 мин, кВт·ч/мин	Ток, А
Электропоезда ЭР2, ЭР1 (10 вагонов)	0,58	12	0,3	6	2,92	58
Электропоезда ЭР22В, ЭР22 (8 вагонов)	1,25	25	0,37	9	3,2	64
Электропоезда ЭР9 всех индексов (10 вагонов)	1,08	3	0,3	1	2,92	7
Пассажирский вагон	—	—	—	—	0,8	16/2
Почтово-багажный вагон	—	—	—	—	0,4	8/1

При предварительных расчетах можно принять расход электроэнергии на собственные нужды в размере 3 % расхода электроэнергии на движение поезда для электровозов и электропоездов переменного тока и 2 % – для электровозов и электропоездов постоянного тока.

Расход электроэнергии на движение электроподвижного состава по деповским путям и при маневровой работе $А_{мн}$ определяют по опытным данным. Если они отсутствуют, а также в случае проектирования новых линий или ориентировочных расчетов для действующих линий расход энергии рекомендуется определять на основании следующих данных:

а) при движении по деповским путям – по числу выдаваемых на линию в сутки электровозов или электропоездов, принимая расход энергии на каждый электровоз:

ВЛ10, ВЛ10^{У}, ЧС2^{Т}, ЧС2 – 20...30 кВт-ч;

ВЛ11, ЧС4^{Т}, ЧС4, ВЛ60^{К}, ВЛ60^{ПК} – 30...45 кВт-ч;

ВЛ80^{С}, ВЛ80^{т}, ВЛ80^{К}, ВЛ80^{Р}, ВЛ82^{М} – 45...60 кВтч; и на каждый электропоезд: ЭР2, ЭР2Р, ЭР2Т, ЭД2^{Т}, ЭД4^{М}, ЭД9^{Т,М}, ЭР9М — 30...50 кВт-ч;

б) при маневровой работе в депо, исходя из ежесуточного расхода, принимая расход энергии на каждый инвентарный электровоз:

ВЛ10, ВЛ10^{у}, ВЛ11, ЧС2^{Т}, ЧС2, ЧС4^{Т}, ЧС4 – 5…10 кВт-ч;

ВЛ80^{с}, ВЛ80^{т}, ВЛ80^{к}, ВЛ80^{р}, ВЛ60^{к},ВЛ60^{пк} – 15...30 кВт-ч;

и на каждый электропоезд:

ЭР2, ЭР2Р, ЭР2Т, ЭД2^{Т}, ЭД4^{М}, ЭД9^{Т,М}, ЭР9М – 15...30 кВт-ч;

в) при маневровой работе с вагонами на станции, исходя из времени маневров, принимая среднюю развиваемую мощность электровоза постоянного тока 100 кВт, переменного тока – 200 кВт.

В этих данных учтены расход электроэнергии на передвижение и собственные нужды электровоза. Расход энергии на деповских путях и при маневровой работе считают не зависящим от уровня напряжения.

Полный расход электроэнергии, потребляемой электровозами и электропоездами при движении с поездами:

$$A = A_т + A_{сн}, \quad (13.13)$$

и с учетом расхода на маневровую работу:

$$A = A_т + A_{сн} + A_{мн}.$$

Полный расход электроэнергии, отнесенный к шинам переменного трехфазного тока (т.е. на первичной стороне тяговой подстанции):

$$A_{тп} = A/(\eta_{кс}\eta_{тп}), \quad (13.14)$$

где $\eta_{кс}$ – КПД контактной сети, принимаемый равным 0,9...0,92 при системе постоянного и 0,93...0,95 переменного тока; $\eta_{тп}$ – КПД тяговой подстанции, принимаемый равным 0,92...0,94 при системе постоянного и 0,96...0,97 – переменного тока.

Удельным расходом электроэнергии на движение поезда называют расход электроэнергии, отнесенный к единице перевозочной работы – к 1 т массы состава и пройденному расстоянию в 1 км. Его определяют по формуле:

$$a_т = \frac{1000A_т}{m_c L}, \quad (13.15)$$

где $A_т$ – расход электроэнергии на тягу поезда; m_c – масса состава; L – длина участка.

С учетом собственных нужд удельный расход электрической энергии, равен:

$$a_т = \frac{1000A_т}{m_c L} = \frac{1000A_{сн}}{m_c L} = \frac{1000(A_т + A_{сн})}{m_c L}. \quad (13.16)$$

Удельный расход энергии принято также измерять в кВт-ч на измеритель 10^4 т-км. При этом используют переводной коэффициент:

$$1\text{Вт}\overline{\text{т}\square\text{км}}\square\text{ч}\ \square\ \overline{100001000}\ \square 10\text{кВт}_4\ \square\text{т}\square\square\overline{\text{ч}\text{км}}$$

$$\square 1010\text{кВт}_4\ \square_{\text{т}}\square\square\text{ч}_{\text{км}}.$$

13.6. Взаимодействие ЭПС и системы электроснабжения

Движение поездов разных масс по участку, имеющему различные уклоны, с изменяющимися скоростями и потребляемыми токами сопровождается непрерывными колебаниями напряжения в системе электроснабжения. Связанные с этим изменения напряжения в контактной сети и на токоприемниках электроподвижного состава влияют на условия работы тяговых электродвигателей и вспомогательных машин. Наибольшее падение напряжения в тяговой сети бывает в точке наибольшего удаления от тяговых подстанций при потреблении электроподвижным составом больших токов и нахождении на участке нескольких поездов.

При пониженном напряжении скорость движения поезда на одних и тех же позициях контроллера уменьшается, вследствие чего увеличиваются перегонные времена хода и время работы тяговых электродвигателей, что приводит к повышенному нагреву обмоток. Для поддержания нужной скорости машинист может включить более глубокое ослабление возбуждения, однако при этом тяговые электродвигатели потребляют большие токи, которые вызывают повышенный нагрев обмоток. На электровозах постоянного тока при пониженном напряжении на токоприемнике уменьшается частота вращения мотор-вентиляторов и ухудшаются условия охлаждения тяговых электродвигателей.

Все это может привести к недопустимому превышению температуры обмоток тяговых машин, особенно при работе с поездами большой массы.

Низкий уровень напряжения может вызвать недостаточный разгон поезда перед подъемом и создать меньший запас кинетической энергии, вследствие чего скорость движения на подъеме заметно снизится, а это при неблагоприятных условиях может привести к остановке поезда на подъеме. На дорогах имеются так называемые лимитирующие перегоны, на прохождение которых затрачивается больше времени, чем на соседних. Потеря скорости на таком перегоне приводит к снижению пропускной способности участка.

Если пониженное напряжение в контактной сети имеет кратковременный характер, то расчеты проводят или с учетом колебаний напряжения, или считают напряжение номинальным. В случае постоянного пониженного напряжения в контактной сети с разрешения МПС его учитывают в расчетах. При этом перестраивают тяговые и токовые характеристики и пересчитывают скорости движения по формуле:

$$\frac{U^{сп}}{v_п \square v\, U_с}, \qquad (13.17)$$

где $v_п$ – скорость при пониженном напряжении; $U_{сп}$ – уровень пониженного напряжения.

Линии ограничения силы тяги по сцеплению на тяговых характеристиках остаются без изменения. Поэтому при меньшей расчетной скорости, расчетная сила тяги получается больше. Значения токов на токовых характеристиках определяют с учетом увеличенной расчетной силы тяги. Значения сил тяги при ограничении по току на всех характеристиках не изменяются.

Работа электроподвижного состава на линии осложняется резкими колебаниями напряжения контактной сети. Скачкообразное повышение может привести к увеличению продольных сил в поезде, пробуксовкам колесных пар или срабатыванию защиты.

Чтобы уменьшить падение напряжения в контактной сети, необходимо снижать расстояние между тяговыми подстанциями, увеличивать площадь сечения проводов контактной сети при системе постоянного тока или вводить компенсацию реактивной мощности при системе переменного тока. Эти меры требуют больших капитальных и материальных затрат.

В некоторых пределах уменьшить падение напряжения в контактной сети можно правильной организацией движения поездов за счет более равномерной нагрузки сети. Если отправление поездов большой массы чередуется с отправлением поездов установленной массы и пассажирских, то контактная сеть нагружается более равномерно и уменьшаются колебания напряжения.

Применение рекуперативного торможения – это большой резерв использования преимуществ электрической тяги. Рекуперация позволяет экономить электрическую энергию, снижать расход тормозных колодок и износ бандажей, плавно вести поезд, а при системе постоянного тока – повысить напряжение в контактной сети.

13.7. Определение расхода топлива тепловозами и дизель-поездами

При работе тепловоза или дизель-поезда энергия, заключенная в топливе, расходуется на совершение работы по преодолению сил основного и дополнительного сопротивлений, на покрытие потерь в тормозах, дизель-генераторной установке и передаче и на собственные нужды. При расчетах отдельно выделяют расход топлива на стоянках с включенным дизелем и на передвижение по станционным и деповским путям. Массу топлива, расходуемого на движение поезда с учетом собственных нужд, определяют экспериментально для каждой серии тепловозов или дизель-поездов. Учитывают время работы дизеля в режиме тяги на различных положениях рукоятки контроллера машиниста

с потреблением различного количества топлива и время работы дизеля на холостом ходу.

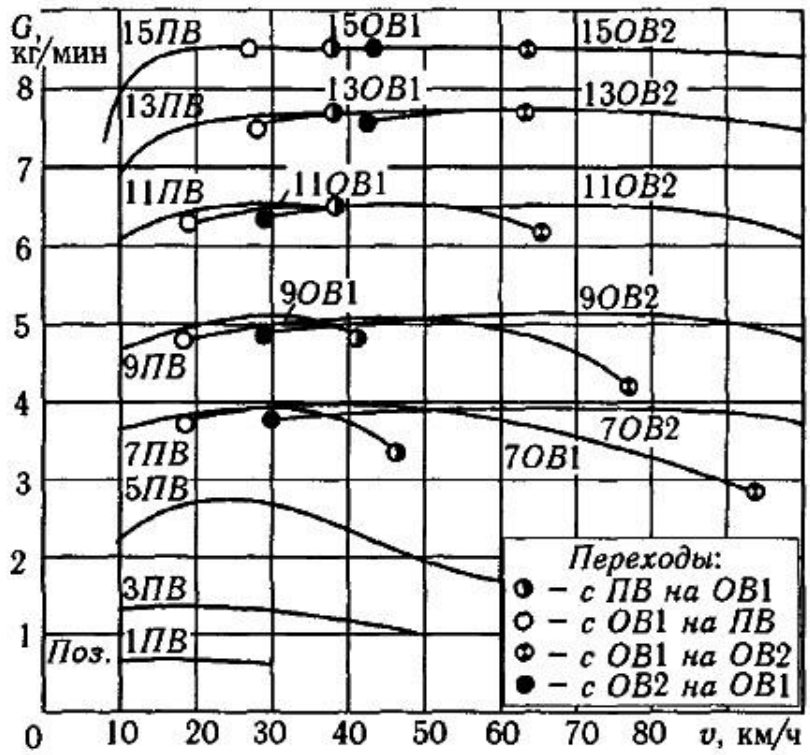


Рис. 13.6. Кривые расхода топлива в режиме тяги тепловозами 2ТЭ10В, 2ТЭ10М и 2ТЭ10Л (на один дизель)

На рис. 13.6 приведены кривые расхода топлива в режиме тяги тепловозов 2ТЭ10В, 2ТЭ10М и 2ТЭ10Л. Из него видно, что расход на каждом положении рукоятки контроллера в широком диапазоне скоростей изменяется в небольших пределах. С изменением положения рукоятки контроллера, а следовательно, и частоты вращения коленчатого вала дизеля изменяется и расход топлива. График для его определения на тепловозах 2ТЭ116 на 15-м положении рукоятки приведен на рис. 13.7 (значения в числителе даны для одной секции; в знаменателе – для двух), на тепловозах ТЭП60 – на рис. 13.8.

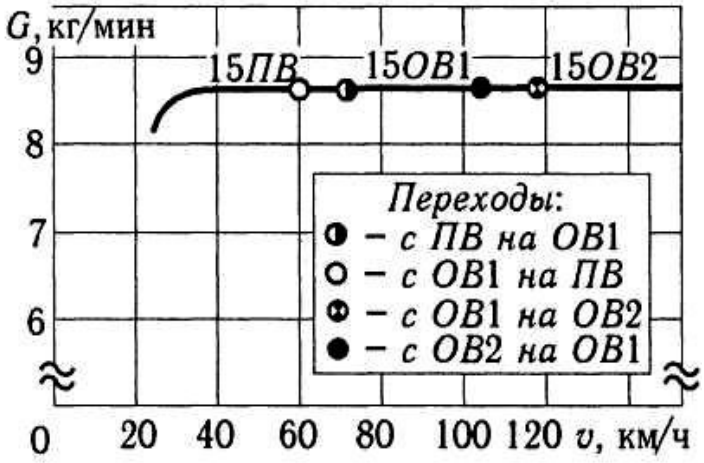


Рис. 13.8. Кривые расхода топлива в режиме тяги тепловозом ТЭП60 на 15-м положении рукоятки контроллера машиниста

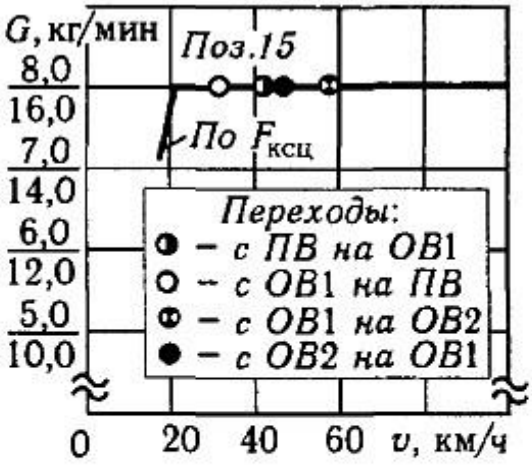


Рис. 13.7. Кривые расхода топлива в режиме тяги тепловозом 2ТЭ116 на 15-м положении рукоятки контроллера машиниста

Массу топлива, расходуемого в одну минуту на холостом ходу, для каждого типа дизеля берут из графиков в зависимости от частоты вращения вала дизеля. На рис. 13.9 приведены для примера кривые $g_x(n_д)$ для тепловозов 2ТЭ10В, 2ТЭ10М и др. с дизелем 10Д100.

Режимы работы дизелей на стоянках, учитывающие специфику местных условий, устанавливают распоряжением по дороге. Если таких распоряжений нет, то расход топлива выбирают по таблице 13.3. В случае применения другого числа секций расход топлива нужно соответственно изменить.

Таблица 13.3

Серия тепловоза или дизель-поезда	Частота вращения коленчатого вала $n_д$, об/мин	Удельный расход топлива при работе на холостом ходу g_x, кг/мин	
		одним дизелем	тепловозом или дизель-поездом
2ТЭ10В, 2ТЭ10Л, 2ТЭ10	400	0,38	0,76
2ТЭ116	350	0,25	0,50
М62	400	0,42	0,42
ТЭ3, ТЭ7	400	0,35	0,70
ТЭП60	400	0,50	0,50
ЧМЭ3	350	0,15	0,15
ДР1	700	0,14	0,28

По известным расходам топлива в одну минуту определяют расход топлива тепловозом или дизель-поездом:

$$E = G_1 \Delta t_1 + G_2 \Delta t_2 + \ldots + g_x t_x = \sum G_i \Delta t_i + g_x t_x, \qquad (13.18)$$

где E – масса топлива, расходуемая на передвижение состава; G_1, G_2, ..., G_i – масса топлива, расходуемая тепловозом или дизель-поездом при средней скорости движения на данной позиции контроллера машиниста в одну минуту; Δt_1, Δt_2, Δt_3 – время работы дизеля с данной средней скоростью; g_x – масса топлива, расходуемого тепловозом или дизель-поездом на холостом ходу в одну минуту; t_x – время хода по участку на холостом ходу и время стоянок.

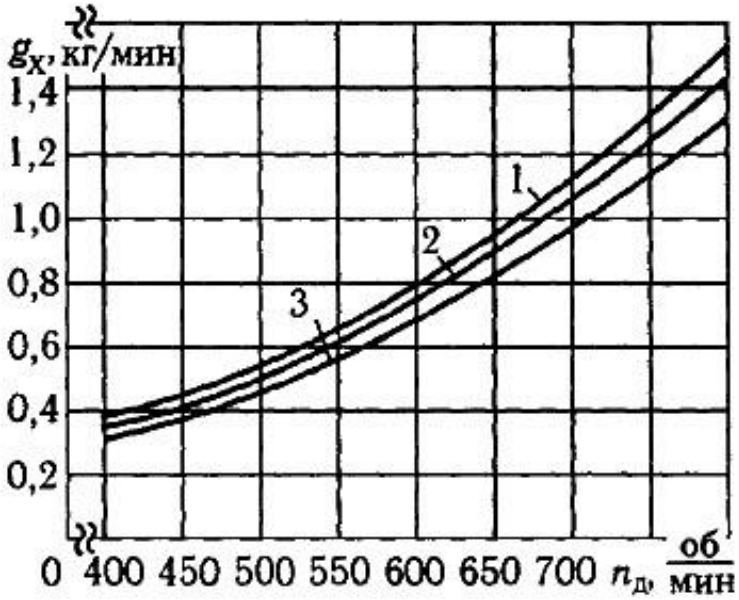


Рис. 13.9. Расход топлива одним дизелем на холостом ходу тепловозов 2ТЭ10В, 2ТЭ10Л, ТЭ10, ТЭП10:
1 — вентилятор включен на вторую ступень;
2 — вентилятор включен на первую ступень;
3 — вентилятор выключен

Расход топлива при следовании одиночных тепловозов по станционным и деповским путям в режиме тяги определяют для движения на первой ездовой позиции контроллера машиниста со скоростью 10... 15 км/ч. При этих условиях его принимают следующим:

2ТЭ10В, 2ТЭ10М, 2ТЭ10Л, 2ТЭ10, ТЭП10Л ……...…… 0,5
2ТЭ116, ТЭП60, 2ТЭП60, ТЭП70 ……...……... 1,0
ТЭ3, ТЭ7 ..... …….……. 0,6

Для тепловозов остальных серий, а также дизель-поездов удельный расход топлива берут равным 0,3 кг/мин.

Потребляемое вспомогательными силовыми установками дизель-поездов ДР1 топливо определяют по средней потребляемой мощности агрегатов,

обслуживаемых ими, и полному времени их работы. В среднем расход топлива на одну установку дизель-поезда ДР1 составляет 0,18 кг/мин, а на дизель-поезд, имеющий две такие установки, – 0,36 кг/мин.

Используя приведенные данные, формулы, таблицы и кривые, определяют расход топлива для тепловоза или дизель-поезда при работе на линии.

Для сравнения расхода топлива различными тепловозами используют удельный показатель на измеритель выполненной перевозочной работы 10^4 т-км:

$$e = \frac{E}{10^4 m_c L}, \quad (13.19)$$

где e – удельный расход топлива; E – расход топлива на перемещение поезда; m_c – масса состава; L – длина участка.

Чтобы сравнить различные виды и сорта топлива, имеющие разную теплоту сгорания, пользуются так называемым условным топливом, имеющим удельное количество теплоты горения 29,3 МДж/кг.

При пересчете расхода натурного топлива на условное используют тепловой эквивалент **Э,** равный отношению удельного количества теплоты горения натурного и условного топлива. Для дизельного топлива удельное количество теплоты горения равно 41,9 МДж/кг. Отсюда – Э = 41,9/29,3 = 1,43. Следовательно, удельный расход условного топлива равен:

$$e_y = e\,Э. \quad (13.20)$$

13.8. Техническое нормирование расхода электрической энергии и топлива

Чтобы планировать расход топливно-энергетических ресурсов на каждом участке, необходимо иметь технические нормы расхода электрической энергии для электроподвижного состава и топлива для тепловозов и дизель-поездов на измеритель 10^4 т-км. Разработка норм – сложная задача, так как на расход энергии или топлива влияет много факторов, изменяющихся по сложным законам с изменением условий движения. Нормирование усложняется в

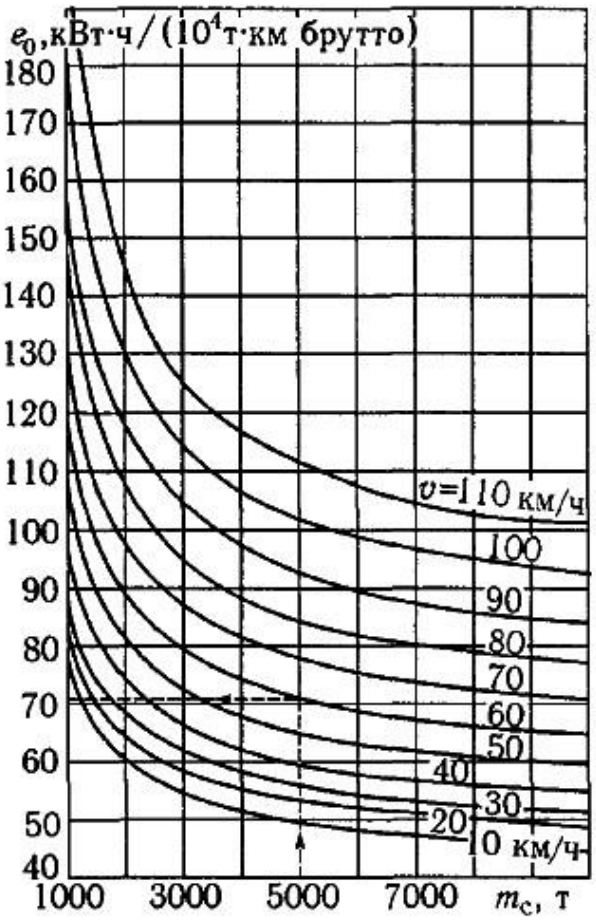


Рис. 13.10. Энергетический паспорт электровозов ВЛ80^С, ВЛ80^Т, ВЛ80^К

связи с разными показателями экономичности работы локомотивов из-за неизбежных отклонений сил сопротивления движению, а также сил тяги локомотивов вследствие расхождения характеристик тяговых электродвигателей и износа бандажей колесных пар. Тем не менее, правильные, технически обоснованные нормы позволяют не только планировать расход топливно-энергетических ресурсов, но и улучшать организацию эксплуатации, создавать стимулы для работников железнодорожного транспорта по снижению расхода энергии и топлива на тягу поездов.

Техническое нормирование расхода электрической энергии и топлива на тягу поездов основано на использовании аналитического метода определения расхода электроэнергии или топлива. За исходную норму принимают расход энергии или натурного топлива при движении поезда с грузовыми составами определенных масс, состоящих из четырехосных вагонов массой, приходящейся на одну ось, равной 17,5 т, по прямолинейному горизонтальному пути с определенными скоростями. Полученные расходы энергии e_0, кВтч/(10^4 т-км), или топлива n_0, кг/(10^4ткм) для различных масс составов и скоростей движения называют ***энергетическими паспортами.*** Их приводят в виде таблиц или графиков.

Из энергетического паспорта (рис. 13.10) можно узнать, сколько энергии на измеритель будет израсходовано на тягу поезда с составом заданной массы при движении с какой-либо средней скоростью. Так, при движении поезда электровозом ВЛ80^с и составом массой 5000 т при указанных условиях со средней скоростью 60 км/ч расход энергии на измеритель составит 71 кВтч/(10^4 ткм) брутто (без учета массы локомотива).

При движении поезда в реальных условиях расход энергии или топлива отличается от данных энергетических паспортов. Поэтому при нормировании расхода энергии используют корректирующие коэффициенты, учитывающие реальные сопротивления движению. Норму расхода энергии, кВтч/(10^4 т-км), определяют по формуле:

$$e \square e_0 к_{сп} к_{\square} к_{\square} к_i \square z \square \square \square e_т \square \square e_р \square \square e_{сп} \square к_п \square Q_с к \square_в \square, \qquad (13.21)$$

где e_0 – расход энергии по энергетическому паспорту электровоза при данных средней скорости движения и массе состава; $к_{сп}$ – коэффициент, учитывающий изменение сопротивления движению состава для разных типов вагонов; $к_{\square}$ □ коэффициент влияния степени использования грузоподъемности вагона; $к_i$ – коэффициент трудности пути нормируемого участка, определяемый эквивалентным подъемом участка; $к_{\square}$ □ температурный коэффициент нормируемого периода; z□□ число остановок, предусмотренных графиком движения поездов на 100 поездо-км; □$e_т$ – затраты электроэнергии на восстановление кинетической

энергии, потерянной при торможении, отнесенные к 10^4 т-км брутто; $e_{\text{□}}$ - потери энергии для электровозов постоянного тока в реостате при трогании и разгоне, отнесенные к 10^4 т-км брутто; $e_{сп}$ – затраты электроэнергии на вспомогательные цепи ЭПС, отнесенные к 10^4 т-км брутто; $к_в$, $к_в'$ — коэффициенты использования мощности вспомогательных машин на ходу и на стоянках; Q_c – коэффициент стояночного времени как отношение времени стоянок к общему времени за поездку.

Норму расхода топлива, кг/(10^4 т-км) брутто, рассчитывают по формуле: n □

$$n_0 к_{сп} к_{\text{□}} к_i к_{\text{□}} \text{ □ } z\text{□}n_т \text{ □}к_x n_x \text{ □}Q_c n_x к\text{□}_x , \qquad (13.22)$$

где n_0 – расход топлива по энергетическому паспорту при $v_{ср}$ и m_c; $n_т$ — затраты топлива на накопление кинетической энергии, потерянной при торможении, отнесенные к 10^4 т-км брутто; $к_x$ – коэффициент холостого хода дизеля, равный отношению времени холостого хода к общему ходовому времени; n_x – затраты топлива на холостой ход; $к_x'$ – коэффициент холостого хода дизеля во время стоянок.

Все коэффициенты, входящие в выражения (13.21) и (13.22), приведены в соответствующих указаниях РЖД.

В настоящее время для нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов используют статистические показатели расхода за предыдущие периоды работы участка с их корректировкой, вызванной изменениями условий эксплуатации: повышением средних скоростей движения, изменением сил сопротивления движению вагонов из-за использования разных типов вагонов или вследствие замены на участке звеньевого пути на бесстыковой и т.д.

13.9. Способы уменьшения расхода электрической энергии и топлива

Общие положения. Железнодорожный транспорт – крупный потребитель электрической энергии и топлива. Поэтому их экономному расходованию уделяется большое внимание.

Основные пути экономии электроэнергии на тягу поездов можно найти из анализа составляющих расхода электрической энергии (см. раздел 13.4). Аналогичный анализ, проведенный для тепловозов, позволяет выявить пути снижения расхода топлива.

Чтобы уменьшить расход электроэнергии и топлива, необходимо снизить основное сопротивление движению. Расход топливно-энергетических ресурсов при увеличении скорости движения возрастает в большей степени, чем скорость. Потому при одной и той же средней скорости движения расход электроэнергии или топлива меньше в том случае, когда фактическая скорость близка к средней.

В случае нагона опоздания расход топливно-энергетических ресурсов возрастает. Он также возрастает с увеличением средних скоростей движения.

Однако следует учитывать, что при этом достигается дополнительный эффект от ускорения доставки пассажиров и грузов, от ускорения оборота подвижного состава железных дорог и т.п. Поэтому дальнейшее повышение скоростей движения является важной задачей.

Большое значение для снижения расхода топливо - энергетических ресурсов имеет техническое содержание подвижного состава. Повышенные износы в ходовых частях приводят к ухудшению плавности движения локомотивов и вагонов, появлению повышенных колебаний их частей и более высокому расходу электроэнергии или топлива.

Чтобы уменьшить время хода по перегону, необходимо при движении по спуску развивать наибольшую допустимую скорость для последующего прохода подъема за счет накопленной кинетической энергии. Правильное использование кинетической энергии поезда позволяет значительно снизить расход электрической энергии или топлива. В этом случае большое значение имеют навыки машинистов по рациональному вождению поездов на участке и контроль за расходованием каждой бригадой электроэнергии и топлива.

Перевозка грузов в неполновесных составах или в не полностью загруженных вагонах увеличивает удельное сопротивление движению, а следовательно, перерасход электроэнергии или топлива на тягу поездов. С увеличением массы поезда и загрузки вагонов снижается расход электрической энергии и топлива на единицу перевезенного груза. Однако масса состава не должна превышать критической нормы, так как при этом увеличится боксование колесных пар локомотива или будут перегреваться обмотки тяговых электрических машин.

Расход электрической энергии или топлива при движении поезда по уклонам и кривым зависит от их крутизны и протяженности, радиуса и длины кривой, режима ведения поезда, а на электроподвижном составе — и степени использования рекуперативного торможения на вредных спусках. Расход топливно-энергетических ресурсов возрастает с увеличением крутизны подъема и времени движения поезда по нему, а на кривых участках пути увеличивается с уменьшением радиуса кривой. Следовательно, на участках, имеющих большое число кривых малого радиуса, электроэнергии или топлива при прочих равных условиях будет израсходовано больше.

Часть запасенной кинетической или потенциальной энергии поезда теряется в тормозах при торможении. Ее количество зависит от квадрата начальной скорости торможения, массы поезда и числа остановок или снижений скорости с применением тормозов, а при следовании по спуску – от его крутизны и протяженности. Для уменьшения расхода электрической энергии или топлива на покрытие потерь в тормозах необходимо уменьшить число остановок и мест ограничения скорости движения поездов.

Особенно велики потери из-за остановок поездов перед закрытыми сигналами или из-за порч подвижного состава. Так, остановка одного поезда массой 4000 т перед закрытым сигналом на прямолинейном горизонтальном пути со скорости 60 км/ч и последующий разгон до этой же скорости вызывают лишний расход энергии электровозом ВЛ80^{с} в 190 кВт-ч (по сравнению с движением на этом участке с постоянной скоростью 60 км/ч). Одна такая остановка при интенсивном движении поездов выбивает из графика до 10...15 поездов. При этом перерасходуется до 1,5 т топлива или 2,5 тыс. кВт-ч электроэнергии. Поэтому четкая организация движения поездов и отличное содержание подвижного состава обеспечивают экономичную работу локомотивов.

При трогании и разгоне поезда локомотив работает с пониженным КПД. Поэтому время разгона необходимо снижать за счет использования возможно больших сил тяги и ускорений. Повышение ускорения при сохранении одинакового перегонного времени дает возможность дольше следовать на выбеге и начать торможение при меньшей скорости движения. Для снижения расхода электроэнергии и топлива необходимо, чтобы локомотив работал в зоне высоких значений КПД.

В некоторой степени топливно-энергетические ресурсы можно сэкономить за счет снижения их расхода на собственные нужды локомотивов и на работу вспомогательных механизмов и машин. Например, уменьшение утечек воздуха на локомотиве и особенно в составе приведет к меньшему времени работы компрессора, а следовательно, к снижению затрат энергии или топлива. Рассмотрим некоторые резервы снижения расхода электроэнергии и топлива на электроподвижном составе и тепловозах.

На электроподвижном составе очень большую экономию электрической энергии наряду с повышением безопасности движения дает использование рекуперативного торможения. За счет рекуперации ежегодно в контактную сеть возвращается около 3 % от потребляемой электроэнергии. Дальнейшее расширение сети электрифицированных железных дорог, на которых применяется рекуперативное торможение, позволит повысить экономичность использования электрической энергии.

При разгоне электроподвижного состава постоянного тока часть потребляемой энергии теряется в пусковом реостате. Потери энергии зависят от пускового тока, времени разгона, числа остановок и участков, где необходимо снижать скорость с последующим разгоном, а также от коэффициента пусковых потерь электроподвижного состава. Эти потери энергии при торможении и пуске особенно велики на пригородных электропоездах из-за частых остановок и коротких перегонов. Потери энергии при торможении пригородного электропоезда достигают 50 %, при пуске – 10...15 % общего расхода

электроэнергии. Эти потери возрастают с увеличением скоростей движения и сокращением расстояний между остановочными пунктами.

Потери при пуске уменьшают за счет выхода на безреостатную характеристику при меньшей скорости. Это возможно при разгоне с большими токами. При разгоне с током $I_{д1}$ (рис. 13.11) реостат будет выведен при скорости v_1. Если же разгон будет происходить с током $I_{д2}$, реостат будет выведен при меньшей скорости v_2. Кроме того, повышение ускорения дает возможность быстрее разогнаться, увеличить время следования на выбеге и начать торможение при меньшей скорости движения **(**$v_{т2}$ вместо $v_{т1}$ на рис. 13.12). Вследствие этого снижаются потери в тормозах, пропорциональные квадрату скорости начала торможения (площади, ограниченные кривыми v(t) и осью абсцисс, одинаковы, что соответствует одинаковой длине перегона).

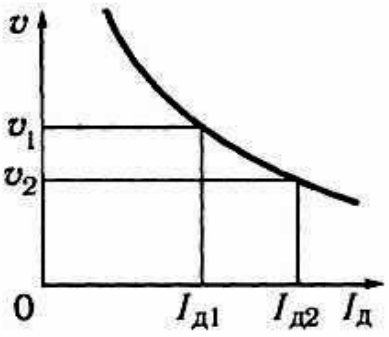


Рис. 13.11. Зависимость скорости выхода на безреостатную характеристику от тока

Расход электроэнергии, пропорциональный площади, ограниченный кривой $I_э(t)$ и осью абсцисс, при меньшем ускорении становится больше, чем при более интенсивном ускорении, и площадь фигуры $\mathbf{Oa_1b_1c_1d_1e_1f_1}$ больше площади фигуры $\mathbf{Oa_2b_2c_2d_2e_2f_2}$**.** Необходимо отметить, что повышение ускорения дает наибольший эффект при малых ускорениях электропоезда – 0,2...0,5 м/с^2; при ускорениях же 0,7...1 м/с^2 эффект на перегонах длиной 1,5...2 км значительно меньше. Экономия электроэнергии за счет повышения ускорения движения возрастает при уменьшении длины перегона. При редких остановках, характерных для электровозной тяги, снижение расхода электроэнергии за счет больших ускорений при пуске в общем расходе электроэнергии незначительно.

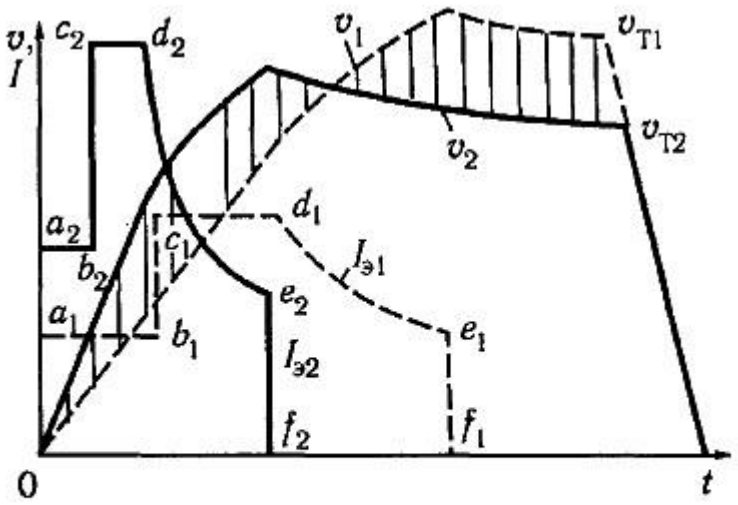


Рис. 13.12. Влияние интенсивности разгона поезда на расход электрической энергии

Электроэнергия на пригородном электропоезде с автоматическим пуском экономится при правильной регулировке реле ускорения. Использовать кнопку пониженного ускорения следует только в случае крайней необходимости, обычно после ухудшения условий сцепления. На электровозах машинист может изменять пусковой ток и, следовательно, влиять на значение потерь электроэнергии.

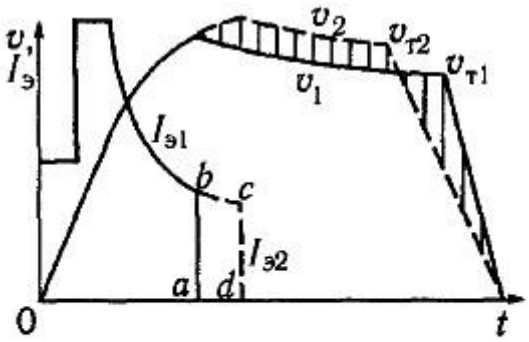


Рис. 13.13. Влияние интенсивности замедления поезда на расход электрической энергии

В большинстве случаев при трогании грузовых поездов потери электроэнергии уменьшаются с повышением ускорения. И только в случае трогания легковесного состава на легком профиле расход электроэнергии теоретически снижается при уменьшении ускорения. Однако для сокращения перегонных времен хода и повышения пропускной способности участков поезда на электровозной тяге обычно разгоняют с наибольшими ускорениями.

Интенсивность замедления поезда при торможении также влияет на расход электроэнергии. На рис. 13.13 показаны кривые v(t) и $I_э(t)$ при равных временах хода по одному и тому же перегону, но с различным замедлением при

торможении. За счет большего замедления при торможении (кривая $\mathbf{v_1}$) снижается скорость начала торможения, увеличивается время движения на выбеге и уменьшается время хода под током. Экономия электрической энергии при этом соответствует площади фигуры **abcd.**

Ослабление возбуждения после выхода на характеристики полного или нормального возбуждения также снижает расход электроэнергии за счет более интенсивного увеличения скорости (кривая v_2 на рис. 13.14) и снижения скорости начала торможения $v_т$. Ток при движении на позиции ослабленного возбуждения больше, чем при полном возбуждении, но время езды под током значительно меньше.

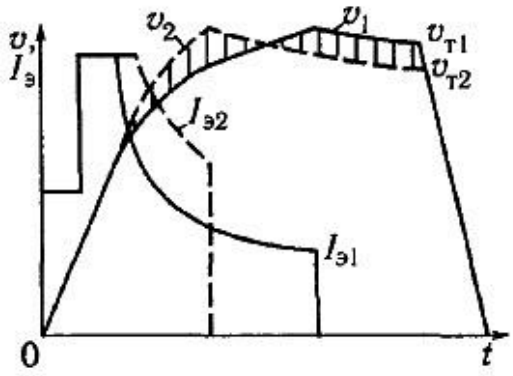


Рис. 13.14. Влияние включения ступеней ослабления возбуждения на расход электрической энергии

Потери в пусковом реостате электроподвижного состава постоянного тока можно уменьшить, применяя ослабление возбуждения тяговых электродвигателей на промежуточных ходовых позициях (на **С** и **СП**). Дело в том, что разгон в зоне характеристик ослабленного возбуждения происходит при выключенном реостате. Потери энергии при ее преобразовании на электроподвижном составе — в тяговых электродвигателях, преобразователях, вспомогательных машинах, зубчатой передаче и резисторах – также влияют на расход энергии.

Экономичность работы электродвигателей определяется КПД, который имеет большее значение в зоне номинальных нагрузок. Поэтому желательно, чтобы электродвигатели работали в зоне таких нагрузок. Потери электроэнергии можно снизить за счет режима ослабленного возбуждения, при котором в широкой зоне больших нагрузок КПД имеет более высокое значение, чем при полном возбуждении. КПД уменьшается при понижении напряжения на электродвигателях.

Расход электроэнергии на собственные нужды электроподвижного состава можно снизить, используя низкую скорость вентиляторов на электровозах

постоянного тока. Однако это допустимо только в тех случаях, когда нагрузки тяговых электродвигателей невелики, и исключается их перегрев.

Работа двигателей компрессоров будет экономичной, если утечки сжатого воздуха, прежде всего, в тормозной магистрали будут минимальными.

Значительное количество электроэнергии в зимнее время расходуется на отопление вагонов электропоездов, и для ее экономии необходимо использовать и правильно регулировать терморегуляторы.

Опыт лучших машинистов по экономичному вождению поездов показывает, что при правильном управлении электровозом можно добиваться значительного снижения расхода энергии. Для распространения такого опыта на каждом участке составляют режимные карты, в которых рекомендованы рациональные режимы вождения поездов на протяжении всего участка. Использование режимных карт, правильная их корректировка в случаях отклонения условий движения данного поезда от обычных условий способствуют снижению энергии на тягу поездов.

На тепловозах расход топлива определяется выполненной механической работой по преодолению сил сопротивления движению поезда и экономичностью работы дизеля, которая оказывает наибольшее влияние на КПД тепловоза. На рис. 13.15 для примера показана зависимость КПД тепловоза ТЭ10 от скорости. Из него видно, что при разгоне поезда КПД имеет низкие значения, а в зоне ходовых скоростей – значительно выше. В зоне высоких скоростей наблюдается некоторое снижение КПД. Кроме того, экономичность работы тепловоза зависит от положения рукоятки контроллера. Из рис. 13.15 видно: наиболее экономичными являются положения 7...11 рукоятки, когда тепловоз ТЭ10 работает при наибольшем КПД.

Работа дизеля на локомотиве имеет свою специфику, связанную с большим временем работы на холостом ходу и частичных нагрузках. На отдельных дорогах тепловозы в номинальном режиме задействованы только 20...**30** % времени, в режиме холостого хода – 25...30 %. Остальное время они работают с частичной мощностью. В среднем тепловозы работают при мощности, составляющей 40...60 % от номинальной. Средний эксплуатационный **КПД** локомотива с учетом холостого хода и частичной нагрузки оказывается значительно меньшим, чем указано на рис. 13.15, и составляет в среднем 20...21 %. Своевременная установка рукоятки контроллера машиниста в соответствующее положение при изменяющихся режимах позволяет опытному машинисту находить наиболее экономичные режимы работы тепловоза и обеспечивать меньший расход топлива.

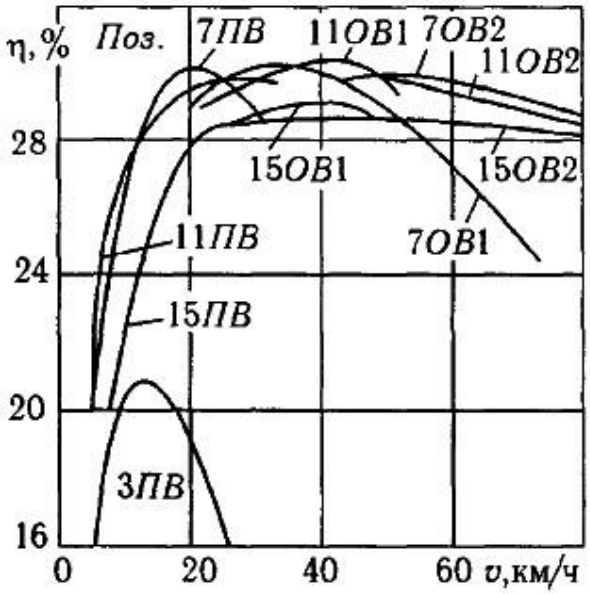


Рис. 13.15. Зависимость КПД тепловоза ТЭ10 от скорости на некоторых положениях рукоятки контроллера машиниста

Иногда для некоторого повышения экономичности двухсекционного тепловоза на сравнительно легких участках пути выключают одну секцию. При этом дизель и тяговые электродвигатели другой секции работают в зоне более высокого КПД. Такой режим можно рекомендовать только после проверки его эффективности с учетом работы дизеля, аккумуляторной батареи и тяговых машин. В зимнее время эффективность выключения одной секции снижается, так как остановленный дизель приходится часто запускать, чтобы не допустить чрезмерного понижения температуры воды и масла, а также для предотвращения попадания снега и пыли в тяговые электродвигатели неработающей секции.

Для экономии топлива на тягу поездов нужно умело использовать кинетическую энергию движущегося поезда, зависящую от массы поезда и квадрата скорости движения. Так, при движении по спуску необходимо тормозами поезда управлять с таким расчетом, чтобы к концу его достигалась наибольшая допустимая скорость движения. Накопленный запас энергии в дальнейшем будет использован для следования поезда по горизонтальному пути или подъему с меньшими затратами топлива. Если же машинист нерасчетливо применит тормоза, и к концу спуска поезд подойдет с меньшей скоростью, то в тормозах будет потеряно больше энергии, и для дальнейшего движения придется затратить больше топлива.

Наиболее экономичным является движение поезда с минимальным использованием тормозов. Каждая остановка грузового поезда с составом массой 3000 т увеличивает расход топлива примерно на 30 кг (на трогание с места и

разгон). Кроме того, топливо расходуется на холостой ход дизеля во время остановок. При простое неработающего тепловоза в течение 1 ч расходуется около 40 кг дизельного топлива. Каждое ограничение скорости движения вызывает дополнительный расход топлива. Так, при снижении скорости с 50 до 20 км/ч перерасход топлива составит до 20 кг. Нагон опоздания также приводит к повышенному расходу топлива. Одна минута опоздания пассажирского поезда при нагоне увеличивает его на 15 кг.

Большое влияние на расход топлива оказывают теплотехническое и техническое состояния тепловоза. Необходимо, чтобы были правильно отрегулированы мощность дизель-генераторной установки, частота вращения вала, угол опережения впрыска топлива, равномерность подачи топлива по цилиндрам. При занижении мощности ухудшается экономичность работы дизелей 10Д100, 2Д100 на режимах малых и средних нагрузок. Кроме того, тепловоз может не обеспечить выдерживание заданных скоростей.

Изменение мощности за счет увеличения частоты вращения вала дизеля приводит к увеличению расхода топлива и ускорению износа деталей дизеля. Недопустима также меньшая частота вращения вала при реализации номинальной мощности, так как экономичность дизеля снижается, а сам дизель работает в более напряженных условиях. Отклонение угла опережения от оптимального, неодинаковое количество впрыскиваемого топлива по отдельным цилиндрам дизеля резко снижают экономичность его работы, а кроме того, приводят к неравномерной загрузке цилиндров и повышенным износам поршневой группы и шатуннокривошипного механизма перегруженных цилиндров.

Неудовлетворительное техническое состояние дизеля и его вспомогательного оборудования также снижает экономичность работы тепловоза. Заниженное наполнение цилиндров воздухом, например, из-за загрязнения воздушных фильтров или при чрезмерном износе поршневых колец, приводит к неполному сгоранию топлива, снижая экономичность работы дизеля. При этом дизель дымит, образуется нагар, загрязняется система смазки и выпускная система, что требует преждевременной очистки от нагара выпускных окон цилиндров, коллекторов и глушителей.

Таким образом, экономного расходования топлива можно достичь только отличным содержанием тепловоза и умением машиниста выбирать наивыгоднейшие режимы движения поезда. С этой целью в депо проводится техническая учеба машинистов, разрабатывают режимные карты и памятки. Правильное сочетание рекомендаций, указанных в режимных картах, с конкретными условиями и особенностями движения каждого поезда позволяет уменьшить расход топлива.

Тема 14 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ

14.1. Общие сведения

Дальнейшее развитие железнодорожного транспорта направлено на получение более высоких технико-экономических показателей. С этой целью занимаются повышением скоростей при соблюдении условий безопасности движения поездов, сокращением эксплуатационных и ремонтных затрат, снижением энергетических ресурсов, созданием более надежных узлов и систем.

Так, в системе тягового подвижного состава намечено широкое применение бесколлекторных тяговых электродвигателей, получающих питание через полупроводниковые преобразователи. Такие системы обеспечивают более высокое использование тяговых свойств локомотивов, автоматизацию процессов ведения поезда на базе современных микропроцессорных систем с внедрением бортовой технической диагностики.

Применяемые в настоящее время на нашем электроподвижном составе и тепловозах коллекторные тяговые машины постоянного тока имеют благоприятные тяговые характеристики. Однако у них сложная конструкция, в которой кроме обмоток якоря и возбуждения, необходим коллекторно-щеточный узел. Он снижает эксплуатационную надежность электродвигателя и требует повышенных затрат времени и сил на обслуживание и ремонт.

Использование на локомотивах и электропоездах бесколлекторных тяговых электродвигателей – вентильных и асинхронных – именно из-за отсутствий у них коллектора упрощает конструкцию и облегчает уход за ними в эксплуатации.

Кроме того, бесколлекторные машины, обладая одинаковыми мощностью и частотой вращения с коллекторными, имеют значительно меньшие размеры. Это особенно важно для электровозов, у которых дальнейшее повышение мощности коллекторных тяговых электродвигателей ограничивается их габаритами.

Длина тягового электродвигателя ограничена расстоянием между бандажами колесной пары и местом размещения редуктора (на грузовых электровозах – двухстороннего). Внешний диаметр остова ограничен централью, т.е. расстоянием между осями зубчатого колеса и остова, минимальным размером шестерни по ее прочности и наибольшим диаметром зубчатого колеса по допустимому зазору между кожухом редуктора и уровнем головки рельса<

Отсутствие коллектора и более высокое использование материалов в бесколлекторном электродвигателе позволяет вписать в габариты тележек тяговые электродвигатели мощностью в 1,5...1,7 раза большей, чем коллекторные.

Расчеты показывают, что использование бесколлекторных электродвигателей с автоматизированной микропроцессорной системой управления электровозом и

применение современных неизнашиваемых узлов позволяет снизить расходы на их обслуживание и ремонт на 30...40 %.

Вентильные тяговые электродвигатели конструктивно подобны синхронным машинам. Их многофазная обмотка якоря располагается на статоре, а обмотка возбуждения - на роторе и получает питание через контактные кольца и щетки.

Асинхронные тяговые электродвигатели с короткозамкнутым ротором имеют более простую конструкцию. В них нет контактных колец и щеток, что облегчает их обслуживание, которое сводится к уходу за подшипниками.

На тепловозах перспективной является передача переменно- переменного тока, когда дизель вращает ротор синхронного генератора, который через полупроводниковый преобразователь питает асинхронные тяговые электродвигатели.

Применение такой передачи с микропроцессорной системой управления и другие технические усовершенствования повысят производительность тепловозов в поездной работе на 15...20 % и сократят затраты на техническое обслуживание и ремонт на 10...15 %.

На эксплуатируемых электровозах и электропоездах используют почти исключительно коллекторные тяговые электродвигатели постоянного или пульсирующего тока. Их достоинства определяются простотой систем регулирования, удобными для тяги и электрического торможения характеристиками, способностью равномерно распределять нагрузку по параллельным цепям.

Однако наличие коллекторно-щеточного узла существенно усложняет техническое обслуживание таких двигателей в депо, снижает надежность тягового электропривода в целом. При имеющихся ограничениях по габаритам уже нет возможности повысить мощность коллекторного двигателя, что необходимо, например, для высокоскоростного подвижного состава.

Поэтому еще на первых этапах развития электрической тяги предпринимались попытки использовать бесколлекторные двигатели. С появлением полупроводниковых преобразователей в 1970–90 гг. стало реальным создание опытных образцов электровозов ВЛ80А, ВЛ80В, ВЛ86Ф и электропоезда ЭР9А, а также тепловоз 2ТЭ126А. В последние годы с использованием более совершенной элементарной базы (быстродействующие тиристоры и силовые транзисторы) построены и проходят ходовые испытания электровоз ЭП200 переменного тока с вентильными тяговыми двигателями, двухсистемные электровозы ЭП10 и ЭП20 с асинхронными двигателями, электропоезда постоянного тока ЭТ2А, ЭД6, СОКОЛ, электропоезд переменного тока ЭН3, а также грузовые тепловозы 2ТЭ25А «Витязь».

Имеются два основных типа бесколлекторных машин, которые в принципе могут быть использованы в качестве тяговых:

- асинхронная 3-фазная с короткозамкнутым ротором;
- синхронная с вентильным коммутатором, называемая поэтому просто вентильной (она использована на электровозах ВЛ80В и ЭП200).

Отечественный и особенно зарубежный опыт показывают, что наиболее перспективно применение асинхронной машины. Если сравнить выполненные образцы коллекторных и асинхронных машин при мощности 900—1000 кВт, то по предельной мощности асинхронный двигатель в 2…2,5 раза превосходит коллекторный. По расходу меди и изоляции асинхронный двигатель по крайней мере вдвое экономичнее машины постоянного тока, а по затратам на техническое содержание – в 6…8 раз.

Определенный недостаток асинхронного двигателя, как и всех бесколлекторных машин, связан с необходимостью иметь сложные системы преобразования электроэнергии. Но эта задача вполне разрешима при современной полупроводниковой технике. Еще один недостаток асинхронного двигателя связан с тем, что для получения удовлетворительных характеристик необходимо иметь предельно малый зазор (около 1 мм) между ротором и статором, что выдвигает очень жесткие требования к якорным подшипникам.

Вентильный двигатель по своим показателям несколько уступает асинхронному. Он не имеет коллектора, но для питания обмотки возбуждения на роторе необходимы контактные кольца со щетками. На первом этапе развития ЭПС с бесколлекторными двигателями вентильной машине отдавали предпочтение по причине более простого выполнения – он может быть выполнен с естественной коммутацией тиристоров.

Однако на данный момент преимущество следует признать за асинхронной машиной. Все отечественные и зарубежные разработки для всех типов ЭПС ведутся на базе асинхронных двигателей.

14.2. Характеристики электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями

Асинхронные тяговые двигатели (АТД) при неизменном подведенном напряжении трехфазного тока обладают жесткими характеристиками. Чтобы регулировать скорость движения (v) и силу тяги ($F_К$), необходимо получаемую из системы энергоснабжения электрическую энергию преобразовать, воздействуя на подводимые к двигателю частоту и уровень трехфазного напряжения.

Все виды характеристик электроподвижного состава с АТД определяются как собственными характеристиками и тяговыми свойствами асинхронной машины, так и принятой системой преобразования электроэнергии. Эта система содержит несколько преобразователей, образующих энергетическую цепочку от

токоприемника до двигателя. На рис. 14.1 показаны характерные преобразовательные системы для ЭПС постоянного тока (рис. 14.1, а) и переменного тока (рис. 14.1, в).

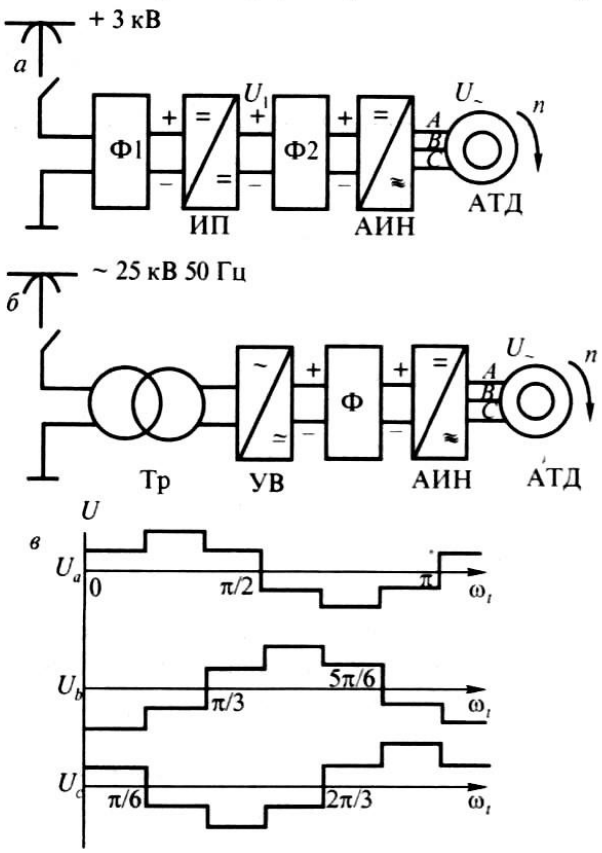


Рис. 14.1. Принципиальная схема преобразования электрической энергии для питания асинхронного тягового двигателя (а, б) и кривая напряжения; по фазам двигателя (в)

Для оптимального регулирования АТД в процессе трогания поезда и затем при регулировании его скорости обычно используют закон академика М.П. Костенко:

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}}\sqrt{\frac{M}{M_н}}; \qquad (14.1)$$

где U_1 и $U_{1н}$ – действительное и номинальное напряжения питания; f_1 и $f_{1н}$ – действительная и номинальная частоты питающего напряжения; M и $M_н$ – действительный и номинальный вращающие моменты электродвигателя.

Для расчетов характеристик электровозов используют приближенную формулу с заменой частоты вращения на скорость и вращающегося момента на силу тяги:

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \frac{v_1}{v_{1н}} \sqrt{\frac{F_{кд}}{F_{кд1н}}}. \qquad (14.2)$$

Таким образом, используя асинхронные тяговые электродвигатели на электровозах, для получения характеристик, отличных от естественных, необходимо воздействовать на величины, входящие в эту формулу.

Частота вращения ротора (n) АТД равна: n =

$$n_{мп}(1-s);$$

где $n_{мп}$ – частота вращения магнитного поля АТД; s – скольжение.

Следовательно, при одинаковом скольжении частота(f)питания АТД и величина напряжения U, приложенного к обмоткам двигателя, должны регулироваться примерно пропорционально частоте (n) вращения АТД или скорости (v) поезда.

Конкретно, применительно к полному циклу движения электровоза с поездом, трогание состава осуществляется на минимальной частоте f =1,5– 2,5 Гц и при минимальном напряжении на двигателе U, равном примерно 30…50 В.

Как при трогании, так и в дальнейшем, регулирование частоты осуществляется выходным звеном преобразовательной системы – автономным инвертором напряжения АИН (одинаково в ЭПС постоянного и переменного тока см. рис. 14.1, а, б), а плавное регулирование напряжения – предварительным каскадом преобразования. В качестве него используется тиристорный импульсный преобразователь ИП в системе электрической тяги постоянного тока или управляемый выпрямитель УВ в схеме электровоза переменного тока.

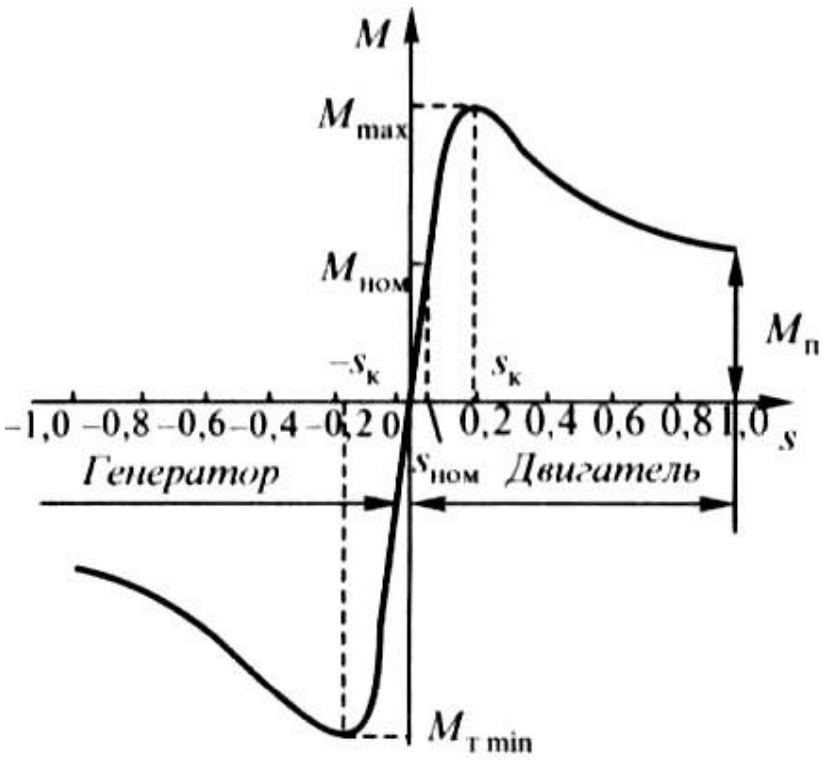


Рис. 14.2, а. Механическая характеристика асинхронной машины

В обоих случаях выходное напряжение преобразователя ИП-АИН или УВАИН, питающее АТД, имеет форму, показанную на (рис. 14.1, в). Собственно АТД имеет зависимость момента (М) от скольжения (s), т.е. от разницы частот вращения ротора и магнитного поля статора, показанную на (рис. 14.2, а). Начало координат соответствует (s = 0), когда указанные скорости равны. Эта ситуация возможна при движении электровоза на спуске. За счет величины скольжения (s) регулируют тяговый режим (s > 0) или генераторный режим (s < 0). При этом не должны быть превышены предельные значения момента M_{max} и M_{min} – в этом случае двигатель теряет устойчивость, т.е. «сбрасывает» момент. Поэтому номинальный момент $M_{ном}$ выбирают примерно с двойным запасом по отношению к его максимальному значению. Соответственно моментам (М) изменяется и сила тяги.

На (рис. 14.2, б) показаны тяговые характеристики (а, в, с) тягового двигателя ($F_{кд}$) электровоза с АТД, получаемые при одновременном регулировании напряжения и частоты с сохранением постоянного скольжения. При отсутствии такого регулирования двигатель работает по характеристикам 1□, 2□, 3□.

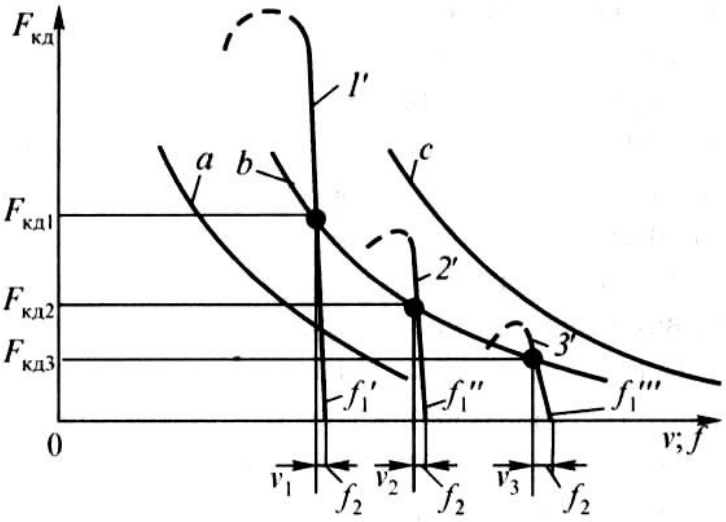


Рис. 14.2, б. Характеристика электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями

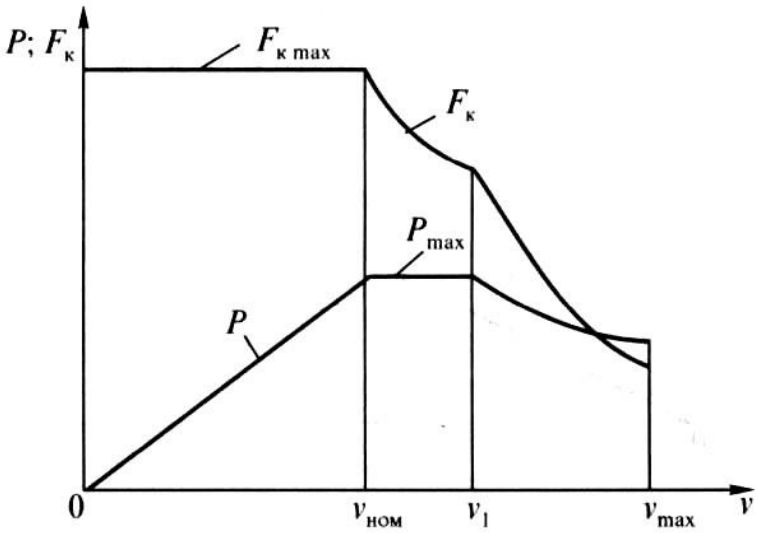


Рис. 14.3, а. Предельные тяговые и мощностные характеристики грузового электровоза

При непрерывном регулировании напряжения и частоты в пределах ограничений по сцеплению и по мощности может быть выбрана любая тяговая характеристика. Поэтому в технической документации обычно указывают предельное положение тяговых характеристик $F_к(v)$ и характеристик мощности $P(v)$, как показано в качестве примера на рисунке (14.3, а и б) соответственно для грузового и пассажирского электровозов.

Для грузового электровоза характерна наибольшая сила тяги $F_{кmax}$ в зоне разгона до скорости $v_{ном}$. Затем в диапазоне $v_{ном} – v_1$ сила тяги $F_к$ убывает при сохранении постоянства мощности P_{max}. На заключительном этапе $v_1 – v_{max}$ мощность и сила тяги убывают при сохранении постоянного (максимального) уровня напряжения. Естественно, во всем диапазоне скоростей частота должна

увеличиваться пропорционально скорости. Такая форма предельной характеристики для грузового электровоза определяется тем, что обычно лимитирующим для него является движение по расчетному подъему, что обычно реализуется со скоростью $v_{ном}$. При более высоких скоростях, когда электровоз движется на участках с уклоном менее расчетного, предельная сила тяги не требуется. Для пассажирского электровоза (рис. 14.3, б) важно сохранить предельную

$$v^{ном}\square\ 0{,}70\ \square 0{,}75.$$

силу тяги $F_к$ до максимально возможной скорости $v_{ном}$, причем

$$v_{max}$$

Для высокоскоростных электровозов при v_{max}= 200…250 км/ч режим постоянства силы тяги $F_к$' с одновременным повышением мощности P' сохраняют вплоть до v_{max}, как показано на рис. 14.3, б штриховыми линиями.

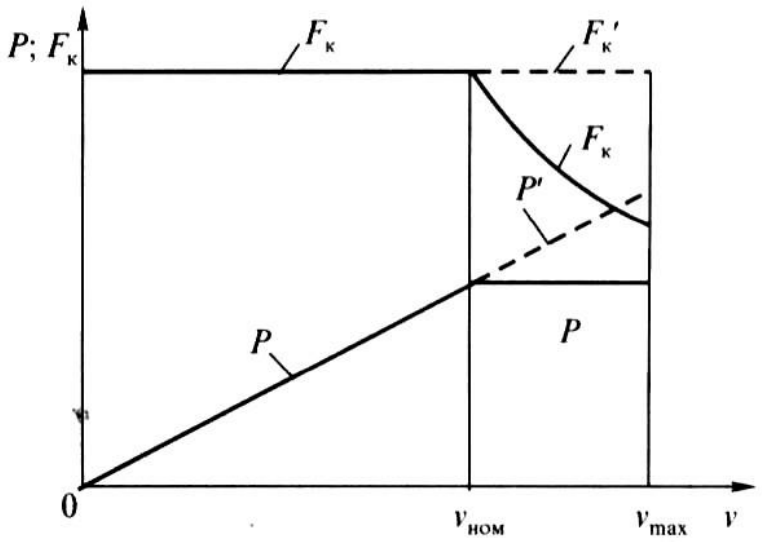


Рис. 7.3, б. Предельные тяговые и мощностные характеристики пассажирского электровоза

Однако не всегда реализуемые характеристики удовлетворяют указанным требованиям. Это связано, как правило, с ограничениями по мощности как самого АТД, так и преобразовательного оборудования, включая трансформатор на электровозах переменного тока и силовые полупроводниковые преобразователи. В качестве примера на рис. 14.4 приведены предельные тяговая $F_к(v)$ и тормозная B(y) характеристики многосистемного 4-осного электровоза типа 36 000 железных дорог Франции. В тяговом режиме при трогании поезда сила тяги регулируется сначала соответственно ограничению по сцеплению (эта часть характеристики $F_к(v)$ заштрихована). При скорости около 70 км/ч осуществляется переход на

характеристику постоянства мощности 7, которая поддерживается системой регулирования вплоть до достижения максимальной скорости 200 км/ч.

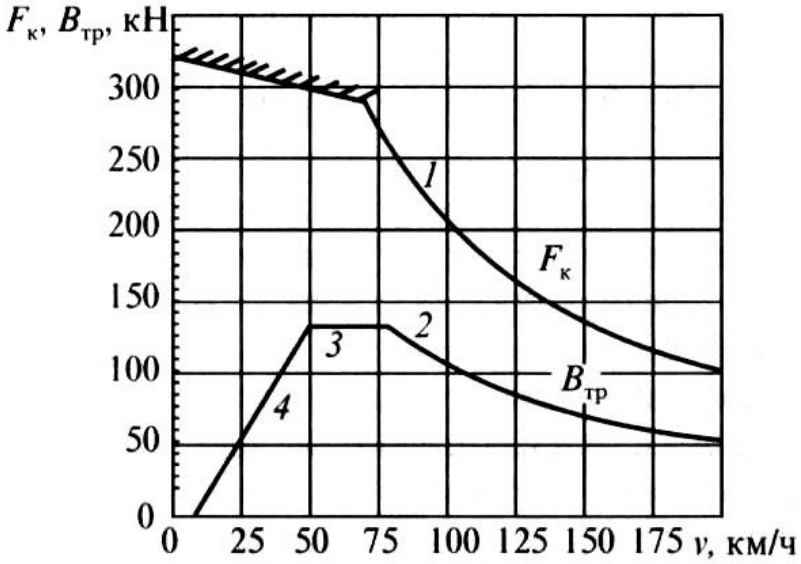


Рис. 7.4. Тяговая и тормозная характеристики электровоза 36 000

Тормозная характеристика $B_{тр}(v)$ на электровозах, эксплуатирующихся в Западной Европе, обычно реализуется на уровне примерно вдвое ниже, чем тяговая $F_к(v)$.

Характеристика $B_{тр}(v)$ также содержит гиперболическую часть 2, небольшой участок 3 постоянства тормозной силы и затем участок ***4*** постепенного истощения тормоза, когда нужно переходить на пневматическое колодочное торможение.

В качестве конкретного примера на рис. 14.5 приведены предельные тяговые характеристики двухсистемного 6-осного электровоза ЭП10 с двигателями НТА1200 при часовом – 2 и продолжительном – 3 режимах, с ограничениями по току – 7, сцеплению колес с рельсами – 4, и v_{max} – 5.

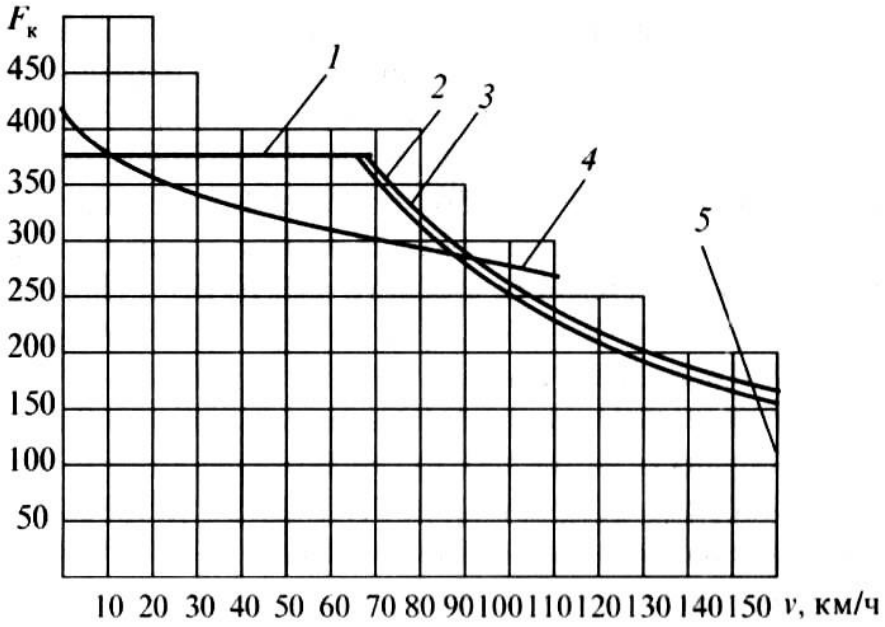


Рис. 7.5. Тяговые характеристики электровоза ЭП10

Следует иметь в виду, что может быть обеспечена работа электровоза в любой точке ниже указанных предельных характеристик, и при боксовании или юзе система управления фиксирует частоту питания АТД, обеспечивая высокую жесткость, не давая развиться избыточному проскальзыванию.

Последние положения можно проиллюстрировать по рис. 14.2, б. Пусть система управления реализует тяговую характеристику b и в рассматриваемый момент находится в точке $F_{кд1}$ при v_1. При нормальном сцеплении разгон будет продолжаться по характеристике b. Однако при срабатывании датчика боксования частота фиксируется на уровне f_1□ и двигатель работает по естественной характеристике *1'*. Рабочая точка b смещается вниз с быстрым сбросом силы тяги, что гарантирует прекращение боксования. После этого можно снова выйти на рабочую характеристику b или на менее интенсивную тяговую характеристику, например a.

Системы тягового электропривода по рис. 14.1 допускают перевод тягового двигателя в режим рекуперации, для чего нужно понизить частоту и, уменьшив скольжение s, перевести рабочую точку на нижнюю часть характеристики M(s) по рис. 14.2, а. В принципе возможна реализация тормозных характеристик $B_{тр}(v)$ той формы, что и тяговые $F_к(v)$. Но у мощных электровозов тормозные силы обычно снижают в 1,5…1,8 раз из-за возможности выдавливания вагона при сжатии состава.

14.3. Характеристики электроподвижного состава с вентильными

тяговыми двигателями

Идея использования вентильного тягового двигателя на электровозах была высказана еще в 30-е годы прошлого века профессором Б.Н. Тихменевым. Затем была развита и практически воплощена в электровозах ВЛ80В и ЭП200 его учениками, среди которых наиболее фундаментальные проработки выполнены профессором В.А. Кучумовым. Зарубежные электровозостроительные компании, например Французская фирма «Альстом», в 1960-1970 гг. активно включились в разработку вентильных двигателей и на их основе были созданы тяговые электроприводы для электровозов и высокоскоростных электропоездов ICE.

Первоначальный интерес к вентильному двигателю объяснялся тем, что его характеристики полностью идентичны привычному для тяги двигателю постоянного тока, а преобразовательная система, обеспечивающая электропитание этого двигателя, значительно проще преобразователей электроэнергии, необходимых на ЭПС постоянного и переменного тока для питания асинхронных двигателей.

Однако по мере развития, как преобразователей, так и систем регулирования, в том числе с микропроцессорными устройствами задания рабочих режимов, за рубежом интерес к вентильному двигателю упал, и ведущие фирмы сконцентрировали свое внимание на приводе с асинхронными тяговыми двигателями.

Тем не менее, в условиях отечественных железных дорог окончательное решение вопроса о выборе типа двигателя еще не может быть четко сформулировано. В том числе и коллекторные двигатели постоянного и пульсирующего тока запланированы на электровозах и электропоездах утвержденного типажного ряда, который фактически является основой технического задания ОАО «РЖД» предприятиям транспортного машиностроения.

Поэтому тщательный анализ показателей электровозов с вентильными двигателями, особенностей формирования их тяговых и тормозных характеристик насущно необходим для специалистов локомотивного хозяйства.

Вентильный двигатель можно рассматривать с двух точек зрения:

- как классическую синхронную машину переменного трехфазного (или шестифазного) исполнения, у которой силовая обмотка расположена на статоре и содержит явно выраженные полюса. Обмотка возбуждения расположена на роторе и является распределенной; для ее питания (не более 4…5 % номинальной мощности двигателя) должны быть предусмотрены контактные кольца (как у асинхронных электромашин с фазным ротором). Кроме того, на роторе у вентильного двигателя должна быть предусмотрена не запитанная демпферная обмотка для сглаживания пульсаций вращающего момента;

- с другой стороны, вентильный двигатель можно рассматривать как классическую машину постоянного тока, у которой коллектор пластинчатого типа заменен полупроводниковым коммутатором на тиристорах, который переключает секции якорной обмотки в функции прохода ими полюсных делений обмотки возбуждения, размещенной на роторе. Для выполнения этого условия в вентильном двигателе необходим высокоточный датчик угла поворота, в соответствии, с показаниями которого регулируется частота переключения фаз статорной обмотки вентильного двигателя. Наличие обмотки возбуждения на роторе, питаемой через контактные кольца и датчика угла поворота ротора вентильного двигателя, в соответствии, с показаниями которого осуществляется управление преобразователем, питающим вентильный двигатель, не представляют собой столь существенные недостатки.

Поэтому идея реализации электровоза с вентильными тяговыми двигателями в известной мере превалирует в отечественном локомотивостроении по сравнению с асинхронными, свидетельством чему является выпуск двух электровозов типа ЭП200, и решение руководства железнодорожной отрасли (сначала МПС России и потом ОАО «РЖД») включить эти электровозы в состав перспективного плана создания высокоскоростного пассажирского сообщения на линиях переменного тока, так называемого типажного ряда.

В вентильном двигателе, как и в двигателе постоянного тока, можно применить и последовательное, и независимое возбуждение. Если в процессе работы ток возбуждения сохранять неизменным, то характеристики электровоза с вентильными двигателями будут подобны характеристикам электровоза постоянного тока с тяговыми двигателями независимого возбуждения. Если же ток возбуждения менять в зависимости от тока якоря, то можно получить характеристики, как у ЭПС постоянного тока с последовательным или смешанным возбуждением тяговых двигателей.

Обычно регулируют режим работы вентильного двигателя, изменяя выходное выпрямленное напряжение и реже – магнитного потока двигателя, регулируя ток возбуждения.

Вращающий момент вентильного двигателя имеет пульсации, обусловленные пульсациями выпрямленных напряжения и тока, возникающими при работе преобразователя частоты и фаз (ПЧФ). Пульсации тока оказывают мешающее влияние на устройства связи, СЦБ, снижают коэффициент мощности ЭПС, увеличивают потери энергии в вентильном двигателе и затрудняют коммутацию тиристоров. Для снижения их в цепь двигателя вводят сглаживающие реакторы (СР1 – СР4 на рис. 14.6).

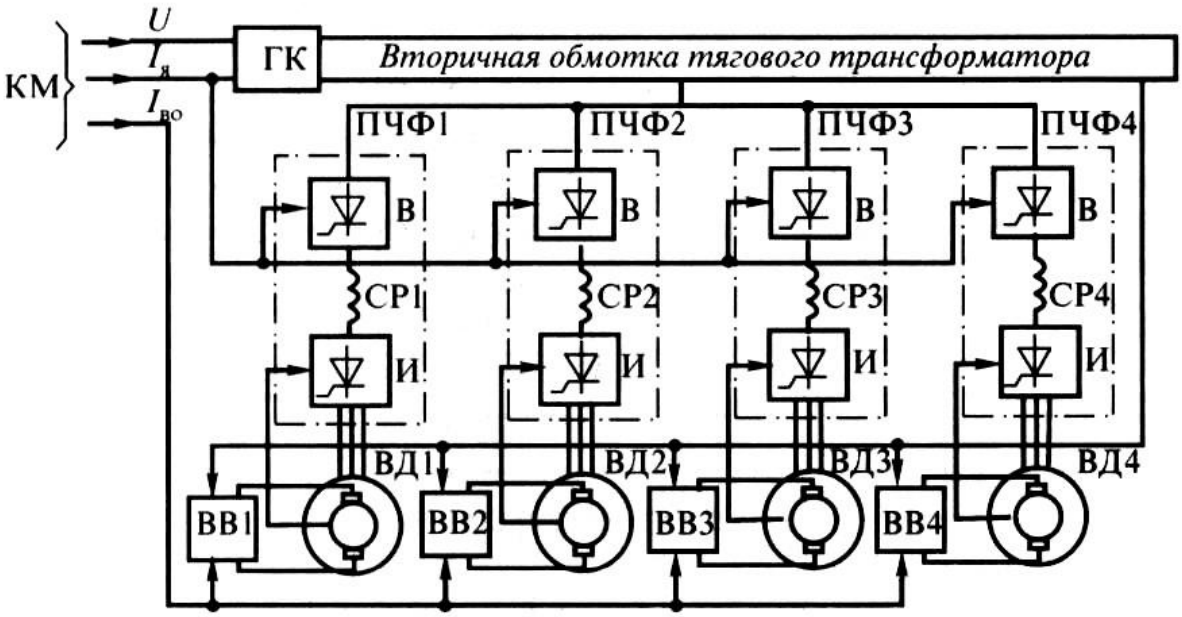


Рис. 14.6. Принципиальная схема одной секции электровоза ВЛ80В

Цепи тяговых двигателей построены по блочному принципу. Каждый блок (а их четыре в одной секции электровоза), состоящий из преобразователя частоты и фаз – ПЧФ, вентильного двигателя (ВД) с выпрямителем (ВВ) для питания его обмотки возбуждения, имеет индивидуальное устройство (И) управления инверторным звеном и регулирования тока возбуждения. Диапазон регулирования частоты питания двигателей от 0 до 130 Гц. Выпрямители имеют общее устройство управления.

Машинист рукояткой контроллера машиниста (КМ) задает напряжение (U) на двигателях через групповой контроллер (ГК), максимальный ток якоря ($I_я$) и начальный ток ($I_{во}$) возбуждения. Регулирование инверторных звеньев ПЧФ осуществляется автоматически без участия машиниста. При тяговоэнергетических испытаниях электровоза были получены обнадеживающие результаты. Всесторонние исследования электровозов ВЛ80В и ЭП200 продолжаются. Анализ накопленных материалов позволит определить надежность и эффективность работы таких электровозов в различных условиях эксплуатации и перспективы их дальнейшего применения.

Тяговые характеристики $F_к(v)$ электровоза ЭП200, массой 180 т при среднеизношенном диаметре бандажа 1210 мм и напряжении контактной сети 25 кВ приведены на рис. 14.7. На них показаны зоны регулирования 1…4, а так же графики выпрямленного тока в цепи тягового двигателя $I_d(v)$; (в том числе $I_{dч}$ – часового, $I_{dп}$ – продолжительного режима) и ограничения по v_{max}, и сцеплению, рассчитанному по формуле:

4,2

$$\square_к \square 0{,}126 \square \frac{}{30 \square 3\square v} \square 0{,}0001\square v.$$

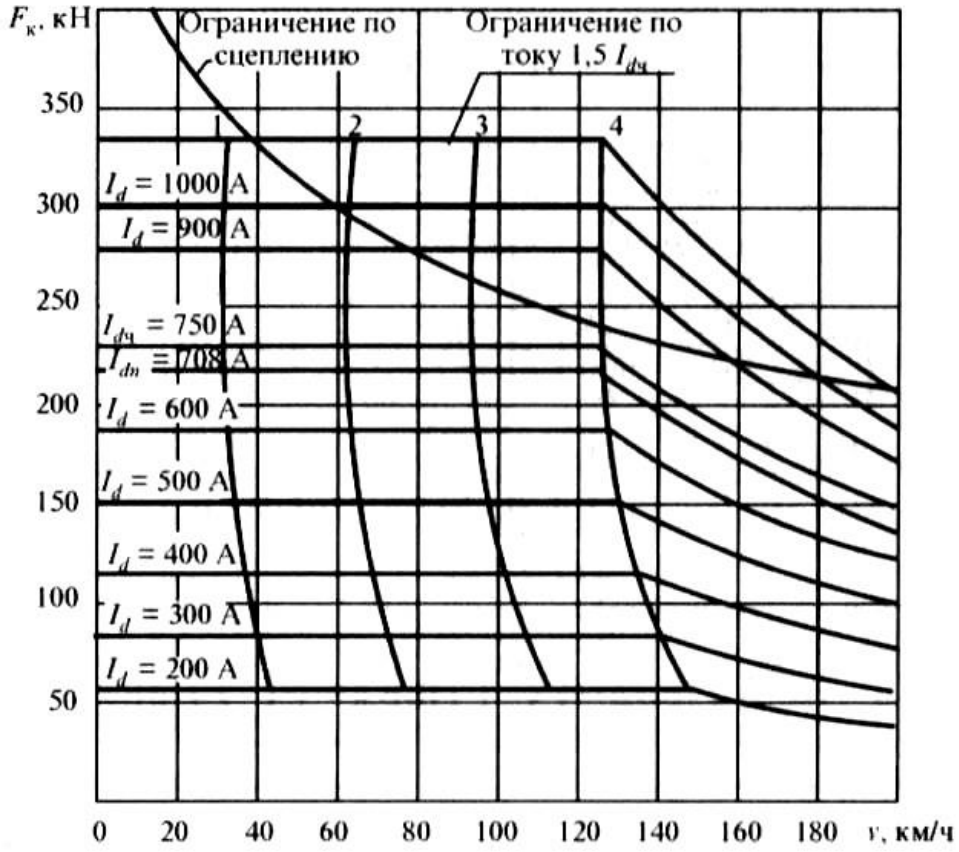


Рис. 14.7. Тяговые характеристики электровоза ЭП200

На рис. 14.8 показаны токовые характеристики электровоза ЭП200 (активной составляющей потребляемого электровозом тока I_{da} в функции скорости v).

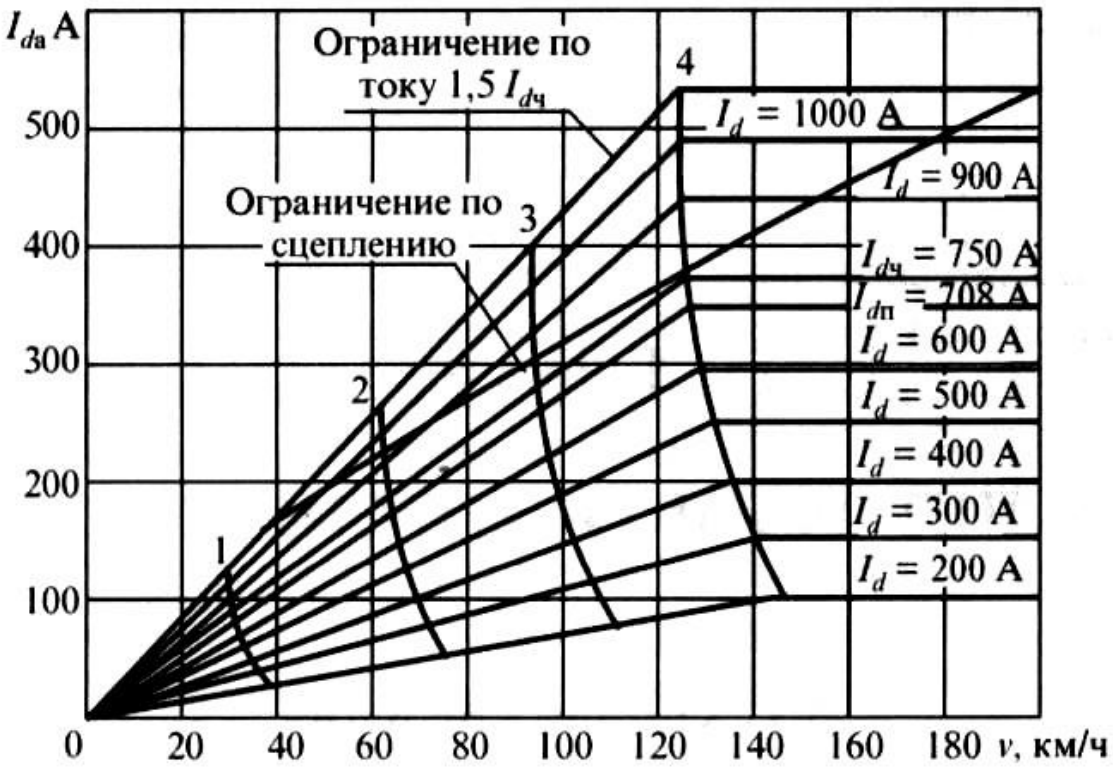


Рис. 14.8. Токовые характеристики электровоза ЭП200

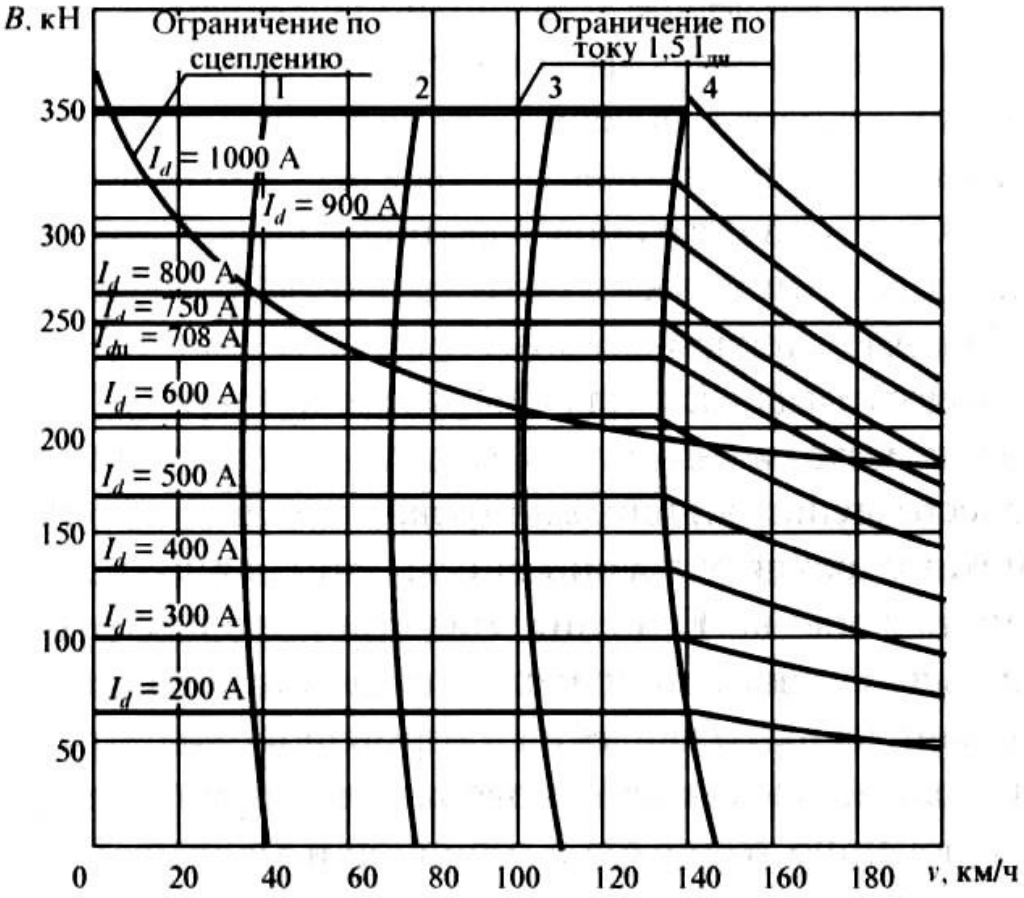


Рис. 14.9. Тормозные характеристики электровоза ЭП200

На рис. 14.9. приведены тормозные характеристики электровоза ЭП200 при рекуперативном торможении и напряжении в контактной сети 25 кВ (обозначения аналогичные рис. 14.7). Ограничение по сцеплению принято при □ □ 0,8□□$_к$.

Тема 15
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ

15.1. Общие сведения. Поскольку тяговые расчеты приходится выполнять довольно часто – перед составлением графиков движения поездов, при проектировании новых линий, при переводе локомотивного парка участков железных дорог на другие виды тяги, при замене локомотивного парка и т.д., общая трудоемкость расчетных работ, затраты времени оказываются значительными. Для снижения трудоемкости на железнодорожном транспорте пытались применять различные механические устройства и аппараты: интеграторы Крылова, Боровского, графоанализатор Бескова и др., однако большого распространения они не получили.

В связи с развитием производства электронных вычислительных машин появилась возможность использовать их для решения уравнения движения поезда, определения температуры тяговых электрических машин и расхода электроэнергии или топлива на тягу поезда.

Вначале были использованы машины непрерывного действия — аналоговые, в которых переменные выражены напряжениями, и решения задач сведены к их соответствующим изменениям. Основным недостатком этих машин является недостаточная точность расчетов. Погрешность может достигать 10 %, поэтому машины непрерывного действия не нашли широкого применения для тяговых расчетов.

В настоящее время в народном хозяйстве, в том числе и в вычислительных центрах железных дорог, используют цифровые ЭВМ или персональные ЭВМ, позволяющие решать большое число задач практически с любой степенью точности. Для этого разрабатывают последовательность выполнения расчетов — алгоритм и программу, по которой вычислительная машина выполняет арифметические и логические операции.

В процессе обучения основам тяги поездов используют вычислительную технику в виде программируемых микрокалькуляторов (ПМК) или персональных компьютеров (ПК), при работе с которыми учащийся должен уяснить суть проводимых расчетов. С этой целью нужно научиться составлять программу решения для ПМК, вводить исходные данные и осмысленно получать результат.

Программа для ПК должна содержать элементы диалогового режима. Такие приемы и применены в этом учебнике.

Для практических расчетов в вычислительных центрах такие программы использовать нецелесообразно из-за сравнительно больших затрат времени. Программы ЭВМ должны предусматривать ввод исходных данных и получение через короткий промежуток времени результатов расчетов.

При решении уравнения движения поезда считают, что равно $120\ \frac{км/ч^2}{Н/кН}$;

время измеряют в минутах (1/60 ч). Тогда, как видно из (8.28), уравнение, решаемое вычислительной машиной, будет иметь более простой вид: $a = \Delta v/\Delta t = 2f_{у\ ср}$.

15.2. Информация, необходимая для тяговых расчетов

Чтобы выполнить тяговые расчеты на ЭВМ, для заданного участка необходимо иметь задание на расчет и подготовить информацию, в которой в определенном порядке излагают все необходимые для расчета данные: сведения об участке, данные локомотива, сведения о составе.

Информация об участке включает в себя следующие сведения:

- профиль пути с указанием длин элементов, знака и крутизны уклона;
- перечень раздельных пунктов с указанием расстояний между ними и расположением входных и выходных стрелок;
- установленные скорости движения на перегонах, станционных путях (главных и боковых), допускаемые скорости в кривых малого радиуса;
- длительные и постоянные предупреждения об ограничении скорости;
- расстановку сигналов автоблокировки (для участков, оборудованных автоблокировкой);
- расположение и длину нейтральных вставок; места проверки действия тормозов на эффективность; тип пути: звеньевой или бесстыковой.

Информация о локомотивах содержит все необходимые данные о локомотивах, используемые в расчетах. Такая информация о локомотивах включает в себя:

- шифр (серию) локомотива или электро- или дизель-поезда;
- расчетную массу локомотива;
- расчетную и конструкционную скорости;

• характеристики сил удельного основного сопротивления движению в режимах тяги и холостого хода (используются формулы (6.10) и (6.2), приведенные в главе "Сопротивление движению поезда");

• расчетный коэффициент сцепления;

• тяговые характеристики локомотива для различных позиций в виде таблиц с указанием координат точек, между которыми кривая может быть заменена прямой линией или в виде полиномов;

• нормы допустимого превышения температуры обмоток тяговых электрических машин.

Кроме того, ***при электрической тяге на постоянном токе*** указывают:

напряжение на токоприемнике;

• токовые характеристики электровоза $I_э(v)$ и тягового электродвигателя $I_д(v)$ для различных позиций в виде таблиц;

• тепловые характеристики тягового электродвигателя при движении под током и в виде таблиц;

• тормозные и токовые характеристики рекуперативного и реостатного торможения при расчетах с использованием электрического торможения.

Кроме приведенной информации ***при электрической тяге на переменном токе*** указывают:

• напряжение на токоприемнике;

• токовые характеристики $I_д(v)$ и $I_{da}(v)$ для различных позиций в виде таблиц;

• тепловые характеристики тягового электродвигателя при движении под током и в виде таблиц;

• тормозные и токовые характеристики рекуперативного и реостатного торможения при расчетах с использованием электрического торможения.

При тепловозной тяге и дизель-поездах, кроме перечисленной информации указывают:

• характеристики расхода топлива G(v) в режиме тяги для различных положений рукоятки контроллера в виде таблиц;

• характеристику расхода топлива g_x на холостом ходу;

• токовые характеристики генераторов $I_г(v)$ для различных положений рукоятки контроллера в виде таблиц;

• тепловые характеристики и $T(I_г)$ генератора или тягового электродвигателя при движении в режиме тяги в виде таблиц и характеристику T_x при $I_г$=

0.

Информация о* составах *содержит все необходимые для тяговых расчетов сведения о всех типах вагонов, используемых на сети железных дорог. Она хранится в вычислительных центрах и состоит из данных о различных типах вагонов и о составах с разным процентным их соотношением. Общая информация о составах включает в себя:

• характеристики удельного основного сопротивления движению для различных типов вагонов (при движении по звеньевому или бесстыковому пути);

• удельное сопротивление при трогании состава;

• характеристики расчетного коэффициента трения тормозных колодок о бандажи для разных типов колодок.

Кроме того, необходима нормативная информация, содержащая:

• таблицы дополнительного сопротивления движению поезда от встречного и бокового ветра и при низких температурах наружного воздуха;

• нормативы регулировочного торможения;

• таблицы снижения горизонтальной линии скорости на затяжных спусках относительно допустимых скоростей vв зависимости от крутизны спуска;

• нормы времени подготовки тормозов к действию;

• нормативы, определяющие порядок проведения проверки тормозов на эффективность: наибольшее снижение скорости поезда в результате пробного торможения, наименьший допустимый уровень скорости перед отпуском тормозов, время отпуска тормозов.

Информация, характеризующая определенный вид состава, встречающегося на сети, и хранящаяся в библиотеке составов, включает в себя:

• значение допустимой скорости по состоянию состава;

• расчетный тормозной коэффициент поезда и степень его использования;

• процентное содержание вагонов (по массе) с различными характеристиками, удельного основного сопротивления движению и указанием массы вагона $m_в$ или массы, приходящейся на ось $m_{во}$;

• тип тормозных колодок, применяемых в составе;

• значение дополнительного сопротивления от подвагонного генератора;

• указание о том, какие из нормативных данных таблиц следует использовать для данного вида состава.

Тяговый расчет на ЭВМ проводят в соответствии с ***заданием,*** в котором указывают шифр участка, библиотечный номер локомотивов (основного и используемого в качестве дополнительной тяги, например, толкача), число секций или локомотивов, процент использования мощности и диапазон, используемых

при расчете позиций, массу состава и его библиотечный номер, показатели, определяющие начало, окончание и условия проведения расчета.

15.3. Порядок расчетов на ЭВМ

Информация об участке, локомотиве и составе, хранящаяся во внешней памяти вводится в машину. Упрощенный алгоритм, показывающий последовательность выполнения расчетов приведен на рисунке 15.1

После ввода исходных данных вычислительная машина рассчитывает для выбранного интервала скорости удельные силы сопротивления движению, удельные силы тяги и удельные тормозные силы. Используя эти силы, машина решает уравнение движения поезда и определяет скорость при вариантах движения с остановками на станциях и безостановочном движении. Полученное значение скорости она сравнивает ее с допустимой.

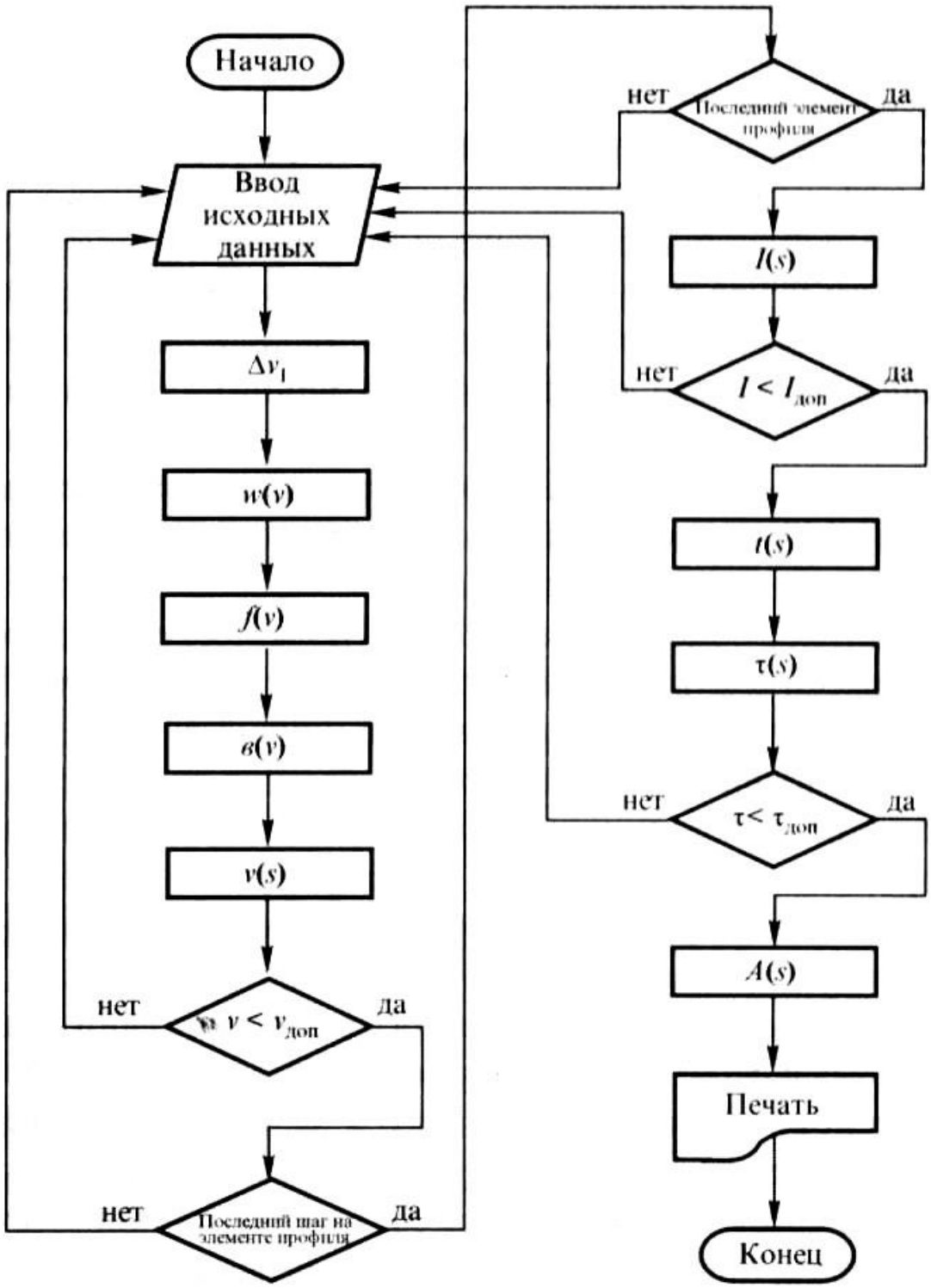


Рис. 15.1. Упрощенный алгоритм тяговых расчетов

Если рассчитанная скорость меньше допустимой, то машина продолжает расчеты. В том случае, когда скорость оказывается выше допустимой, машина изменяет режим движения, обращаясь к исходным данным с тем, чтобы скорость находилась в пределах допустимой. Затем ЭВМ определяет токи, сравнивает их с допустимыми и в случае их превышения выбирает другой режим движения.

При отсутствии превышения тока над допустимым рассчитываются время хода, а затем нагрев тяговых электродвигателей (генераторов). Полученные превышения температур сравниваются с допустимыми, и при благоприятных условиях машина рассчитывает расход энергии или топлива и выдает на печать основные результаты расчетов по каждому шагу расчета или перегону.

ЭВМ в соответствии с разработанной программой решает (интегрирует) уравнение движения поезда при скоростях менее 15...25 км/ч через интервалы скорости (шаги), равные обычно 5 км/ч.

При более высоких скоростях расчет ведут по изменению пути при шаге **Δs,** равном длине каждого элемента профиля пути или его части, используя разложение в ряд Тейлора с сохранением трех его величин:

$$v(s+\Delta s) = v_0 + \frac{dv}{ds}\Delta s + \frac{1}{2}\frac{d^2v}{ds^2}\Delta s^2 .$$

Шаг интегрирования берется равным длине элемента или части его при выполнении необходимой точности расчета (за счет отбрасываемой части разложения в ряд) из условия, км/ч:

$$\frac{d^2v}{ds^2}\Delta s \le 0{,}1 \le 0{,}5.$$

В программе предусматривают следующие режимы движения поезда. Если в начале шага скорость меньше допустимой, то выбирается режим тяги, обеспечивающий наибольшее приращение скорости. В том случае, когда при электрической тяге на данном отрезке пути находится нейтральная вставка, будет выбран режим выбега. По достижении допустимой скорости $v_{доп}$ на элементе профиля проводится выбор из двух смежных режимов (ослабленное и нормальное возбуждение или нормальное возбуждение и выбег и т.д.), которые обеспечат при их чередовании движение со средней скоростью, близкой к допустимой. На "вредном" спуске при увеличении скорости до $v_{доп}$ переходят на выбег, а после достижения скорости $v_{доп}$ применяется регулировочное торможение для движения со средней скоростью $v_{ср} \le v_{доп} \le \Delta v$(Δv см. табл. 8.5). Чередование режимов торможения и выбега дает пилообразную линию изменения скорости **ПЛ–Х/Х** (пила холостого хода).

При использовании рекуперативного или реостатного торможения выбирается характеристика, соответствующая скорости: $v_{ср} = v_{доп} - \Delta v$.

Если за "вредным" спуском следует тяжелый подъем, предполагается, что поезд выходит на него с максимально допустимой скоростью.

Программа предусматривает выдерживание ограничения скорости с учетом длины поезда, проверку тормозов на эффективность. Кроме основного варианта, она выполняет по заданию еще три варианта расчетов, отличающихся предупреждениями о допустимых скоростях.

В том случае, когда возникает недопустимый нагрев обмоток тяговых электродвигателей, применяются более низкие ступени ослабления возбуждения или полное возбуждение на всем перегоне, на котором получено превышение допустимой температуры нагрева, или на его части.

Расчет проводится при любых заданных начальных значениях скорости и превышениях температуры тяговых электродвигателей (генераторов).

Результаты расчета выводятся на печать. Программой предусмотрена печать результатов расчетов по перегонам или по каждому шагу или выдача графиков необходимых параметров в функции пути.

Данные расчетов, выполненные на ЭВМ, используют для разработки графика движения поездов, определения расхода электрической энергии или топлива, оценки использования мощности локомотива и решения других задач, связанных с эксплуатацией локомотивов и движением поездов.

Тема 16
ОПЫТНЫЕ ПОЕЗДКИ И ИСПЫТАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ
16.1. Испытания тяговых электродвигателей и генераторов

Виды испытаний. В соответствии с ГОСТ 2582-81 тяговые электродвигатели, тяговые генераторы и вспомогательные электрические машины проходят приемо-сдаточные, периодические, типовые, квалификационные и ресурсные испытания, при которых проверяют качество изготовления и соответствие основных параметров этих электрических машин предъявляемым к ним требованиям.

Приемо-сдаточным испытаниям подвергают каждую готовую электрическую машину. При контроле тяговых электродвигателей и тяговых генераторов выполняют следующее:

- измеряют сопротивление обмоток постоянному току в практически холодном состоянии;
- испытывают их на нагревание в течение 1 часа или в другом эквивалентном режиме;
- проверяют частоту вращения в обоих направлениях при номинальных напряжении, токах нагрузки и возбуждения для электродвигателей или при

номинальной частоте вращения – номинальное напряжение, соответствующее продолжительному режиму при наименьшем и наибольшем напряжении для тяговых генераторов;

- испытывают машины на повышенную частоту вращения; проверяют электрическую прочность витковой изоляции, биение коллектора, коммутацию;
- измеряют сопротивление изоляции относительно корпуса машины и между обмотками, электрическую прочность изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками; проверяют уровень вибрации.

Периодические испытания проводят не реже одного раза в два года. Кроме объема приемо-сдаточных испытаний, программой периодических испытаний предусматривается:

- определение тока часового или другого кратковременного режима, соответствующего превышению температуры при работе электрической машины в номинальном режиме;
- построение сетки кривых нагревания и охлаждения тяговых электрических машин;
- снятие скоростных характеристик при номинальном напряжении или мощности на выводах двигателей (при заданной зависимости питающего напряжения от тока якоря) и всех рабочих ступенях регулирования возбуждения – для двигателей и нагрузочных характеристик при различных токах нагрузки до 1,5-кратного номинального тока – для генераторов и для двигателей при токах якоря 0; 0,5; 1,0; 1,5 от номинального и токах возбуждения от 0,25 номинального до наибольшего;
- снятие кривых распределения межламельных напряжений по окружности коллектора;
- определение характеристики полного напора охлаждающего воздуха перед входом в камеру машины в зависимости от расхода продуваемого воздуха для машин с независимой вентиляцией;
- определение потерь и КПД; испытания на пуск; испытания на влагостойкость; измерение массы.

Типовые испытания проводят после внесения изменений в конструкцию, рецептуру материалов или технологию изготовления электрических машин. В ходе типовых испытаний тяговых электродвигателей и тяговых генераторов дополнительно к периодическим испытаниям проводят следующее:

- определяют характеристики затухания магнитных потоков главных и добавочных полюсов электрических машин электровозов;
- определяют индуктивности обмоток электрических машин электровозов;

➢ испытывают их на холодостойкость при эксплуатации; проверяют уровень вибрации; проверяют степень защиты.

Квалификационные испытания проводят при выпуске электрических машин новых типов и при освоении их производства другим заводомизготовителем примерно в том же объеме, что и при проведении типовых испытаний.

Ресурсные испытания проводят на электрических машинах установочной серии или после изменения конструкции, материалов, технологии изготовления, влияющих на ресурс. При этих испытаниях проверяют износ трущихся и сопрягаемых поверхностей составных частей машин, определяют их ресурс до восстановительного ремонта, оценивают вибропрочность машин, их несущих элементов и основных сборочных единиц, испытывают на тепловое старение изоляции и определяют ее ресурс.

Порядок проведения испытаний. Тяговые электродвигатели и тяговые генераторы испытывают обычно на стенде методом взаимной нагрузки, при котором две однотипные тяговые машины с одинаковыми номинальными данными соединяют между собой механически и электрически, причем испытуемый электродвигатель М (рис. 16.1) работает в режиме электродвигателя, а второй – Г – в режиме генератора. Метод взаимной нагрузки удобен для испытаний, так как уменьшает расход электрической энергии из сети. Кроме того, не требуются установки для поглощения энергии, вырабатываемой генератором.

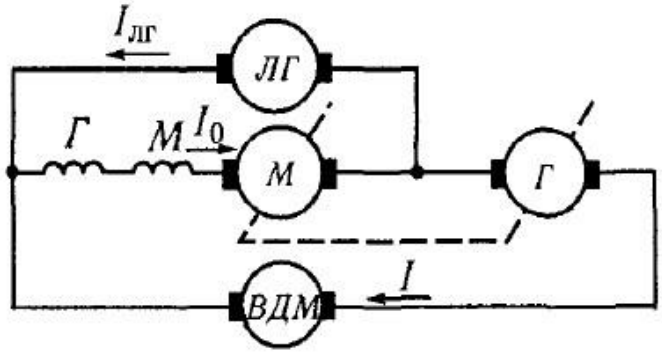


Рис. 16.1. Принципиальная электрическая схема испытания тяговых электродвигателей по методу взаимной нагрузки

В цепь тяговых электродвигателей последовательно включена вольтодобавочная машина ВДМ, а параллельно электродвигателю М и обмоткам возбуждения обоих электродвигателей Г и М – линейный генератор ЛГ. Обе машины (ВДМ и ЛГ) приводятся во вращение не показанными на рисунке электродвигателями. Линейный генератор ЛГ имеет мощность около 8...10 % от мощности испытуемого электродвигателя и рассчитан на напряжение, несколько большее номинального напряжения тягового электродвигателя.

При пуске и разгоне обе тяговые машины питаются от линейного генератора на холостом ходу при невозбужденной вольтодобавочной машине. С увеличением

ЭДС вольтодобавочной машины сумма ЭДС тягового электродвигателя Г и вольтодобавочной машины превысит ЭДС тягового электродвигателя М. Вследствие этого электродвигатель Г перейдет в генераторный режим и будет питать электродвигатель М, который в свою очередь будет вращать якорь электродвигателя Г.

Дальнейшее увеличение ЭДС ВДМ приводит к большей разнице ЭДС тяговых электродвигателей и увеличению тока I, замыкающегося по цепи: обмотки якорей Г, ВДМ, обмотки возбуждения электродвигателей Г и М, обмотка якоря электродвигателя М. Таким образом, изменяя ЭДС ВДМ, можно регулировать нагрузку испытуемого электродвигателя.

ВДМ покрывает электрические потери обоих тяговых электродвигателей. Ее мощность составляет 10...12 % мощности испытуемого объекта. Механические и магнитные потери в обоих тяговых электродвигателях покрывает линейный генератор ЛГ.

Электрические тяговые машины постоянного и пульсирующего тока и тяговые генераторы, рассчитанные на часовую мощность, испытывают на нагревание при этой мощности и номинальных параметрах (напряжение, охлаждение).

Тяговые электродвигатели с независимой вентиляцией испытывают при расходе охлаждающего воздуха, равном 100, 75 и 50 % от номинального. Температуру обмоток определяют по их сопротивлению. Сетку кривых нагревания и охлаждения тяговых электродвигателей снимают поочередно для каждого значения тока в пределах от 40 до 160 % номинального, продувая охлаждающий воздух при независимом охлаждении в объеме 100, 75 и 50 % от номинального и без вентиляции.

Расход, продуваемого через электродвигатель воздуха, проверяют в процессе его испытания на стенде. При этом измерительную трубку с микроманометром устанавливают со стороны коллектора и одновременно измеряют количество, поступающего к нему воздуха. Характеристика зависимости статического напора от количества воздуха необходима для определения объема воздуха, проходящего через электродвигатель, установленный на электровозе.

Чтобы снять скоростные характеристики при номинальном напряжении или мощности, измеряют частоты вращения электродвигателя при токах нагрузки 0; 0,5; 1,0; 1,5 от номинального тока при полном возбуждении и всех рабочих ступенях его ослабления. Для генераторов снимают нагрузочные характеристики при разных токах нагрузки до 1,5 от номинального тока.

Испытания на повышенную частоту вращения якорей тяговых электродвигателей проводят в течение 2 мин на холостом ходу при нагретой машине и скорости, превышающей на 25 % наибольшую частоту вращения. Если

электродвигатели при работе на локомотиве постоянно соединены последовательно, то эту скорость вращения увеличивают до 35 %. После испытаний в электродвигателе не должно быть никаких изменений, влияющих на его работоспособность.

В процессе приемо-сдаточных испытаний коммутацию контролируют в течение 30 секунд при следующих режимах:

- при номинальном напряжении и двойном часовом токе якоря с полным или нормальным возбуждением;
- при наибольшем напряжении, наибольшей частоте и наименьшей степени возбуждения;
- при наибольших напряжениях и пусковом токе и наименьшей степени возбуждения.

Тяговые электродвигатели, питающиеся от главного генератора тепловоза, проверяют в течение 30 с при наибольшем токе якоря и напряжении, определяемом номинальной характеристикой генератора при полном возбуждении; наибольших напряжении и токе, определяемом номинальной характеристикой генератора при наименьшей степени возбуждения. Если в ходе проверок степень искрения не превышает $1^1/_2$ балла, не возник круговой огонь, не было остаточных деформаций и механических повреждений коллектора и щеткодержателей и они пригодны для дальнейшей работы без очистки или какоголибо исправления, то коммутацию машины считают удовлетворительной.

Зону наилучшей (безыскровой) коммутации определяют при неизменной частоте вращения машины и изменении тока в обмотках добавочных полюсов.

Потери и КПД тягового электродвигателя при различных нагрузках определяют, по мощности, потребляемой установкой при использовании метода взаимной нагрузки. Тяговые электродвигатели пульсирующего тока, предназначенные для работы на электроподвижном составе переменного тока со статическими преобразователями, испытывают на постоянном токе. Затем при питании электродвигателей пульсирующим током определяют пульсационные потери при номинальном напряжении и учитывают их в КПД.

Пусковые испытания проводят при наибольших пусковых токах в режиме трогания. Электродвигатель с заторможенным якорем должен выдерживать такой ток в течение 15 секунд четыре раза через пятиминутные интервалы при условии поворота якоря после каждого испытания *на* $^1/_4$ полюсного деления в одном направлении. После испытаний на коллекторе не должно быть следов подгара пластин, которые не устраняются протиранием бензином (хотя и допускаются местные изменения цвета пластин), остаточных деформаций и повреждений, препятствующих дальнейшей его работе.

Работу тяговых электродвигателей проверяют при внезапном исчезновении питающего напряжения в тот момент, когда они потребляют ток, соответствующий часовой мощности, и восстановлении питающего напряжения через 1...1,5 с. Испытания проводят три раза при наибольшем возбуждении и три раза – при наименьшем с интервалом между испытаниями в несколько минут. В момент повторного включения напряжение должно быть не менее 1,2 от номинального, а в течение всего времени переходных процессов – не менее 0,9 номинального. Тяговый двигатель должен выдержать эти испытания без круговых огней, подгораний коллектора, не устраняемых протиранием бензином, и механических неисправностей, препятствующих его дальнейшей эксплуатации.

Влияние вихревых токов в магнитопроводе тяговых электродвигателей электровозов определяют по кривой затухания магнитного потока после отключения тока возбуждения на вращающемся от другого двигателя якоре с частотой 0,8...1,2 от номинальной. Кривую затухания потока снимают осциллографированием напряжения на зажимах электродвигателя при его работе на холостом ходу и независимом возбуждении с токами возбуждения 0,5; 1,0; 1,5 от номинального.

Влияние потока главных полюсов на коммутацию проверяют в генераторном режиме на холостом ходу при четырех – пяти значениях тока возбуждения и частотах вращения, соответствующих рабочему диапазону напряжений.

Индуктивность обмоток определяют по сопротивлению переменной составляющей тока частотой 50 Гц, наложенной на постоянную составляющую.

Уровень вибраций тяговых электродвигателей и испытания на вибропрочность проводят на специальных стендах. При проверках тяговых электродвигателей в особенности под высоким напряжением следует строго выполнять требования техники безопасности.

16.2. Испытания локомотивов

В процессе создания локомотив неоднократно испытывают для проверки соответствия его характеристик и работоспособности узлов предъявленным требованиям. Опытный образец проходит следующие виды испытаний: заводские, тягово-энергетические или тягово-теплотехнические, путевые, динамические, прочностные и эксплуатационные.

При заводских испытаниях отдельные узлы и агрегаты локомотива (тяговые электродвигатели, дизели, главные генераторы, вспомогательные машины, аппараты) испытывают на стендах, проверяют их наладку и проверку прочности. Затем проводят контрольно-ходовые испытания, после которых локомотив работает с поездами установленной массы при эксплуатационном пробеге не менее 5000 км. По окончании этого пробега локомотив может быть передан заказчику для опытной эксплуатации или последующих испытаний.

Тягово-энергетические испытания **электроподвижного состава или** ***тягово-теплотехнические испытания*** **тепловозов** проводят для проверки соответствия основных данных локомотива заданным техническим условиям и для составления тягово-энергетических и тягово-теплотехнических характеристик, а также проверки отдельных агрегатов и аппаратов.

При этих испытаниях выполняют следующие работы:

- определяют или проверяют тяговые характеристики;
- снимают основные характеристики электрического торможения в том случае, когда оно предусмотрено конструкцией электроподвижного состава;
- проверяют распределение токов между параллельными ветвями тяговых электродвигателей;
- определяют коэффициент сцепления колес с рельсами в зависимости от скорости;
- измеряют количество воздуха, проходящего через тяговые электродвигатели, и температуру их обмоток;
- определяют нагревание обмоток вспомогательных машин; определяют нагревание агрегатов преобразовательной установки и оценивают эффективность их охлаждения (на электроподвижном составе переменного тока и на тепловозах с электрической передачей переменно-постоянного тока);
- проверяют эффективность основных систем защиты оборудования локомотивов;
- проверяют нагревание пускового реостата при затяжном пуске и маневровой работе электроподвижного состава постоянного тока;
- оценивают плавность переходов с одной позиции на другую при тяговом режиме и электрическом торможении с исследованием переходных режимов;
- определяют тормозные пути одиночно следующего локомотива с применением прямодействующего тормоза и поездного тормоза;
- контролируют удельное сопротивление при движении под током и без тока;
- определяют или проверяют общий КПД.

Во время ***путевых испытаний*** определяют силы воздействия электроподвижного состава, тепловозов и дизель-поездов на верхнее строение пути. По полученным значениям механических напряжений в рельсах, шпалах, балласте, на прямых и кривых участках устанавливают наибольшие скорости движения по воздействию на путь.

При ***динамических испытаниях*** исследуют ходовые качества, колебания надрессорного строения электроподвижного состава, тепловоза или дизель-поезда,

перемещения букс в раме, колебания и виляния тележек относительно кузова и относительно пути на прямых и кривых участках. Эти данные для локомотива новой серии сравнивают с аналогичными данными ранее выпущенных серий подвижного состава.

При ***испытаниях на прочность*** исследуют напряжения в различных частях рам кузова и тележек в статическом состоянии, в движении и при соударениях с различными скоростями. Напряжения определяют с помощью проволочных датчиков или тензометров. Прочность конструкции оценивают по абсолютным значениям напряжений в узлах нового локомотива.

По результатам тяговых, путевых и динамических испытаний проводят, если это требуется, необходимую доработку конструкции локомотива.

В период ***эксплуатационных испытаний,*** проводимых при пробегах 100... 150 тыс. км, проверяют надежность работы узлов, машин и деталей локомотива, удобство ремонта и обслуживания, износостойкость основных деталей. Кроме того, наблюдают за выполнением графика движения поездов и расходом электроэнергии или топлива.

При эксплуатации локомотива на участке в случае необходимости проводят тягово-эксплуатационные испытания. Их цель — выработка условий для более полного использования мощности и сцепной массы локомотива на данном участке, проверка результатов тяговых расчетов, разработка передовых методов вождения поездов и определение наиболее выгодных технико-эксплуатационных условий движения поезда по участку. Кроме того, сравнивают эксплуатационные качества различных серий локомотивов при работе на данном участке дороги, а также проверяют отдельные усовершенствования подвижного состава и определяют их эффективность.

Тягово-эксплуатационные испытания обычно проводят для определения масс поездов, установления критических масс, оценки расхода энергии или топлива и выбора оптимальных режимов вождения поездов, проверки времени хода, оценки использования сцепной массы электровоза., В ходе их контролируют нагревание тяговых электродвигателей или генераторов и проверяют работу различного оборудования локомотивов. Обычно поездкам предшествуют технические расчеты, результаты которых проверяют при испытаниях. Перед началом проверки тепловозов и дизель-поездов проводят реостатные испытания.

Для испытаний должен быть выбран локомотив, который по своим энергетическим показателям (расходу электроэнергии или топлива), техническому состоянию его агрегатов и узлов, эксплуатационным показателям (среднесуточный пробег, среднесуточная производительность) соответствует среднему состоянию парка локомотивов, работающих на данном участке.

Испытания локомотивов проводят с использованием измерительного вагона, имеющего специальное оборудование и приборы, с помощью которых преобразовывают, измеряют и записывают все необходимые величины, характеризующие тяговые качества: скорость движения, силу тяги, времена хода по каждому перегону, токи и напряжения, расход энергии, количество израсходованного топлива и т.д. Этот вагон ставят между локомотивом и первым вагоном состава и соединяют проводами с локомотивом.

Для определения скорости движения используют датчики частоты вращения колесных пар локомотива или вагона, которые устанавливают в буксах подвижного состава. Силу тяги измеряют электрические динамометры, основанные на принципе изменения сопротивления специальных проволочных датчиков при деформации стенки, на которую их наклеивают. Обычно их ставят на стенки автосцепки и по изменению их сопротивления определяют силу тяги на сцепных приборах подвижного состава. Для измерения токов на локомотиве используют измерительные шунты и другие датчики в цепи постоянного тока, из мерительные трансформаторы тока в цепи переменного тока. Напряжение измеряют, используя делители напряжения постоянного тока или трансформаторы напряжения при переменном токе.

Информация со всех датчиков поступает в бортовую ЭВМ, которая обрабатывает ее и выдает необходимые результаты в виде, удобном для использования. Такая система позволяет оперативно получать результаты при проведении опытных поездок.

Используются также динамометрические вагоны в которых используют гидравлические диафрагменные динамометры, измеряющие давление жидкости, заключенной в закрытом объеме под диафрагмой, при изменении нагрузки, прикладываемой к диафрагме от автосцепных приборов вагона. Давление жидкости под диафрагмой измеряют визуальным и регистрирующим манометрами, установленными на динамометрическом столе внутри вагона, которые градуируют в единицах силы, приложенной к автосцепке.

Остальные параметры передаются на визуальные и регистрирующие приборы, осциллографы и т.д. или фиксируются на ленте динамометрического стола.

Электроизмерительные приборы должны иметь высокий класс точности – 0,2 или 0,5; обеспечивающий погрешность не более 0,2 или 0,5 %. В отдельные моменты ими измеряют ток и напряжение для определения и проверки масштабов записи, а также для уточнения записи на наиболее ответственных участках.

Датчики измерительных приборов локомотива соединяют с вагоном проводами. Часть проводов подключают к цепям управления электроподвижного состава. Это обеспечивает запись вида соединения тяговых электродвигателей,

позиции рукоятки контроллера, включения ослабления возбуждения, тормозов, песочниц, компрессоров и т.п.

Осциллограф фиксирует изменения, происходящие в электрических цепях в течение коротких промежутков времени. При испытаниях обычно осциллографируют моменты перехода с одного соединения тяговых электродвигателей на другое, моменты боксования колесных пар, срабатывания защиты и другие переходные процессы.

При испытаниях тепловозов в динамометрическом вагоне иногда используют пирометрические установки, с помощью которых можно измерить температуры в различных точках и оценить работу дизеля, электрических машин, резисторов, нагревание гидравлической передачи и т.д. При испытаниях тепловозов и дизельпоездов используют также приборы для анализа состава выхлопных газов. Дизельпоезда испытывают без динамометрического вагона. Измерительное оборудование размещают в салоне вагона.

Испытания подразделяют на два этапа – стационарные и опытные поездки.

При ***стационарных испытаниях*** измеряют сопротивления обмоток тяговых двигателей, резисторов ослабления возбуждения, переходных и в цепях вспомогательных машин, индуктивных шунтов, а также пускового реостата электроподвижного состава постоянного тока.

Сопротивление обмоток тяговых электродвигателей и генераторов измеряют компенсационным методом или методом амперметра – вольтметра.

При первом методе обмотки тяговых электродвигателей или главного генератора подсоединяют к специальной аккумуляторной батарее через реостат R. Изменяя его сопротивление, устанавливают ток в цепи около 0,5...1,0 А. Компенсационный потенциометр включают параллельно измеряемой обмотке. По значению компенсационной ЭДС потенциометра определяют падение напряжения на обмотке. Зная ток в цепи и падение напряжения, определяют сопротивление обмотки.

В методе амперметра – вольтметра используют тяговый ток, не превышающий 0,25 от номинального. Чтобы локомотив не двигался, его затормаживают прямодействующим тормозом и измеряют падение напряжения. Для повышения точности измерений применяют приборы и измерительные шунты класса точности 0,2 или 0,5; а измерения проводят быстро (не более 10 с на каждый отсчет).

При измерении сопротивления якоря вольтметр, подсоединенный к двум щеткодержателям, замеряет не только падение напряжения в обмотках якоря, но и падение напряжения в переходном контакте между щетками и коллекторными пластинами, вследствие чего искажалось бы действительное сопротивление обмотки якоря. Чтобы исключить переходное сопротивление, в щеткодержатель устанавливают специальные опиленные по ширине щетки 6 (рис.16.2). На место отпиленной части щетки ставят изоляционную обойму 3, приклеенную к щетке 6 или скрепленную с ней шпильками 5. Внутрь обоймы 3 вставляют измерительную угольную щетку 1, которую пружина 2 прижимает к коллектору. К этой щетке и подсоединяют через выводной конец 4 провод к измерительным приборам. На электрическую машину ставят две такие обоймы с измерительными щетками – по одной в щеткодержатель.

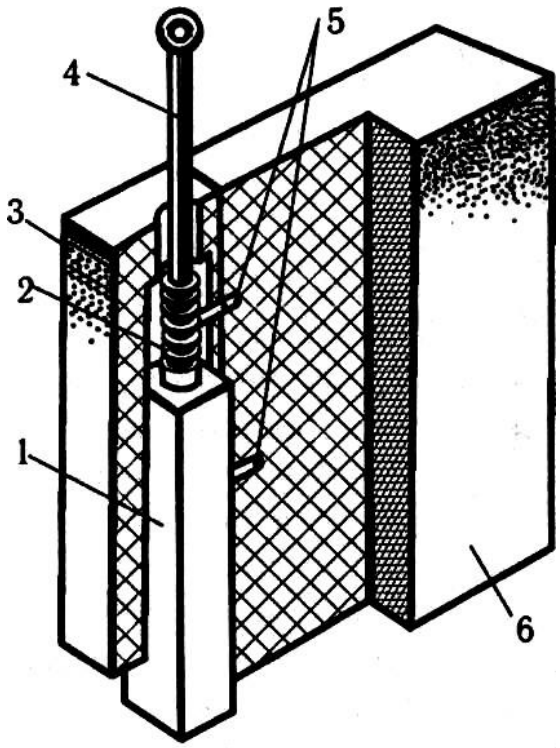


Рис. 16.2. Опиленная щетка и обойма с измерительной щеткой

При контроле сопротивления обмоток тяговых электродвигателей токи и падения напряжения измеряют трижды с интервалами до 10 с. Затем ток выключают, тормоз отпускают и продвигают локомотив на несколько сантиметров. В новом положении коллектора снова трижды измеряют ток и падение напряжения. Всего проверяют не менее трех циклов таких измерений. Полученные значения сопротивлений не должны отличаться более, чем на ± 1 % от среднего значения.

Перед измерением сопротивления обмоток тяговых электродвигателей и генераторов в холодном состоянии локомотив должен отстаиваться в депо при закрытых воротах не менее одних суток при температуре наружного воздуха выше +10 °С и не менее двух суток – при более низких температурах. За время отстоя снимают график температуры воздуха в депо во времени, чтобы определить среднюю температуру электродвигателей перед замером сопротивления.

Кроме того, температуру обмоток контролируют по термометру, измеряющему температуру коллекторов в течение 30...40 мин перед измерением сопротивления обмоток. Расхождение температур не должно превышать 2 °С.

На электровозах и тепловозах проверяют также распределение охлаждающего воздуха между тяговыми электродвигателями. В процессе стационарных испытаний исследуют характеристики отдельных аппаратов и вспомогательных машин и мегаомметром измеряют сопротивление изоляции. Перед поездкой проверяют также последовательность срабатывания аппаратов при перемещении рукоятки контроллера машиниста (проверка секвенции).

При стационарных испытаниях тепловозы проходят реостатные испытания. В ходе их дизель-генераторная установка нагружается на водяной реостат или в последнее время на инверторный преобразователь, отдающий энергию генератора в сеть. Обычно реостатным испытаниям подвергают тепловоз, уже соединенный с динамометрическим вагоном. При этом осматривают все агрегаты и прослушивают их работу на различных нагрузках, а также определяют мощности, давления сжатия и максимальные давления сгорания в цилиндрах, температуры выхлопных газов в цилиндрах, проверяют, настраивают и регулируют внешние характеристики генераторов.

В опытных поездках измеряют силу тяги, скорость, отметки времени, режимы, проходимые километры и т.д. Информацию передают в бортовую ЭВМ и получают все основные результаты. Кроме того, регистрируют электроизмерительными приборами напряжения, токи, и т.д. На электроподвижном составе силу тяги можно определить по току $I_д$ и электротяговым характеристикам и сверить с зарегистрированными на автосцепке (с учетом сопротивления движению электровоза). В случае расхождения сил тяги выясняют причины.

Для оценки силы тяги токи тяговых электродвигателей иногда записывают непрерывно на ленту осциллографа при медленном ее движении или регистрируют на ленты многоканальных самопишущих приборов.

Нагрев обмоток тяговых электродвигателей определяют по изменению их электрического сопротивления. Сопротивление обмоток в нагретом состоянии $r_н$ измеряют теми же методами, что и в холодном состоянии. Температуру обмоток в нагретом состоянии $t_н$, °С, определяют по формуле: $t_н = \frac{r_н}{r_х}(235 + t_х) - 235$; (16.1)

превышение температуры –

$$\tau = t_н - t_{нв}, \ ^oC \qquad (16.2)$$

При работе локомотива сопротивления обмоток главных и дополнительных полюсов можно измерить при движении под нагрузкой. Рабочий ток катушек используют в качестве измерительного тока. Сопротивление обмотки якоря измеряют после остановки поезда, так как при движении в ней наводится ЭДС, не

позволяющая определить падение напряжения. Места остановки поезда устанавливают заранее после тяжелых подъемов, где тяговые электродвигатели работали с большими нагрузками.

Поскольку при пневматическом торможении ток через обмотки электродвигателей не проходит, и они несколько охлаждаются, поезд останавливают полным служебным торможением с использованием вспомогательного тормоза локомотива, не выключая мотор-вентиляторы. После остановки поезда по сигналу измеряют сопротивление обмотки якоря, а также температуру окружающего воздуха. Снижение температуры обмотки в период торможения поезда определяют по кривым охлаждения, измерив, время от выключения тока до измерения сопротивления.

Тормозные пути одиночно следующего локомотива определяют по записи расстояния от момента применения тормозов до остановки.

Для определения нагрева резисторов, а также пускового реостата при разгоне и маневрах ЭПС постоянного тока в их секции закладывают термопары. Проводя испытания с различными токами и разной продолжительностью разгона и измеряя температуру секций, определяют степень нагрева различных секций пускового реостата.

Защиту на локомотивах испытывают при искусственно создаваемых отклонениях от нормального режима работы оборудования: коротких замыканиях, перегрузках, боксовании и т.д.

По полученным результатам оценивают экономичность режимов определяют эффективность использования локомотивов или соответствие его характеристик предъявляемым требованиям.

При отсутствии бортовой ЭВМ ***обработка материалов испытаний*** начинается с расшифровки записей, регистрирующих приборов и осциллограмм. После этого сравнивают записанные на ленту величины с контрольными измерениями по приборам или величины, измеренные различными приборами, и т.д.

Испытания электропоездов проводят обычно без динамометрического вагона. Силу тяги определяют по току $I_д$ с использованием электротяговых характеристик электродвигателей. Все необходимые записи получают с регистрирующих приборов и осциллографа, установленных внутри вагона. Результаты испытаний электропоездов обрабатывают так же, как и при испытаниях локомотивов с динамометрическим вагоном.

При проверках локомотивов и электропоездов нужно иметь в виду, что отдельные цепи находятся под высоким напряжением. Поэтому следует строго соблюдать требования техники безопасности.

16.3. Опытные поездки при тягово-эксплуатационных испытаниях локомотивов

Характер опытных поездок, а также измерения и регистрация параметров зависят от тех целей и задач, которые ставят перед испытателями. При проверке времен хода, расхода электрической энергии или топлива, норм масс и критических масс поездов, использования мощности на данном участке регистрируют: силу тяги, скорость движения, напряжение на токоприемнике электровоза или главного генератора тепловоза, общий ток электровоза или главного генератора тепловоза мощности и расход электроэнергии или топлива. Наносят также позиции контроллера машиниста или главного контроллера, отмечают включение ступеней ослабления возбуждения, срабатывание реле боксования и песочниц, показания АЛСН, фиксируют время, путь, прохождение станций. При необходимости включают визуальные и регистрирующие измерительные приборы и осциллографируют токи тяговых электродвигателей.

В случае проверки времен хода или использования мощности опытные поездки выполняют с поездами установленной массы, регистрируя отмеченные основные величины.

Перед этими испытаниями, а также испытаниями по проверке расхода электроэнергии или топлива на тягу поездов анализируют скоростемерные ленты, а если необходимо, то выполняют тяговые расчеты. Результаты первых опытных поездок сравнивают с расчетными или заданными временами хода, расходом электроэнергии или топлива, нагревом обмоток. Выявленные расхождения тщательно анализируют, находят причины их появления и устраняют, а затем проверяют их при последующих опытных поездках. При измерении температур обмоток заранее намечают места остановок поезда, в которых (по расчетам) нагрев будет наибольшим.

В результате таких испытаний устанавливают наиболее целесообразные скорости движения поездов по каждому перегону и соответствующие им времена хода при наиболее экономичной работе локомотива. В дальнейшем их используют при разработке графика движения поездов. Разрабатывают также нормы расхода электроэнергии или топлива на тягу поездов (при различных поездах и типах составов) и оценивают использование мощности локомотива. Материалы испытаний используют также для расчетов при увеличении скоростей движения или повышении масс поездов на участке.

В ходе опытных поездок по проверке норм масс в случае ее ограничения сцеплением колес с рельсами большее внимание уделяют повышению точности измерения силы тяги на ободах колес, регистрации работы песочниц (которые перед поездками тщательно регулируют), а также записи атмосферных условий.

Наиболее ответственными испытаниями локомотивов в эксплуатации являются опытные поездки для определения критических масс поездов. Для их проведения выбирают электровоз или тепловоз, техническое состояние которого соответствует среднему состоянию всего приписанного к депо парка локомотивов. Выбранный локомотив должен иметь средний прокат бандажей не более 5 мм и нормальную вентиляцию электрических машин.

Составы выбирают с определенными грузами, характерными для данного участка, тщательно проверяют типы вагонов, их тару и массу груза в каждом вагоне по натурным листам. Фиксируют атмосферные условия (температуру, дождь, снег, иней, изморозь, росу, туман и т.д.), от которых зависит сцепление колес с рельсами. Проверяют и регулируют песочницы.

Для оценки процессов боксования колесных пар на наиболее тяжелых участках измеряют токи всех параллельных ветвей тяговых электродвигателей электровозов постоянного тока, средние токи тяговых электродвигателей каждой тележки электровозов переменного тока и токи главного генератора, а также первого и четвертого по ходу тяговых электродвигателей обеих секций тепловоза.

При испытаниях используют режим движения в соответствии с режимными картами или принятыми на участке приемами управления локомотивами. При подходе к наиболее тяжелым скоростным подъемам должна использоваться наибольшая ступень регулирования скорости, а при выходе с него скорость не должна быть меньше допустимой ПТР. При опытных поездках измеряют также температуру обмоток тяговых электрических машин.

По результатам испытаний обосновывают и устанавливают наибольшие или критические нормы масс поездов для различных условий движения.

Тема 17 РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА

17.1. Условия эксплуатации подвижного состава

Расчетный режим движения поезда на конкретном тяговом плече определяется нормой массы состава или весовой нормой и графиком движения. Норма массы состава не всегда соответствует предельному значению этой массы, установленной путем тягового расчета на основе ограничений по сцеплению или по нагреву тяговых двигателей (критической массе). В реальных условиях руководство железной дороги обычно устанавливает весовую норму меньше критической массы поезда. При этом исходят из следующих соображений.

Во-первых, влияние степени использования пропускной способности лимитирующего участка на весовую норму проявляется в том, что снижение скорости поезда на подъеме ведет к задержке следующих за ним поездов. Это влияние проявляется тем в большей степени, чем меньше интервал попутного следования поездов, определяемый графиком движения. При достижении

минимального значения этого интервала достигается предел пропускной способности тягового плеча. Ниже более подробно рассмотрено влияние степени использования пропускной способности и нормы массы поезда.

Во-вторых, принимают во внимание необходимость унифицирования весовых норм по целым направлениям, что упрощает эксплуатационную работу при пропуске транзитных поездов.

При определении массы грузового поезда по условию сцепления колес локомотива с рельсами предполагается, что частота движения поездов по лимитирующему перегону, а следовательно, и использование его пропускной способности невелики: примерно 20…30 %. Поэтому снижение скорости данного поезда на этом перегоне, т.е. на лимитирующих его элементах, не вызывает задержки поездов, следующих за ним.

Иные условия движения поездов по лимитирующему перегону существуют при почти полном (75…80 %) использовании его пропускной способности: малейшее снижение установленной графиком скорости движения поезда сразу вызывает задержку в движении всех следующих за ним поездов и сбой в работе участка.

Во избежание этого, в условиях почти полного использования пропускной способности, массу поезда целесообразно определять не по максимально возможному коэффициенту сцепления, а по коэффициенту сцепления, соответствующему скорости движения, заранее установленной на основании заданного интервала попутного следования поездов, определяющего требуемую пропускную способность лимитирующего перегона.

Так как интервал попутного следования поездов (межпоездной интервал) рассчитывают при составлении графика из условий движения поезда по зеленым огням автоблокировки, скорость, соответствующая полному использованию пропускной способности, всегда выше скорости, соответствующей максимально возможному весу поезда и соответственно максимальному коэффициенту сцепления. Значит, при полном использовании пропускной способности значение фактически реализуемого коэффициента сцепления будет меньше максимально возможного и, следовательно, масса поезда будет меньше расчетной, установленной по максимально возможному коэффициенту сцепления. Возникающее при этом недоиспользование тяговых и сцепных свойств электровоза на лимитирующем перегоне перекрывается увеличением размеров перевозок за счет более полного использования пропускной способности, т.е. за счет большего количества поездов.

Например, в условиях эксплуатации электровозов ВЛ10 на Южно-Уральской дороге при движении по зеленым огням, определяющим межпоездной интервал, равный 7 минут, расчетный коэффициент сцепления не должен превышать 0,22.

Повышение коэффициента сцепления до 0,26; с целью увеличения массы поезда, вызывает снижение скорости движения и увеличивает интервал попутного следования поездов до 10 минут, что приводит к снижению размера перевозок. Во избежание этого массы грузовых поездов на участках движения, где почти полностью используется пропускная способность, целесообразно устанавливать исходя из заданного межпоездного интервала движения.

При указанных расчетах следует учитывать и уровень напряжения в тяговой сети. Для одной и той же позиции контроллера машиниста можно считать, что установившаяся скорость движения поезда данной массы на данном элементе профиля пропорциональна указанному напряжению.

Дополнительные расчеты режима движения поезда и степени использования пропускной способности при изменениях напряжения в контактной сети весьма трудны из-за влияния многих факторов и их взаимной связи. Точность результатов расчетов, проведенных при условии постоянства среднего напряжения в контактной сети, получается приемлемой только в том случае, если оно мало отличается от фактического среднего значения напряжения на токоприемнике. Если же напряжение в контактной сети или на отдельных ее участках значительно отличается от номинального, то выполняют новый расчет при этом фактическом напряжении. При движении нескольких поездов по участку задача сильно осложняется из-за большого числа возможных вариантов расположения поездов и их нагрузок на тяговую сеть, меняющихся во времени. В таком случае действительное значение напряжения в контактной сети учитывают ***методом последовательных приближений.***

Сущность этого метода заключается в следующем.

По построенным кривым движения при принятом расчетном напряжении контактной сети определяют средние потери напряжения на отдельных перегонах (или участках), на которые подразделяют тяговое плечо. Д ля каждого перегона строят при вновь найденных значениях средних напряжений кривые движения. По этим кривым для тех же перегонов снова выполняют расчет тяговой сети, опять определяют средние значения напряжения и т.д. Это продолжают до тех пор, пока среднее напряжение на любом перегоне при последующем расчете не окажется близким к предыдущему его значению. При условии совпадения значений этих напряжений рассчитывают фактическую пропускную способность.

Метод применим для системы как постоянного, так и переменного тока, однако он весьма трудоемок. Расчет значительно облегчается при использовании компьютерного имитационного моделирования.

На дорогах переменного тока приходится считаться с особенностью изменения напряжения в контактной сети, поскольку форма кривой напряжения отличается от синусоиды. Причинами несинусоидальности напряжения является

индуктивное сопротивление самой контактной сети и оборудования ЭПС, влитие несинусоидального напряжения системы электроснабжения и систем преобразования напряжения на электровозе (диодный или тиристорный выпрямители). При синусоидальном и несинусоидальном напряжении в сети и индуктивном сопротивлении в цепи возникает реактивная составляющая тока и в цепи циркулирует реактивная энергия, которая полезной работы не производит и ухудшает показатели электрической тяги на переменном токе, в частности, создавая дополнительное падение напряжения в тяговой сети и тем самым понижая напряжение на токоприемнике электровоза.

Реактивная энергия возникает по двум причинам:

- искажение синусоидальной формы напряжения и тока, что оценивают коэффициентом высших гармоник ν;
- отставание синусоиды тока от синусоиды напряжения на угол φ, что оценивается значением cos φ.

В целом качество электроэнергии переменного тока оценивают коэффициентом мощности, равным:

$$\chi = \nu \cdot \cos \varphi \,, \qquad (17.1)$$

который в идеальном случае должен быть равен 1. Для достижения этой цели в тяге переменного тока применяют установки компенсации реактивной мощности. Обычно такие установки (батареи конденсаторов с регулированием емкости) монтируют на тяговых подстанциях. Однако полную компенсацию ($\chi = 1$) можно получить только при наличии компенсирующего устройства непосредственно на электровозе. Это особенно важно для электровозов большой мощности (ВЛ85, ВЛ65, ЭП200, ЭП1, ЭП1М).

К условиям эксплуатации электровозов можно отнести также:

- возможное снижение коэффициента сцепления из-за загрязнения головок рельсов, что не позволяет реализовать расчетное значение коэффициента сцепления (в этом случае в критических ситуациях машинист использует подачу песка в зону контакта колеса и рельса);
- метеорологический фактор: с понижением температуры улучшаются условия охлаждения тяговых двигателей, но одновременно растет сопротивление движению из-за увеличения вязкости смазки в буксах, кроме того, наличие снега, льда, инея на головках рельсов ведет к снижению коэффициента сцепления;
- техническое состояние электровоза, причем любые неисправности ходовой части, как правило, ведут к снижению реализуемых значений коэффициента сцепления. Тяговые и сцепные свойства электровоза существенно ухудшаются при расхождении характеристик колесно-моторных блоков. Поэтому соответствующие допуски жестко нормируются.

17.2. Использование мощности грузовых электровозов

Для каждого тягового плеча устанавливают весовую норму грузового состава. Но реальные массы составов могут существенно отличаться от расчетных, обычно в меньшую сторону, что ведет к недоиспользованию мощности локомотива, а также к росту удельных затрат электроэнергии.

В эксплуатационной практике такую ситуацию принято оценивать коэффициентом использования нормативной массы $m_н$ состава:

$$k = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} m_i}{m_н}; \qquad (17.2)$$

где в числителе просуммированы фактические массы (m_i) всех поездов за рассматриваемый период, например за отчетный месяц, и эта сумма разделена на их количество (n). Таким образом, в числителе получаем среднюю фактическую массу состава.

Показатель (k) оказывает существенное влияние на такие особо важные показатели, как производительность локомотива и локомотивной бригады (при прочих равных условиях эти показатели пропорциональны указанному коэффициенту k). Конкретные значения коэффициента (k) для основных направлений Московской и Октябрьской железных дорог, обслуживаемых 8осными электровозами, составляют 0,55 – 0,6 для груженых направлений, а для направлений, где значительна доля порожних составов, значения коэффициента (k) обычно не превышают 0,3 – 0,35. Имеются объективные ограничения, не позволяющие формировать составы нормативной массы, связанные в основном с длиной приемо-отправочных путей $l_{поп}$ (обычно 750, 1050, 1250 м).

Если обозначить через ($l_в$) расчетную длину условного вагона и составе поезда, а через ($l_л$) – длину локомотива и точность установки поезда 10 м, то предельно возможная масса состава с учетом усредненной по составу осевой массы ($m_{во}$) выражается:

$$m = m_н, \text{ если } m_{во} \geq m_{вог}, \qquad (17.3, а)$$

$$m = \frac{l_{поп} - l_л - 10}{4m_{во}}, \text{ если } m_{во} < m_{вог}. \qquad (17.3,б)$$

$l_в$

В этой формуле граничное значение осевой массы $m_{вог}$ является обобщенной характеристикой вагонопотока, образующего данный поездопоток; оно представляет собой естественное ограничение, не позволяющее при $m_{во} > m_{вог}$ сформировать состав нормативной массы $m_{сн}$, соответствующего тяговым

возможностям конкретного локомотива на данном тяговом плече или унифицированной норме массы:

$$m_{вог} \leq \frac{m_{сн}}{4N_{max}}, \qquad (17.4)$$

где N_{max} – предельно возможное число вагонов в составе, которое вместе с локомотивом может разместиться на станционном приемо-отправочном пути длиной $l_{поп}$, причем

$$N_{max} \leq \frac{l_{поп} - l_{л} - 10}{l_{в}}. \qquad (17.5)$$

Рассмотренные аналитические соотношения иллюстрируются зависимостью массы состава от массы, приходящейся на ось $m_{во}$ (рис. 17.1). Она содержит две характерные зоны. В зоне I действует ограничение по длине станционных путей, т.е. ограничение по максимальному числу вагонов в составе N_{max} (равенством (17.3, а), а в зоне II имеем более благоприятную ситуацию, выражаемую формулой (17.3, б), здесь все поезда могут иметь нормативный вес. Кроме того, в зоне II, особенно в ее правой части, т.е. для больших осевых нагрузок, имеется виртуальная возможность формировать тяжеловесные составы, масса которых превышает норму ($m_c > m_{си}$).

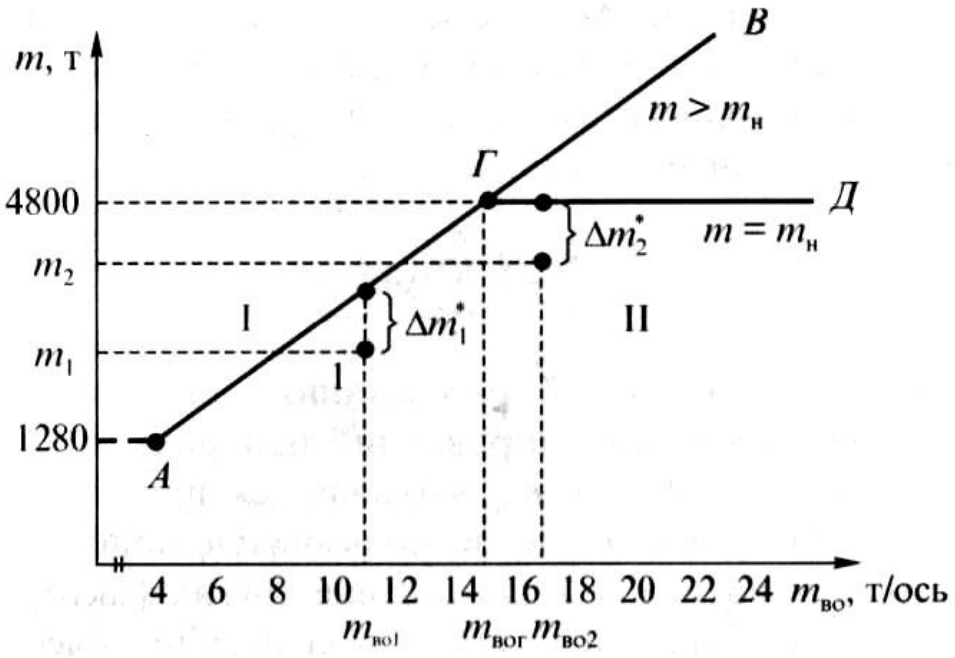
Но и в этом случае не должно быть превышено ограничение по длине приемо-отправочных путей $l_{поп}$, т.е. по числу вагонов N_{max} (прямая ***АГВ*** на рис. 17.1).

Можно считать, что службой локомотивного хозяйства использованы все возможности по увеличению среднего веса поезда, если параметры всех поездов на данном тяговом плече находятся на ломаной линии ***АГД.*** Таким образом, возможности формирования состава осевой массы можно оценить по диаграмме (см. рис. 17.1) отклонением точки ($m_{во1} – m_1$), соответствующей i-му составу, от ограниченной линии ***АГД.***

В зоне I это отклонение в относительных единицах на примере точки 1, т.е. ($m_{во1} – m_1$), вычисляют: $\Delta m_{1*} = \frac{4 m_{во1}}{4 m_{во1} + N_{max}} - \frac{m_1}{4 m_{во1} + N_{max}} = 1 - m_1$; (17.6, а)

а в зоне II на примере точки 2, т.е. ($m_2 \sim m_{во2}$) имеем также в относительных единицах:

$$\Delta m_2^* = \frac{m_н - m_1}{m_н}\left(1 - \frac{m_2}{m_н}\right). \qquad (17.6, б)$$



m

Рис. 17.1. Зависимость предельной массы грузового состава m от осевой массы $m_{во}$

Вычислив отклонение Δm*, по каждому поезду и просуммировав все полученные таким образом отклонения, имеем после усреднения по общему количеству поездов п результирующее фактическое недоиспользование по весу:

$$\Delta m^* = \frac{1}{n}\sum \left(1 - \frac{m_2}{m_{н\,i-1}}\right). \qquad (17.7)$$

Значения этих отклонений, рассчитанные для некоторых наиболее грузонапряженных направлений центрального региона, обычно составляет 5…8 % от $m_н$, что является приемлемым.

Однако рассматриваемое недоиспользование мощности и силы тяги электровоза возможно и по причине других факторов. Установлено, что отклонения значения силы сцепления колес с рельсами от их расчетных значений доходят до ± 50 %. При этом плотность распределения значений силы сцепления может быть представлена в первом приближении нормальным законом.

Что же касается фактических значений удельного сопротивления движению вагонов, их погонной нагрузки в каждом составе, то одни составы имеют

расчетную массу при длине, меньшей длины приемо-отправочных путей станций, другие при максимально возможной длине приемо-отправочных путей не достигают расчетной массы. Распределения их осевых масс $m_{во}$ и массы m можно представить нормальным законом, как это видно из рис. 17.2 и 17.3.

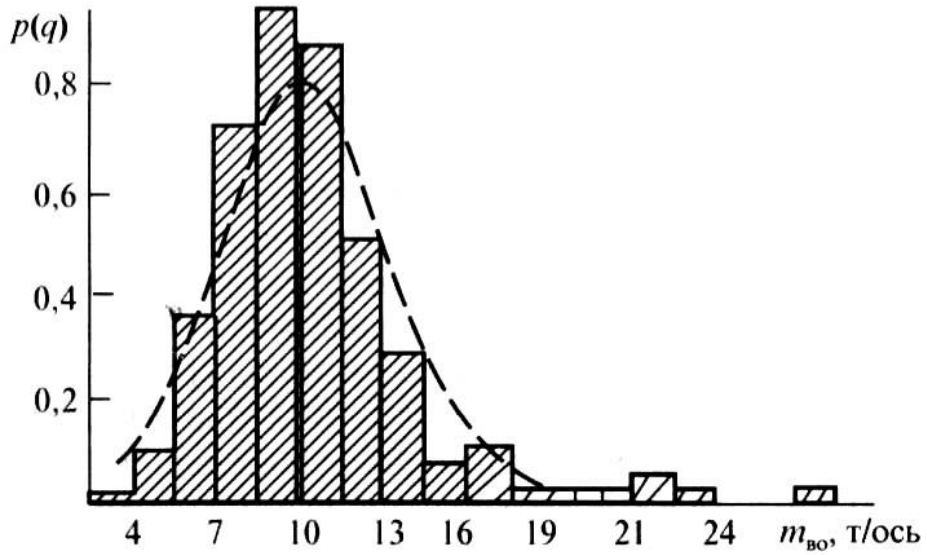


Рис. 17.2. Плотность распределения погонной нагрузки

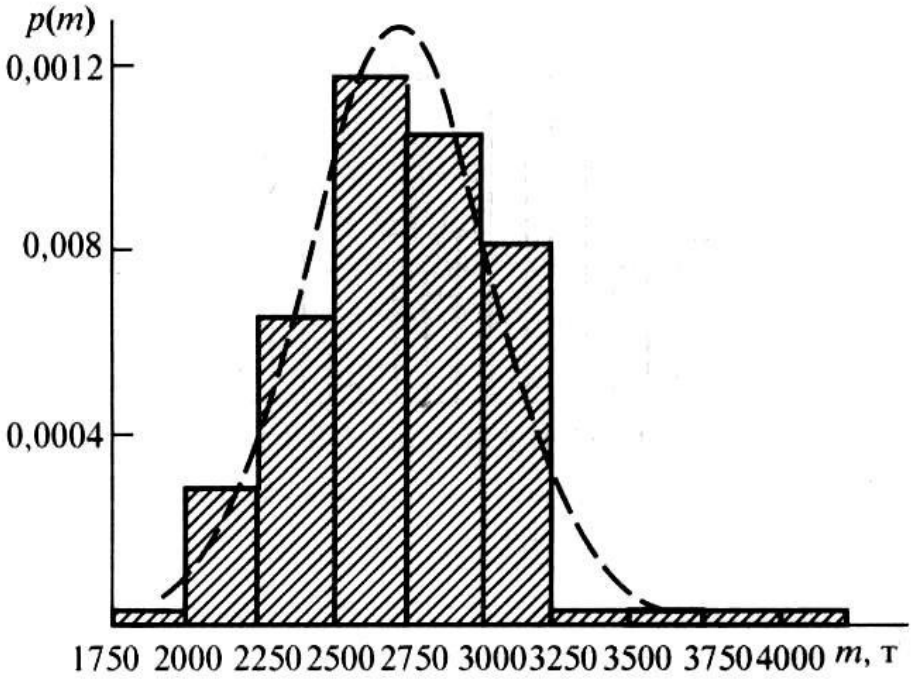


Рис. 16.3. Плотность распределения масс поездов

Там, где поезда повышенной массы имеют заметную долю в общем объеме перевозок, распределение масс поездов и их погонной нагрузки оказывается двухмодальным (рис. 17.4, а), а на особо грузонапряженных – даже трехмодальным (рис. 17.4, б). Аналогичные данные, полученные на многих других

участках, свидетельствуют о случайном значении массы каждого поезда, что в основном определяется случайным характером груза и недоиспользованием номинальной грузоподъемности вагона.

Опираясь на факт случайного разброса масс грузовых поездов, можно прогнозировать вероятность их реализации на данном участке, если определить исходя из условий данного участка параметры законов распределения случайных значений силы электровоза и удельного сопротивления движению составов. В первом приближении, подтвержденном практическими данными, распределения значений как силы сцепления колес с рельсами, так и удельного сопротивления движению электровоза и состава являются нормальными, каждое со своими параметрами. При этом параметрами распределения случайных значений силы сцепления являются ее расчетное (среднее) значение $F_{сцср}$, среднее квадратичное отклонение σ_F и аналогичные значения $w''_{ср}$ и σ_w для удельного основного сопротивления движению.

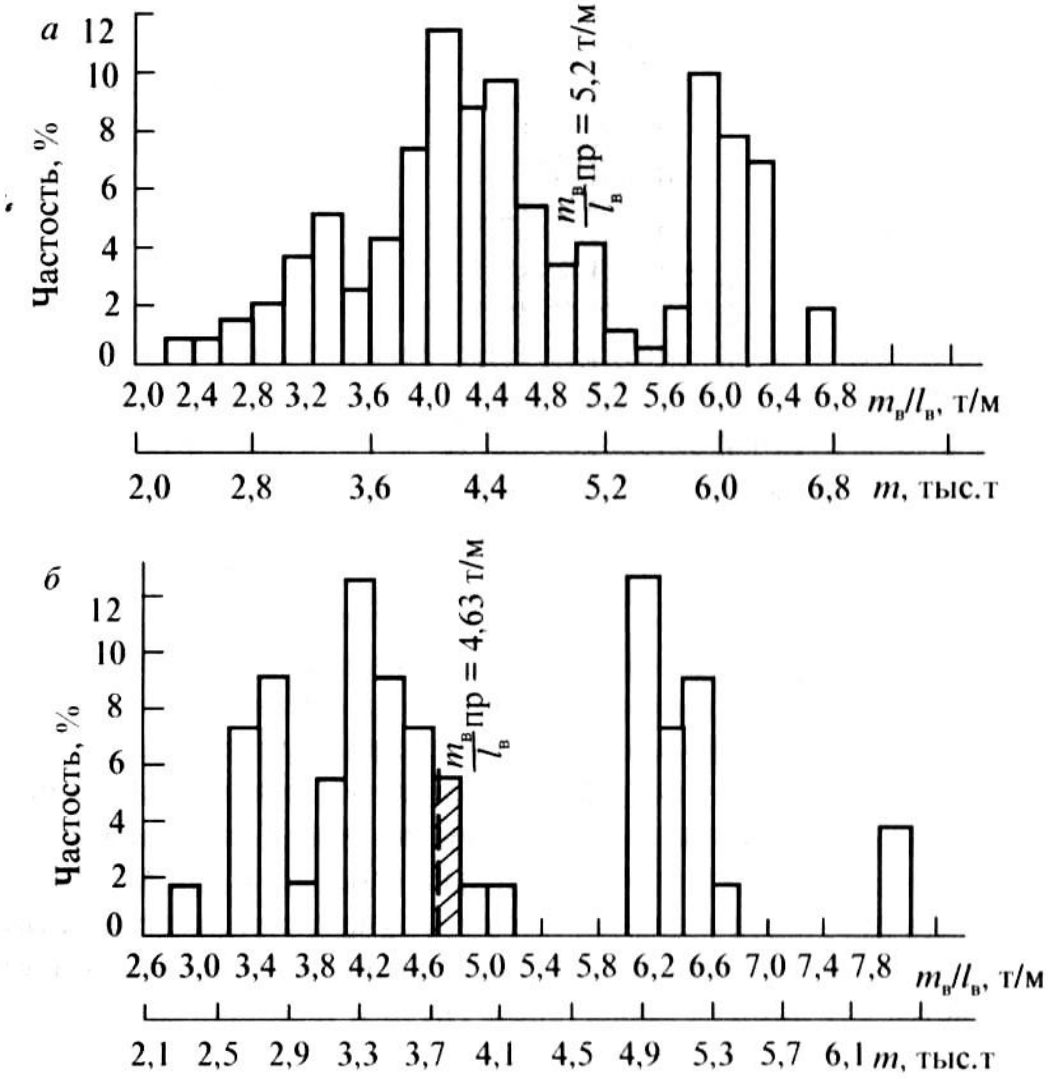


Рис. 17.4. Распределение масс поездов: а – двухмодальное; б – трехмодальное

Согласно сказанному, следует рассматривать значение массы поезда не как отношение двух детерминированных средних величин $F_{сцср}$ и $w''_{ср}$, а как отношение случайного значения силы сцепления $F_{сц}$ к случайному значению удельного сопротивления движению w". В таком случае закон распределения возможных случайных значений массы поезда можно записать так:

$$P\square m\square\square\sqrt{\quad}\ \frac{\quad}{\quad}\ \sqrt{\quad}\ 1\square a\square\ \square 1 m\square_2\square\ B\ A\ \ AB\square_2 C\ ; \qquad (17.8)\ \square e$$

$$1\square\ \square\ \square$$

$$\square\ a\ \square$$

где a – отношение $\frac{\square F}{\square w}$; A, B, C – коэффициенты, каждый из которых есть функция параметров распределения силы тяги, т.е. $F_{сцср}$ и σ_F также $w''_{ср}$ и σ_w.

При этом вероятность реализации значения массы поезда, заключенного в пределах $m_1 – m_2$, равна:

$$P\square m_1\square\ m\ \square\ m_2\square\square\ \square p\square m\square\square dm. \qquad (17.9)$$

$$m_1 \qquad m_2$$

Проанализируем для иллюстрации вышесказанного следующий пример. Расчетное значение силы сцепления электровоза $F_{сцср}$ = 400 кН; среднее квадратическое отклонение σ_F = 10 %, или 40 кН. Расчетное удельное сопротивление движению состава $w_{ср}''$ = 10 Н/кН, его среднее квадратическое значение σ_w = 1 Н/кН.

При этом расчетная (средняя) масса поезда

$$m_{ср}\ \square\ \frac{F^{сццс}}{\square\ \square\ 100}\ \frac{400000}{4000\ т.} \qquad (17.10)\ g\ \square\ w\square_{ср}\square$$

Подставляя теперь в уравнение (17.8) другие значения массы поезда в пределах, например, от 3000 до 5000 т, получим плотности распределения случайных значений масс поездов, представленные в таблице 17.1.

Таблица 17.1

Масса поезда, т	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000

Плотность вероятности $10^{3}/\text{т}$	0,130	0,295	0,510	0,635	0,705	0,572	0,443	0,210	0,120

Полученный график плотности распределения масс поездов представлен на рис. 17.5, из которого видно, какова вероятность появления и реализации любой массы поезда в пределах от 3000 до 5000 т. Например, если масса поезда превышает найденную выше расчетную на 100 т, т.е. составляет 4000 + 100 = 4100 т, то

$$P = \int_{4000}^{4100} p(m)\,dm.$$

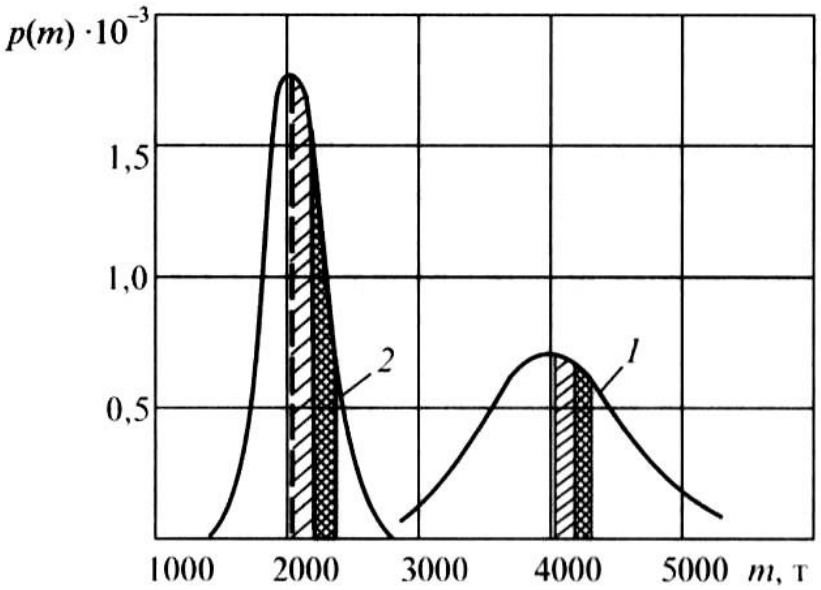


Рис. 17.5. Плотность распределения возможных масс поездов при различных массах поездов: ***1*** *– 4000 т;* ***2*** *– 2000 т*

Значение этого интеграла представлено заштрихованной площадью на рисунке 17.5 справа от оси симметрии кривой **1**. Отношение этой площади к общей площади фигуры составляет примерно 7,5 %. Это значит, что, вероятно, в 7 или 8 поездах из 100 будут реализованы массы поездов 4100 т. Аналогично вычислим плотности распределения других масс поездов, например на 250 тонн больше расчетной (4000 т). Вероятность реализации масс поездов (4250 т) составит примерно 6 %, т.е. в 6 поездах из 100, чему соответствует площадь, имеющая двойную штриховку.

Рассмотрим распределение возможных масс поездов при движении того же электровоза с теми же сцепными свойствами, что и в предыдущем примере ($F_{\text{сц ср}}$

= =400 кН; σ_F = 40 кН), но при следовании по более крутому расчетному подъему, на котором w" = 20 Н/кН. Разброс сопротивления движению примем, как и в предыдущем примере, равным 10 % w", т.е. σ_W = 2 Н/кН.

Расчетную массу поезда определим по уравнению (17.10):

$$m = \frac{400000}{200} = 2000 \text{ т.}$$

Плотность распределения возможных масс поездов, рассчитанная по уравнению (17.8), представлена кривой **2** на рисунке 17.5. На основании этой кривой можно заключить, что, например, вероятность реализации массы поезда на 100 т больше расчетной (m = 2100 т) составляет примерно 16 % (заштрихованная площадь кривой на рис. 17.5). Значит, вероятно, в 16 случаях из 100 будут при расчетной массе 2000 т поезда массой от 2000 до 2100 т; в пределах от 2100 до 2200 т (двойная штриховка около кривой 2 на рис. 17.5) – примерно в 12 случаях из 100 и т.д.

Изложенный метод позволяет наглядно оценить реальные возможности локомотивов, обладающих различными тяговыми свойствами, на основании известных параметров законов распределения силы сцепления локомотива и удельного сопротивления движению состава рассчитать вероятность реализации интересующей нас массы состава на каждом участке движения.

Методы расчета вероятности реализации массы грузовых поездов могут служить основой разработки вариантов возможных как единиц, так и дифференцированных масс поездов, обеспечивающих наилучшие техникоэкономические показатели эксплуатации. Эти методы позволяют выявить экономически оправданные массы грузовых поездов для расчета параллельного графика движения, исходя из фактических условий движения и тяговых свойств электровозов.

Дополнительный разброс фактических значений масс поездов получается по причине действия других ограничений. Сейчас наиболее существенным из них является ограничение по длине станционных путей, что детально рассмотрено выше. В практике возможно использование «жесткого» графика движения, когда состав отправляют с сортировочной станции по фиксированному времени, не ожидая накопления нормативного количества вагонов.

17.3. Тягово-экономические расчеты

Эти расчеты проводятся в разных ситуациях, которые могут быть сведены к следующим типовым вариантам:

1. Проектирование новой железнодорожной линии под заданную перевозочную работу, т.е. пропуск определенного грузооборота (т-км брутто). При этом должна быть выбрана трасса линии (предварительно или в процессе рабочего проектирования линии) с тщательным анализом всех возможных

вариантов. В процессе уточнения трассы линии четко определяется расчетный подъем, поскольку от него зависят весовая норма и провозная способность линии.

Выбор, как самой трассы, так и расчетного подъема особо важен с точки зрения тяги из условия определения критической массы поезда. Эта критическая масса имеет особое значение для реализации провозной способности линии, поскольку по критической массе выбирают весовую норму, учитывая особенности, изложенные в п. 17.1.

2. Электрификация существующей линии, на которой используется автономная тяга. Обычно электрификация сопровождается реконструкцией путевого хозяйства, мостов, удлинением станционных путей, с целью наиболее полного использования возможности электровозов, как по силе тяги, так и по технической скорости. Переход на электрическую тягу позволяет повысить провозную способность линий по сравнению с автономной, т.е. тепловозной тягой, в 3-4 раза для двухпутных линий и в 1,8…2,2 раза для однопутных.

Для электрификации выбирают линии с такой интенсивностью движения, чтобы все капитальные затраты окупились не более, чем за 6,5 лет. В процессе указанного проектирования приходится выполнять многовариантные тяговые расчеты, варьируя массу состава и тип электровоза. При этом проводят имитационное моделирование реализации графика движения.

Усиление провозной способности существующих линий с электрической тягой, для чего могут быть реализованы следующие мероприятия:

- увеличение весовой нормы при имеющемся электровозном парке путем использования имеющихся резервов по коэффициенту сцепления, мощности и силе тяги эксплуатируемых электровозов;
- применение кратной тяги на всем протяжении тягового плеча или подталкивающих локомотивов только на критических подъемах. При кратной тяге можно рассмотреть вариант пропуска сдвоенных составов. При этом варианте два состава нормальной длины, сформированных с ограничением по длине станционных путей, объединяют в один состав двойной длины и ведут его на всем пути следования двумя электровозами. Могут быть использованы схемы расстановки электровозов Э по составу С - ЭСЭС или ЭССЭ. Постановка двух электровозов в голове состава, т.е. реализация схемы ЭЭСС (движение влево), зачастую невозможна из-за ограничения по предельно допустимому усилию в автосцепке. Современные средства автоматики, например СМЕТ-Р или РПДА, рассчитаны на ведение сдвоенного состава одной бригадой (только в головном электровозе) с соблюдением всех ограничений по продольной динамике, в том числе на переломах профиля пути;

- замена электровозного парка на более мощные электровозы. При этом определяют новую весовую норму и техническую скорость, что позволяет рассчитать эффект повышения провозной способности;
- при использовании электровозов с переменной секционируемостью (ВЛ80С, ВЛ11М) целесообразно по мере роста грузопотока переходить от двухсекционных электровозов к трехсекционным. При этом для трехсекционных электровозов устанавливают повышенную весовую норму (в 1,5 раза выше).

При решении указанных задач необходимо выполнить тяговые расчеты. По их результатам проводят экономические расчеты, позволяющие оценить достигаемый экономический эффект и уровень реализации задания по повышению провозной способности с учетом прогнозов по ее росту. В настоящее время стратегическая программа развития железнодорожного транспорта России ориентирована на ежегодный прирост объема грузовых перевозок на 6…8 % и пассажирских перевозок на 1,5…2,5 %. Поэтому для большинства линий приходится прорабатывать мероприятия по увеличению пропускной способности, включая их электрификацию.

17.4. Автоматизация управления электроподвижным составом

Автоматизация управления ЭПС необходима для обеспечения заданных режимов движения поездов с более высокой точностью, чем это может сделать машинист вручную, а также для гарантированного обеспечения допустимых режимов работы силового оборудования. В любой системе автоматизации сохраняются основные функции машиниста (задание режимов движения поезда, обеспечение безопасности, а в неординарных ситуациях – переход на ручное управление).

При ручном управлении электроподвижным составом машинист контроллером КМ задает определенные параметры и режим работы тягового электропривода электровоза или электропоезда (таблица 17.2).

Принципы автоматизации состоят в том, что машинист задает стабилизацию или программное изменение какого-либо из параметров.

Таблица 17.2

Род тока	Задаваемые параметры
Постоянный (на примере ВЛ10)	1. Группировка тяговых двигателей (С, СП, П)
	2. Сопротивление пускового реостата R
	3. Ступень ослабления возбуждения (ОВ1, ОВ2, …)
Переменный (на примере ВЛ85)	1. Позиция регулирования главного трансформатора, т.е. напряжение на входе выпрямителя U_2
	2. Угол регулирования тиристоров выпрямителя α
	3. Ступень ослабления возбуждения (ОВ1, ОВ2, …)

Принципы автоматизации включают три основных последовательно реализуемых этапа:

- ***этап I заключается*** в том, что машинист с помощью контроллера КМ задает пусковой ток тяговых двигателей (рис. 17.6, а) и этот ток выдерживается автоматически в процессе пуска, т.е. разгона электроподвижного состава, как показано на характеристике v(I) на рис. 17.6, б. При этом в начальной стадии пуска увеличение фактического тока $I_ф$ до заданного значения осуществляется постепенно, начиная от его минимального значения $I_{тр}$. Такая система характерна и всегда применяется для электропоездов, причем на поездах со ступенчатым регулированием стабилизация пускового тока осуществляется при помощи реле ускорения РУ, переключающего ступени пускового реостата (или ступени трансформатора) и ступени ослабления возбуждения тяговых двигателей. При задании тока может использоваться авторежим, т.е. устройство, которое задает пусковой ток в зависимости от загрузки вагонов пассажирами. Работа системы автоматики заканчивается при выходе на естественную характеристику, т.е. в точке ***е.*** Далее работа тягового электропривода осуществляется по естественной характеристике, как показано стрелкой;

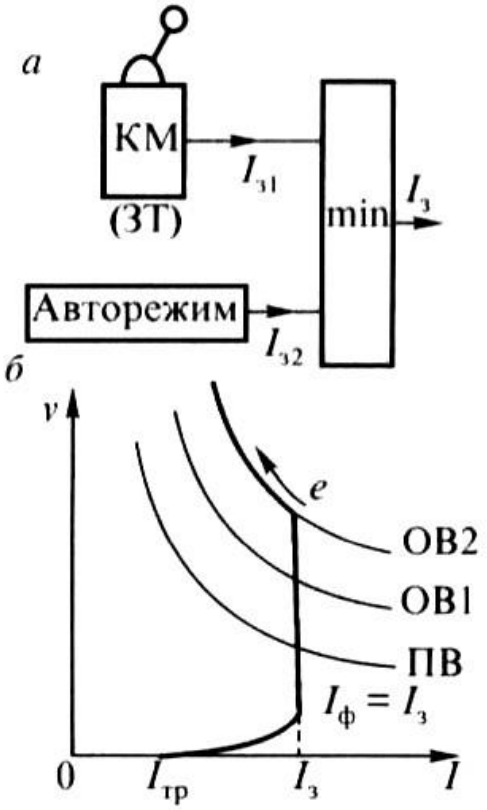


Рис. 17.6. Система стабилизации пускового тока: а – принцип задания пускового тока $I_з$; б – процесс стабилизации тока при пуске поезда

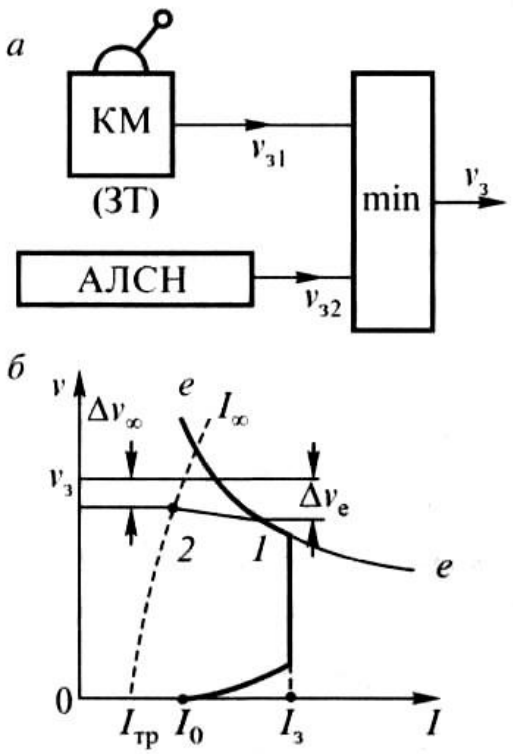


Рис. 17.7. Двухконтурная система подчиненного регулирования тока и скорости: а – принцип задания скорости v_3; б – процесс трогания и разгона поезда до заданной скорости

➢ ***этап II автоматизации заключается*** в задании скорости движения поезда v_3 (рис. 17.7, а), причем обычно вместе с этим задается также и предельный пусковой ток тяговых двигателей I_3. Пуск тяговых электродвигателей электровоза или электропоезда с током I_3 и стабилизация скорости поезда на уровне v_3 осуществляется, как показано на диаграмме рис. 17.7, б. Такая система реализована на электропоездах ЭР200, «Сокол», на всех зарубежных высокоскоростных поездах (TGV, JCE и др.), а также на электровозах ВЛ85, ВЛ65, ЭП1М, ЭП10, ЭП20, ЭП2К (в режимах поддержания заданной скорости).

Функциональная схема соответствующей системы автоматического регулирования выполняется в соответствии с теорией регулирования электроприводов как двухконтурная система стабилизации тока и скорости. Значение скорости v_3 может быть задано не только машинистом, но оно может быть введено из системы автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН);

➢ ***этап III заключается*** в реализации систем автоматизации состоит в автоматическом ведении поезда по перегону (АБ) с обеспечением прибытия его на следующую станцию (Б) точно по графику движения (расписанию), независимо от того, что со станции (А) поезд может отправиться либо с опозданием, либо с опережением Δt_A по отношению к графиковому времени отправления. Такая система хорошо эксплуатируется в метрополитене и сейчас отрабатывается в

пригородном сообщении. В указанных случаях обычно реализуется диаграмма движения поезда v(s) (по рис. 17.8, а). Она содержит фазы разгона (Р), выбега (В) и целевого торможения (ЦТ). Компенсация отклонения по отправлению со станции (А) Δt_A от графика движения может быть достигнута смещением нормативной точки перехода на выбег, а именно, повышением или снижением скорости $v_{нв}$ начала выбега, т.е. точки отключения тяговых двигателей по отношению к графиковому значению скорости $v^{гр}_{нв}$.

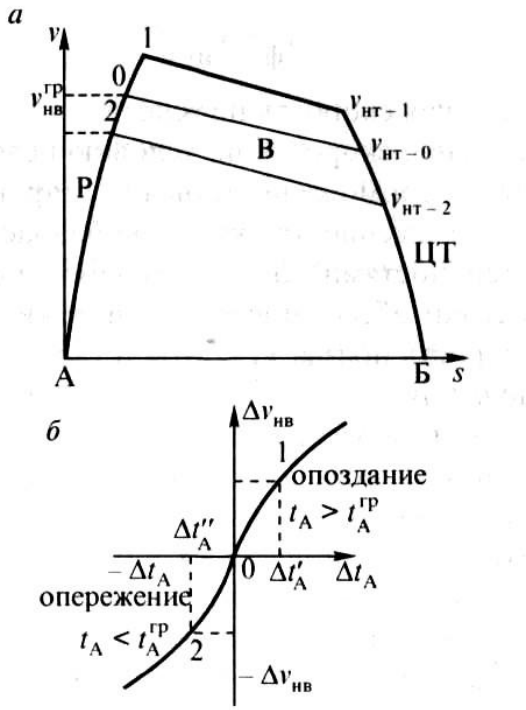


Рис. 17.8. Диаграмма движения поезда (а) и корректировочная кривая (б), используемая в системе автоведения

Соответствующая коррекция скорости выполняется в системе автоведения автоматически. Предварительно путем тягового расчета для каждого перегона рассчитывают корректировочную кривую $\Delta t_{нв} = f(\Delta t_A)$, примерный вид которой дан на рис. 17.8, б . Система автоведения в момент отправления поезда со станции (А) фиксирует отклонение Δt_A от графикового времени отправления и корректирует момент отключения тяговых двигателей, т.е. скорость $v_{нв} = v^{гр}_{нв} - \Delta v_{нв}$, при которой автоматическая система после разгона поезда отключает тяговые двигатели.

При этом без участия машиниста в результате реализации данного алгоритма на основе корректировочных кривых, которые должны быть рассчитаны для каждого перегона и направления движения поезда, обеспечивается его прибытие на станцию (Б) по графику. На рис. 17.8 показаны точками **0, 1, 2** возможные варианты коррекции режима движения поезда (**0** – отправление со станции (А)

точно по расписанию (коррекция не нужна); **1** – отправление с опозданием Δt_A (рис. 17.8, б); **2** – отправление с опережением Δt_A).

Вторая функция автомашиниста состоит в реализации целевого торможения поезда, т.е. в остановке поезда точно у платформы. При этом осуществляется непрерывное измерение скорости поезда на выбеге и при равенстве

$$v_ф \geq v_{цт},$$

где $v_ф$ – фактическая скорость поезда; $v_{цт}$ – ограничение скорости по условию целевого торможения, включается режим торможения (обычно стараются использовать электрическое торможение, так как оно обладает лучшими регулировочными способностями).

В дальнейшем на подходе к станции (Б) система автоматики обеспечивает такой режим движения, чтобы фактическая скорость поезда $v_ф$ соответствовала заданной кривой целевого торможения $v_{з\text{-}цт}(s)$. Задание этой кривой в функции пути требует точного замера расстояния до предполагаемого (нормативного) места остановки поезда на станции (Б). Эта функция реализуется в метро при помощи путевых датчиков пассивного типа, т.е. без электропитания, установленных с определенным интервалом на пути в зоне торможения поезда. Такая система обеспечивает не только прибытие поезда на станцию (Б) точно по графику, но и остановку его у платформы с малой погрешностью.

В пригородном сообщении, где применяют систему САВПЭ, используют аналогичные принципы со следующими отличиями:

- на длинных перегонах приходится использовать не 3-фазную диаграмму по рисунку (17.8, а), а 4-фазную, в которой должна быть предусмотрена фаза движения поезда с постоянной скоростью. Стабилизация, т.е. ограничение скорости, осуществляется путем соответствующего ручного или автоматического регулирования тягового электропривода, т.е. путем снижения силы тяги;
- в системе пригородных сообщений, т.е. на наземных участках, установка путевых датчиков для корректировки режима движения поезда нецелесообразна и невозможна. Поэтому замер пути реализуется через обороты немоторной колесной пары. Это приводит к накоплению ошибок в системе; поэтому необходима ручная корректировка текущей координаты поезда, что выполняет машинист при остановке поезда на очередной платформе по показаниям пикета (или по номеру опоры контактной сети).

Автоведение начинают также широко применять на поездах дальнего сообщения – пассажирских и грузовых. В этом случае в запоминающее устройство бортовой автоматической системы закладывают программу $v_З(s)$ с учетом плановых остановок и действующих ограничений скорости в функции пути. При этом функции автоведения сводятся к выполнению операций

регулирования, соответствующих этапу II (стабилизации скорости), как это рассмотрено выше.

Такие системы автоведения могут работать как в полностью автоматическом режиме, так и в контрольном режиме (режим подсказки), когда при ручном управлении поездом система предупреждает машиниста об ограничениях скорости, плановых остановках, сигналах автоблокировки и т.д.

Таким образом, автоматизация управления электроподвижным составом развивается с учетом основных требований эксплуатационной практики, включая безопасность движения, и на базе современных технических средств. К ним следует отнести:

- системы плавного бесконтактного регулирования тяговых электродвигателей, что существенно облегчает автоматизацию управления для электроприводов с коллекторными и бесколлекторными тяговыми двигателями;
- микропроцессорные системы автоматики с программным управлением, что значительно расширяет функции автоматического управления и регулирования, позволяет в условиях депо корректировать управляющие программы применительно к конкретным условиям эксплуатации (профиль пути, график движения, режимные карты и т.д.), реализуя тем самым оптимальные режимы ведения поездов.

При проектировании и эксплуатации систем автоматики широко используют методики тяговых и тормозных расчетов, рассмотренные в данном учебнике. Более того, по мере развития систем автоматики теория тяги поездов требует совершенствования методов и алгоритмов расчета режимов движения поезда, а также уточнения формул и алгоритмов для расчета всех видов сопротивления движению и ограничений по сцеплению. Необходимо также и развитие методов интегрирования уравнения движения поезда, т.е. методов тяговых расчетов.

Важно также отметить, что даже при широком распространении систем автоматики роль машиниста, т.е. «человеческий фактор», в обеспечении точного выполнения графика движения и всех требований безопасности движения поездов существенно возрастает. Автоматика не может предусмотреть все непредвиденные ситуации; при сбоях графика движения машинист принимает управление на себя. Аналогично он действует при обнаружении препятствия на пути и в других подобных ситуациях. Поэтому идея перехода на управление в одно лицо, т.е. отказ от помощника машиниста для условий Российских железных дорог может обернуться серьезными последствиями, вытекающими из понятия «человеческий фактор». Поэтому даже в условиях автоматизации необходимо сохранить традиционную систему управления поездом «машинист + помощник».

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ПРИМЕР ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Задание. Участок АВ, имеющий звеньевой путь с профилем, изображенным на рис. 1, обслуживает электровоз ВЛ10 массой $m_л$ = 184 т. Тяговые характеристики электровоза приведены на рис. 3.22. На участке обращаются грузовые составы из четырехосных полувагонов на роликовых подшипниках со средней массой 68 т и восьмиосных цистерн со средней массой 152 т. Процентное соотношение вагонов в составе (по массе): четырехосных на роликовых подшипниках $p_{4р}$ = 80 % и восьмиосных p_8 = 20 %. Принимаем расчетный тормозной коэффициент □$_р$ □ 0,33. Поезд следует от станции (А) к станции (В).

Наибольшую скорость движения по участку условно примем 80 км/ч.

Требуется:

♦ спрямить и привести профиль пути;

♦ определить массу состава и поезда;

♦ построить диаграммы удельных ускоряющих сил в режиме тяги;

♦ построить диаграммы замедляющих сил в режиме выбега и при служебном торможении;

♦ построить кривые скорости и времени в функции пути при безостановочном движении, построить кривые скорости при вариантах движения с остановкой на станции (Б), а также при ограничении скорости до 40 км/ч на элементе *17* заданного профиля пути;

♦ определить общий и удельный расходы энергии на тягу поезда;

♦ проверить нагревание тяговых электродвигателей для оценки использования мощности при работе электровоза с рассчитанным составом в летних условиях при расчетной температуре +20 °С.

Решение:

1. Спрямление профиля пути

Профиль пути заданного участка спрямляем в соответствии с разделом 8.4 в следующем порядке.

1.1. Рядом расположенные элементы однородного профиля группируем на участки для спрямления (станционные площадки с элементами профиля не спрямляем). На рис. 1 намечаем группы с однородным профилем: элементы 2 и 3; 5, 6, 7 и 8; 9 и 10 и т.д.

1.2. Уклон спрямленного участка определяем по формуле (8.15). Для элементов 2 и 3:

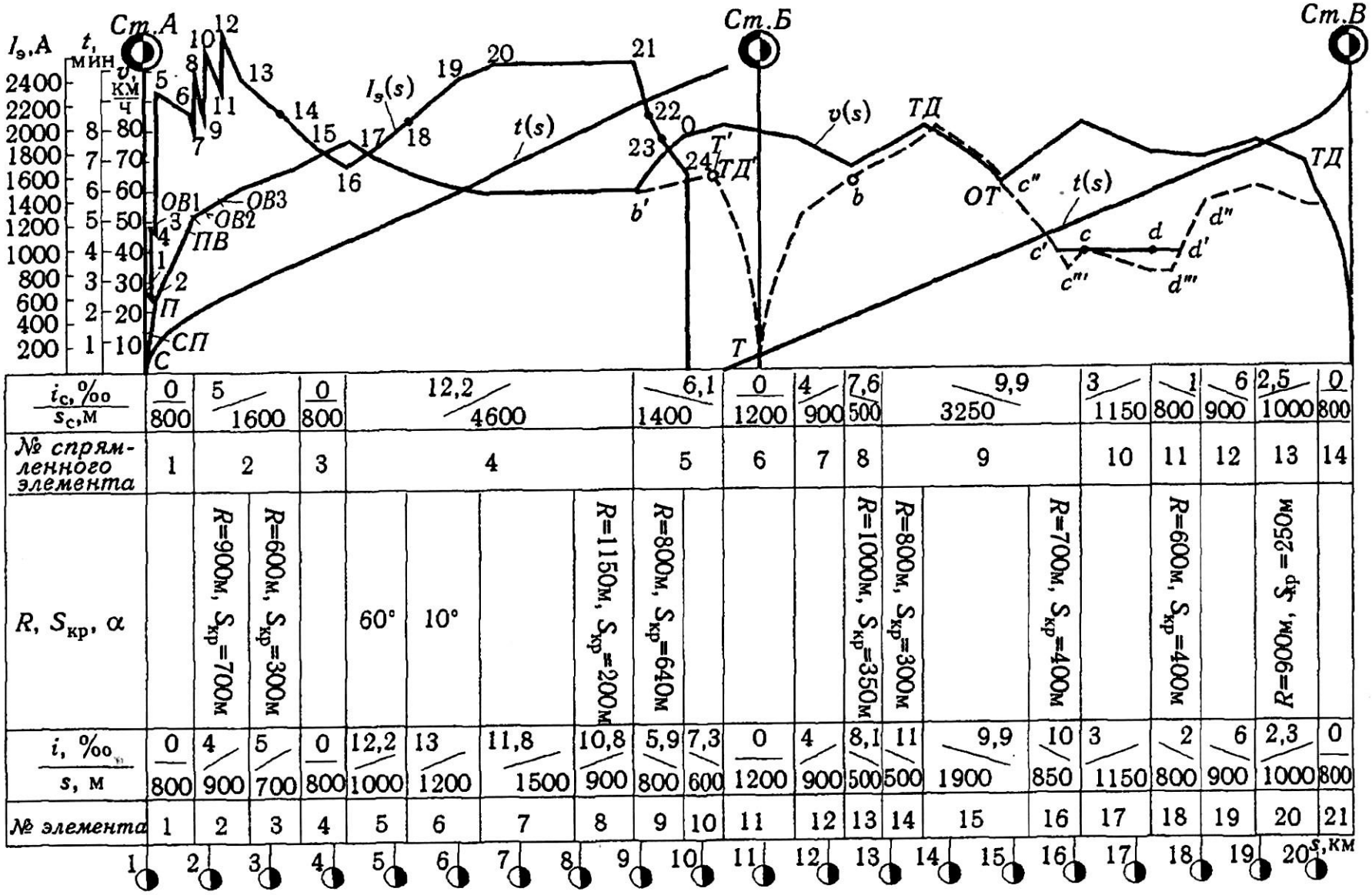
$$i_{c} = i_2 s_2 + i_3 s_3 = 4 \cdot 900 + 5 \cdot 700 = 7100 = 4{,}40\ ‰.$$

$$s_2 + s_3 \qquad 900 + 700 \quad 1600$$

1.3. Проверяем возможность спрямления по формуле (8.17). Для выбранных элементов 2 и 3:

$$s_2 = 900 \le \frac{2000}{4{,}4 - 4} \text{ или } 900 \le 5000;$$

$$s_3 = 700 \le \frac{2000}{5 - 4{,}4} \text{ или } 700 \le 3330.$$



i_c, ‰ / s_c, м	0 / 800	5 / 1600	0 / 800	12,2 / 4600				6,1 / 1400	0 / 1200	4 / 900	7,6 / 500	9,9 / 3250			3 / 1150	1 / 800	6 / 900	2,5 / 1000	0 / 800
№ спрямленного элемента	1	2	3	4				5	6	7	8	9			10	11	12	13	14
R, $S_{кр}$, α		R=900м, $S_{кр}$=700м	R=600м, $S_{кр}$=300м		60°	10°		R=1150м, $S_{кр}$=200м	R=800м, $S_{кр}$=640м			R=1000м, $S_{кр}$=350м	R=800м, $S_{кр}$=300м		R=700м, $S_{кр}$=400м		R=600м, $S_{кр}$=400м		R=900м, $S_{кр}$=250м	
i, ‰ / s, м	0 / 800	4 / 900	5 / 700	0 / 800	12,2 / 1000	13 / 1200	11,8 / 1500	10,8 / 900	5,9 / 800	7,3 / 600	0 / 1200	4 / 900	8,1 / 500	11 / 500	9,9 / 1900	10 / 850	3 / 1150	2 / 800	6 / 900	2,3 / 1000	0 / 800
№ элемента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

Рис. 1. График тяговых расчетов на участке постоянного тока

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТЕХНИКУМ

Следовательно, выбранные участки удовлетворяют условиям спрямления. Если бы спрямили элементы 2, 3 и 4, то спрямленный уклон –

$$i_{c} = \frac{i_2 s_2 + i_3 s_3 + i_4 s_4}{s_2 + s_3 + s_4} = \frac{4 \cdot 900 + 5 \cdot 700 + 0 \cdot 800}{2400} = 2{,}96‰.$$

Проверка возможности спрямления по элементу 4 дает:

$$s_4 \le 800 + \frac{2000}{2{,}96 - 0} = 670 \text{ м}.$$

Условие спрямления не выполнено, значит, спрямлять элементы 2, 3 и 4 нельзя. Возвращаемся к варианту спрямления элементов 2 и 3.

Аналогичным способом спрямляем и проверяем другие элементы профиля пути.

1.4. Кривые на участке заменяем фиктивными подъемами. Если заданы радиусы кривых R и их длина $s_{кр}$, то фиктивный подъем определяем по формуле (8.20). В нашем случае на спрямленном элементе 2 фиктивный подъем:

$$\frac{700 \cdot s_{кр1} \quad s_{кр2}}{} = \frac{700 \cdot 700 \quad 300}{} = 0{,}60‰.$$

$$i_{c} = s \cdot R_1 \cdot R_2 = 1600 \cdot 900 \cdot 600 \cdot i_{c}$$

1.5. Определяем приведенный подъем спрямленного элемента 2: $i_c = i_c - i_{c} = 4{,}40 - 0{,}60 = 5{,}0‰$. Фиктивный подъем в случае, когда заданы центральные углы кривых α, определяем по формуле (8.21). Для спрямленного элемента 4, получим:

$$i_{c} = \frac{12{,}2 \cdot 700 \cdot s_{кр} \quad 12{,}2 \cdot 60^{o} \quad 700 \quad 200}{s_c \, s_c \, R \, 4600 \, 4600 \, 1100} = 0{,}20‰.$$

Все расчеты по спрямлению и приведению уклонов, проверка возможности спрямления, нумерация приведенных элементов и результаты расчетов сведены в таблицу 1 на рисунке 1. Результаты расчетов показаны на рис. 1 в одном из масштабов, рекомендованных в табл. 8.4.

2. Определение массы состава

2.1. Анализируя профиль пути в соответствии с разделом 9.1, приходим к выводу, что наиболее тяжелым является спрямленный элемент 4, имеющий подъем 12,2 ‰ и длину 4600 м, перед которым расположен подъем 5 ‰ и короткая площадка. Вследствие этого нельзя создать большой запас кинетической энергии за счет увеличения скорости движения.

Массу поезда определим из условий установившейся скорости движения по этому подъему (см. раздел 9.2). Массу состава находим по формуле (9.2). Расчетные силу тяги и скорость движения для электровоза ВЛ10 берем из таблицы 9.1: $F_{кр}$ = 451 кН, $v_р$ = 46,7 км/ч.

Удельное основное сопротивление движению электровоза при работе под током определяем по формуле (6.1). При $v_р$ = 46,7 км/ч:

$$w''_0 = 1{,}9 + 0{,}01v + 0{,}0003v^2 = 1{,}9 + 0{,}01 \cdot 46{,}7 + 0{,}0003 \cdot 46{,}7^2 = 3{,}02 \text{ Н/кН}.$$

Удельное основное сопротивление движению состава определяем по удельным значениям основного сопротивления движению каждого типа вагонов и процентному соотношению их в составе по массе, как указано в разделе 6.3. Удельное основное сопротивление движению четырехосных вагонов на роликовых подшипниках при $v_р$ = 46,7 км/ч рассчитываем по формуле (6.13) (см. раздел 6.2). Масса $m_{во4р}$, приходящаяся на каждую ось, равна 17 т.

Следовательно, $w'_{04} = 0{,}7 \cdot \frac{3 \cdot 0{,}1 v m_{во}}{0{,}4} + 0{,}0025v^2 =$

$$= 0{,}7 \cdot \frac{3 \cdot 0{,}1 \cdot 46{,}7 \cdot 17}{0{,}4} + 0{,}0025 \cdot 46{,}7^2 = 1{,}47 \text{ Н/кН}.$$

Удельное основное сопротивление движению восьмиосных вагонов при $v_р$ = = 46,7 км/ч рассчитываем по формуле (6.14). Масса, приходящаяся на ось, $m_{во8}$ = = 19 т. Тогда запишем: $w'_{08} = 0{,}7 \cdot \frac{6 \cdot 0{,}038 m v_{во}}{8} + 0{,}0021v^2 =$

$$= 0{,}7 \cdot \frac{6 \cdot 0{,}038 \cdot 46{,}719}{8} + 0{,}0021 \cdot 46{,}7^2 = 1{,}35 \text{ Н/кН}.$$

Удельное основное сопротивление движению состава при скорости движения 46,7 км/ч определяем по формуле (6.35): $P_{4р} \cdot w'_{04} + P_8 \cdot w'_{08}$ 80·1,47 + 20·1,35 Н . $w'_0 = \frac{100}{100} = 1{,}45$ кН

2.3. Масса состава по формуле (9.2):

$$m_c = \frac{F_{кр}}{g(w'_0 + i_р)} - m_э = \frac{451000}{184 \cdot 9{,}81 \cdot (3{,}02 + 12{,}2)} = 3163 \text{ т}$$

$$g(w'_0 + i_р) \qquad 9{,}81(1{,}45 + 12{,}2)$$

Округляем ее до 3150 т.

2.4. Проверяем полученную массу состава по условиям трогания поезда на остановочных пунктах в соответствии с разделом 9.4 по формуле (9.5). В нашем

случае i = 0. Силу тяги электровоза ВЛ10 при трогании берем из таблицы 9.1: $F_{кр}$ = = 614 кН.

Удельные основное и дополнительное сопротивления состава при трогании определяем для подвижного состава на роликовых подшипниках по формуле (6.53). Для четырехосных вагонов на роликовых подшипниках равно:

$$w_{4трр} \square \cancel{28 \square 28} \square \cancel{1{,}17\ Н}\ ;\ m_{во4р} \cancel{\square} 7\ 17\ \square 7$$
кН

для восьмиосных вагонов –

$$w_{8тр} \square \cancel{28 \square 28} \square \cancel{1{,}08\ Н}\ .\ m_{во8} \cancel{\square} 7\ 19 \square 7$$
кН

Удельное сопротивление при трогании состава рассчитываем по формуле (6.35):

$$w_{тр} \square p^4_р \square \frac{w^4_{тр}{}^р \square p_8 \square w^8_{тр} \square 80 \square 1{,}17 \square 20 \square 1{,}08}{100} \square \frac{1{,}15}{100} \cancel{Н}\ .$$
кН

Масса состава по условиям трогания на станции –

$$\cancel{F_{кртр}} \quad 614000\ m_{стр} \square g \square \square w_{тр} \square i \square \square m_л$$
$$\square \frac{}{9{,}81 \square \square 1{,}15 \square 0 \square \square 184 \square 54241}\ т$$

Поскольку $m_{стр} > m_с$, состав массой 3150 т можно тронуть с места на любом остановочном пункте участка.

3. Расчет и построение диаграммы удельных ускоряющих сил

3.1. Для расчета удельных сил сопротивления движению состава предварительно определим удельное основное сопротивление движению при различных скоростях четырехосных вагонов на роликовых подшипниках по формуле (6.13) и восьмиосных вагонов по формуле (6.14). Для и от 0 до 10 км/ч расчет ведем при v = 10 км/ч, как указано в разделе 6.2: $w \square_{04} \square_р \square 0{,}7 \square$ $\frac{}{3 \square 0{,}1 \square vm \square_{во} 0{,}4 0025 \square v^2} \square 0{,}7 \square$ $\frac{}{3 \square 0{,}1 \square 10 \square 170{,}0025 \square 10^2} \square 0{,}95$ НкН; $w \square_{08} \square \square 0{,}7 \square$ $\frac{}{6} \square$ $0{,}038 m v_{во} \square_8 0{,}0021 v^2 \square 0{,}7 \square$ $\frac{}{6 \square 0{,}038 \square 1019 \square 0{,}0021 \square 10^2}$ $\square 1{,}05$ НкН.

Удельное основное сопротивление движению состава рассчитываем по формуле (6.35):

$w_{0} = \frac{P_{4p} \cdot w_{04} + 100_{p} \cdot P_{8} \cdot w_{08}}{80 \cdot 0{,}95 + 100 \cdot 20 \cdot 1{,}05} \cdot 0{,}97$ Н/кН.

Результаты аналогичных расчетов для скоростей, кратных 10 км/ч, расчетной скорости и для скоростей переходов на позиции ослабления возбуждения (к = 46,7; 48,5; 52; 56) приведены в таблице 2, а.

Таблица 2,а

Режим	v, км/ч	w_{0}, Н/кН	w_{04}, Н/кН	w_{08}, Н/кН	w_{0}, Н/кН	w_{0}, Н/кН	$F_{к}$, кН	$f_{к}$, Н/кН	$f_{у} \cdot f_{к} \cdot w_{0}$, Н/кН
Разгон	0	2,03	0,95	1,05	0,97	1,03	614,0	18,77	17,75
	10	2,03	0,95	1,05	0,97	1,03	513,8	15,71	14,68
	20	2,22	1,05	1,11	1,06	1,13	492,3	15,05	13,93
	30	2,47	1,19	1,18	1,18	1,25	475,6	14,54	13,29
	40	2,78	1,35	1,27	1,33	1,41	460,9	14,09	12,68
	46,7	3,02	1,47	1,35	1,45	1,53	451,0	13,79	12,25
ПВ	50	3,15	1,54	1,39	1,51	1,60	354,0	10,82	9,22
	60	3,58	1,76	1,53	1,71	1,82	184,3	5,64	3,82
	70	4,07	2,01	1,70	1,95	2,06	118,7	3,63	1,57
	80	4,62	2,29	1,88	2,21	2,34	86,3	2,64	0,30
	90	5,23	2,60	2,09	2,50	2,65	68,6	2,10	- 0,55
	100	5,90	2,94	2,32	2,81	2,98	58,8	1,80	- 1,19
ОВ1	48,5	3,09	1,51	1,37	1,48	1,57	517,8	15,83	14,26
	50	3,15	1,54	1,39	1,51	1,60	451,1	13,79	12,19
	60	3,58	1,76	1,53	1,71	1,82	248,1	7,59	5,77
	70	4,07	2,01	1,70	1,95	2,06	163,8	5,01	2,94
	80	4,62	2,29	1,88	2,21	2,34	118,7	3,63	1,29
	90	5,23	2,60	2,09	2,50	2,65	88,3	2,70	0,05
	100	5,90	2,94	2,32	2,81	2,98	74,5	2,28	- 0,71
ОВ2	52	3,23	1,58	1,42	1,55	1,64	508,0	15,53	13,89
	60	3,58	1,76	1,53	1,71	1,82	314,8	9,62	7,81
	70	4,07	2,01	1,70	1,95	2,06	215,7	6,60	4,53
	80	4,62	2,29	1,88	2,21	2,34	156,9	4,80	2,46
	90	5,23	2,60	2,09	2,50	2,65	114,7	3,51	0,86
	100	5,90	2,94	2,32	2,81	2,98	89,3	2,73	- 0,25
ОВ3	56	3,40	1,67	1,47	1,63	1,73	474,6	14,51	12,78
	60	3,58	1,76	1,53	1,71	1,82	393,2	12,02	10,21
	70	4,07	2,01	1,70	1,95	2,06	263,8	8,07	6,00
	80	4,62	2,29	1,88	2,21	2,34	196,1	6,00	3,66
	90	5,23	2,60	2,09	2,50	2,65	147,1	4,50	1,85
	100	5,90	2,94	2,32	2,81	2,98	109,8	3,36	0,37

3.2. Удельное основное сопротивление движению электровоза в режиме тяги определяем по формуле (6.1). Для интервала скоростей 0…10 км/ч, получим: w_0 = 1,9 + 0,01·v + 0,0003·v^2 = 1,9 + 0,01·10 + 0,0003·10^2 = 2,03 $Н_{кН}$.

3.3. Осно вное удельное сопротивление движению поезда определяем по формуле (6.38). Для интервала скоростей 0…10 км/ч, получим:

$$w_0 = \frac{w_0 \cdot m_л + w_0 \cdot m_c}{m} = \frac{2{,}03 \cdot 184 + 0{,}97 \cdot 3150}{3150} = 1{,}03\ Н_{кН}.$$

3.4. Удельные силы тяги определяем по формуле (1.2), исходя из сил тяги, которые находим из тяговых характеристик электровоза ВЛ10 (см. рис. 2.3). Для скорости 10 км/ч сила тяги при полном возбуждении равна 513,8 кН. Удельная сила тяги равна:

$$f_к = \frac{F^к}{m \cdot g} = \frac{513800}{184 \cdot 3150} = 15{,}71\ Н/кН$$

3.5. Удельные ускоряющие силы в режиме тяги (при v = 10 км/ч) определяем по формуле: $f_y = f_к - w_0 = 15{,}71 - 1{,}03 = 14{,}68$ Н/кН .

Результаты расчетов при разгоне, ПВ, ОВ1, ОВ2 и ОВ3 сведены в табл. 2, а. Необходимо отметить, что при v от 0 до 10 км/ч сопротивление движению принимается постоянным. Силы тяги при v = 0 и v = 10 км/ч, а следовательно, и удельные ускоряющие силы различны.

По данным табл. 2,а строим диаграмму ускоряющих сил $f_к$ – w_0 = f(v) в соответствии с разделом 8.2, в выбранном при построении профиля пути масштабе из таблицы 8.4 (см. рис. 2).

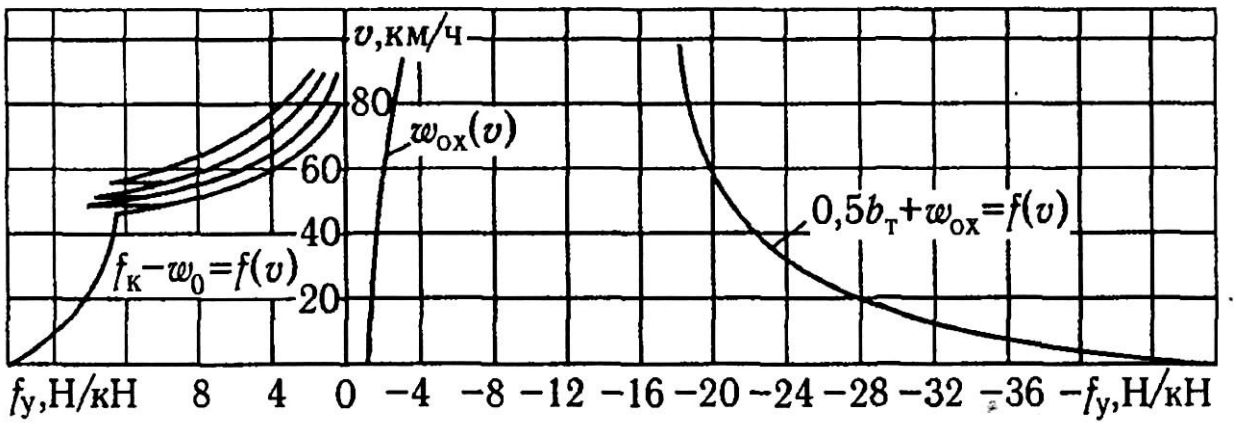


Рис. 2. Диаграмма удельных ускоряющих и замедляющих сил поезда массой состава 3150 т на участке постоянного тока

4. Построение диаграммы удельных замедляющих сил в режиме выбега и механического торможения

4.1. Удельное основное сопротивление движению электровоза при движении без тока определяем по формуле (6.2) или берем из таблицы 6.1. При v от 0 до 10 км/ч, получим:

w_x = 2,4 + 0,011·V + 0,00035 ·V^2 = 2,4 + 0,011·10 + 0,00035 ·10^2 = 2,55 Н/кН.

Удельное основное сопротивление движению состава берем из табл. 2,а.

Таблица 1

№ элемента пути	s, м	i, ‰	α, градусы, или R, м, кривой	$s_{кр}$, м	s_c, м	i_c', ‰	i_c'', ‰	i_c ‰	№ спрямленного элемента	Расчет и проверка
1	800	0	-	-	800	0	0	0	1	Станция А
2	900	4	900	700	1600	4,4	0,6	5	2	$i_c' = \frac{4 \cdot 900 + 5 \cdot 700}{1600} = 4{,}4^\circ/_{\infty}$; $s_2 = 900 < \frac{2000}{0{,}4} = 5000$м
3	700	5	600	300						$s_2 = 700 < \frac{2000}{0{,}6} = 3330$м; $i_c'' = \frac{700}{1600}\left(\frac{700}{900} + \frac{300}{600}\right) = 0{,}6^\circ/_{\infty}$
4	800	0	-	-	800	0	0	0	3	
5	1000	12,2	60°	-	4600	12,0	0,2	12,2	4	$i_c' = \frac{12{,}2 \cdot 1000 + 13{,}0 \cdot 1200 + 11{,}8 \cdot 1500 + 10{,}8 \cdot 900}{4600} = 12{,}0^\circ/_{\infty}$
6	1200	13,0	-	-						$s_5 = 1000 < \frac{2000}{0{,}2} = 10000$м; $s_6 = 1200 < \frac{2000}{1{,}0} = 20000$м;
7	1500	11,8	-	-						$s_7 = 1500 < \frac{2000}{0{,}2} = 10000$м; $s_8 = 900 < \frac{2000}{1{,}2} = 1670$м;
8	900	10,8	1150	200						$i_c'' = 12{,}2\frac{60}{4600} + \frac{700}{4600} \cdot \frac{200}{1150} = 0{,}2^\circ/_{\infty}$
9	800	-5,9	800	640	1400	-6,5	0,4	-6,1	5	$i_c' = \frac{(-5{,}9) \cdot 800 + (-7{,}3) \cdot 600}{1400} = -6{,}5^\circ/_{\infty}$; $s_9 = 800 < \frac{2000}{0{,}6} = 3330$м
10	600	-7,3	-	-						$s_{10} = 600 < \frac{2000}{0{,}8} = 2500$м; $i_c'' = \frac{700}{1400} \cdot \frac{640}{800} = 0{,}4^\circ/_{\infty}$
11	1200	0	-	-	1200	0	0	0	6	Станция Б
12	900	4	-	-	900	4	0	4	7	
13	500	-8,1	1000	350	500	-8,1	0,5	-7,6	8	$i_c'' = \frac{700}{500} \cdot \frac{350}{1000} = 0{,}5^\circ/_{\infty}$
14	500	-11	800	300	3250	-10,1	0,2	-9,9	9	$i_c' = \frac{(-11) \cdot 500 + (-9{,}9) \cdot 1900 + (-10) \cdot 850}{3250} = -10{,}1^\circ/_{\infty}$
15	1900	-9,9	-	-						$s_{14} = 500 < \frac{2000}{0{,}9} = 2220$м; $s_{15} = 1900 < \frac{2000}{0{,}2} = 10000$м;
16	850	-10	700	400						$s_{16} = 850 < \frac{2000}{0{,}1} = 20000$м; $i_c' = \frac{700}{3250}\left(\frac{300}{800} + \frac{400}{700}\right) = 0{,}2^\circ/_{\infty}$
17	1150	3	-	-	1150	3	0	3	10	

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТЕХНИКУМ

Продолжение таблицы 1

№ элемента пути	s, м	i, ‰	α, градусы, или R, м, кривой	$s_{кр}$, м	s_c, м	i_c', ‰	i_c'', ‰	i_c ‰	№ спрямленного элемента	Расчет и проверка
18	800	-2	600	700	800	-2	1	-1	11	$i_c'' = \frac{700}{600} \cdot \frac{700}{800} = 1{,}0‰$
19	900	-6	-	-	900	-6	-	-6	12	
20	1000	2,3	900	250	1000	2,3	0,2	2,5	13	$i_c'' = \frac{700}{900} \cdot \frac{250}{1000} = 0{,}2‰$
21	600	0	-	-	600	0	0	0	14	Станция В

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТЕХНИКУМ

4.2. Удельное основное сопротивление движению поезда при работе электровоза без тока рассчитываем по формуле (6.40):

для интервала 0…10 км/ч имеем:

$$f_з = w_{ox} = \frac{w_x m_л + w_0 m_c}{m} = \frac{2,4 \cdot 184 + 0,97 \cdot 3150}{184 + 3150} = 1,06 \text{ Н/кН}.$$

Результаты расчетов w_x и w_{ox} сведены в таблицу 2,б и по ним построена диаграмма удельных замедляющих сил при выбеге (см. рис. 2) с использованием выбранного при построении профиля пути масштаба из таблицы 8.4.

Таблица 2,б

v	w_x	w_0	w_{ox}	$\psi_{кр}$	$b_т$	$f_{зс} = w_{ox} + 0,5b_т$
км/ч	Н/кН	Н/кН	Н/кН	–	Н/кН	Н/кН
0	2,55	0,97	1,06	0,270	89,10	45,61
10	2,55	0,97	1,06	0,198	65,34	33,73
20	2,76	1,06	1,16	0,162	53,46	27,89
30	3,05	1,18	1,29	0,140	46,33	24,45
40	3,40	1,33	1,45	0,126	41,58	22,24
50	3,83	1,51	1,64	0,116	38,19	20,73
60	4,32	1,71	1,86	0,108	35,64	19,68
70	4,89	1,95	2,11	0,102	33,66	18,94
80	5,52	2,21	2,39	0,097	32,08	18,43
90	6,23	2,50	2,70	0,093	30,78	18,09
100	7,00	2,81	3,04	0,090	29,70	17,89

4.3. Определение удельных тормозных сил проводим в соответствии с разделом 7.3. Расчетный коэффициент трения чугунных колодок о колеса подвижного состава определяем по формуле (7.8) или берем из таблицы 7.2. При v = 10 км/ч, получим:

$$\psi_{кр} = 0,27 \cdot \frac{100 \cdot V}{100 + 5V} = 0,27 \cdot \frac{100 \cdot 10}{100 + 5 \cdot 10} = 0,198 .$$

4.4. Удельные тормозные силы рассчитываем по формуле (7.19) при заданном $\psi_р = 0,33$. При v = 10 км/ч, получим: $b_т = 1000 \cdot \psi_{кр} \cdot \psi_р = 1000 \cdot 0,198 \cdot 0,33 = 65,34$ Н/кН .

4.5. Удельные замедляющие силы при служебном торможении определяем по формуле $f_{зс} = w_{ox} + 0,5b_т$. При v = 10 км/ч, имеем: $f_{зс} = w_{ox} + 0,5b_т = 1,06 + 0,5 \cdot 65,34 = 33,73$ Н/кН.

Все результаты расчетов приведены в таблицу 2, б и по ним построена диаграмма удельных замедляющих сил при служебном торможении (см. рис. 2).

5. Построение кривых скорости v(s) и времени t(s) графическим методом

5.1. Построение кривых скорости v(s) и времени t(s) выполняем в соответствии с разделом 8.6 и 8.7 по диаграмме удельных ускоряющих и замедляющих сил в выбранных масштабах (см. рис. 1 и 2). Для построений кривой v(s) задаемся интервалами скоростей, определяем в каждом из них среднюю скорость $v_{ср}$ и, используя линейку и угольник, строим отрезки линии v(s) в каждом интервале скоростей с учетом профиля пути.

На кривой v(s) делаем отметки о соединении тяговых электродвигателей (С, СП, П), включении и снятии ступеней ослабления возбуждения (ПВ, ОВ1, ОВ2, ОВ3 т.д.), отключении тока (0), включении механических тормозов (ТД) и их отпуске (ОТ).

Режим ведения поезда изменяем с учетом движения с наибольшей скоростью и наиболее рациональным расходом электрической энергии.

На первых четырех спрямленных элементах профиля пути поезд следует в режиме тяги. В середине спрямленного элемента 5 (на спуске) ток выключаем с таким расчетом, чтобы к концу спуска скорость не превысила допустимую (здесь отрезок кривой v(s) получили обратным построением, начиная от точки, соответствующей наибольшей допустимой скорости в конце спуска). Далее, исходя из профиля пути, целесообразно следовать на выбеге, а на спуске 9,9 ‰ (спрямленный элемент 9) кратковременно включить тормоза и отпустить их с таким расчетом, чтобы к концу этого спуска поезд достиг наибольшей допустимой скорости. Затем поезд снова идет на выбеге.

Кривую v(s) при торможении до остановки на станции (В) строим на основании диаграммы удельных замедляющих сил $w_{ox} + 0{,}5 \cdot b_т = f(v)$ в обратном порядке, начиная с v = 0. Пересечение полученной кривой с кривой скорости, которую вели от начала участка (или перегона), дает искомую точку начала действия тормозных сил.

5.2. Рассмотрим вариант движения поезда с остановкой на станции (Б). Кривую торможения перед станцией (Б) строим аналогично кривой перед станцией (В), начиная с v = 0 (обратным построением) от точки Т. Получаем штриховую линию ТТ'. При движении с остановкой нецелесообразно на спрямленном элементе 5 (i = – 6,1 ‰) следовать в режиме тяги, как при безостановочном движении, поскольку в конце его придется включать тормоз. Поэтому в начале элемента 5 нужно перейти на выбег и построить штриховую линию из точки b□. Точка пересечения ТД этой линии с кривой ТТ' соответствует началу торможения поезда, с тем чтобы центр массы поезда остановился по оси

станции (Б). Несколько меньшая скорость движения на отрезке b' – ТД' вызовет незначительное увеличение времени хода поезда, но позволит сэкономить электрическую энергию по сравнению с безостановочным движением.

Кривую v(s) при разгоне со станции (Б) (штриховая линия) строим аналогично кривой при начале движения со станции (А). Построение ведем в режиме тяги до точки b, так как дальше идут спуски крутизной 7,6 ‰, а затем – 9,9 ‰. Выбираем режим движения на выбеге до v = 80 км/ч, а затем – торможение. Допускается также строить линию от точки b до пересечения с кривой v(s) при безостановочном движении.

5.3. Построение кривой v(s) в случае ограничения скорости движения выполняют с таким расчетом, чтобы не только середина (центр массы) поезда, но его головная и хвостовая части прошли все место ограничения без превышения установленной скорости. Чтобы выполнить это условие, определим длину поезда по формуле (9.6) без учета 10 м на точность остановки поезда. Принимаем длину электровоза равной 33 м (из таблицы 9.1), длины четырехосного полувагона – 14 м, восьмиосной цистерны – 20 м (см. раздел 9.5).

Число четырехосных полувагонов на роликовых подшипниках в составе определяем по формуле (9.7) с округлением до целых чисел –

$$n_{4р} = \frac{m^c - p^4}{m_{в4р}} = \frac{3150 - 80}{68} = 37 \text{ вагонов};$$

число восьмиосных цистерн –

$$n_8 = \frac{m^c - p^8}{m_{в8}} = \frac{3150 - 20}{152} = 4 \text{ вагона}.$$

Тогда длина поезда равна: $l_п = 37 \cdot 14 + 4 \cdot 21 + 1 \cdot 33 = 635$ м.

Чтобы головная и хвостовая части поезда прошли заданный элемент без превышения допустимой скорости (отрезок cd на рис. 1), отложим от точки c влево и от точки d вправо по половине длины поезда $l_п/2 = 635/2 = 317{,}5$ м (отрезок c'd'). Если центр массы поезда будет двигаться со скоростью 40 км/ч в точке c', головная часть поезда окажется в точке c, а когда центр массы поезда будет проходить точку d' хвостовая часть поезда окажется в точке d.

Таким образом, если при построении кривой v(s) скорость движения на отрезке c'd' не превысит 40 км/ч, то ни одна часть поезда на всем протяжении заданного элемента 17 профиля пути (или спрямленного 10) не превысит эту скорость (будет ниже линии cd).

Для того чтобы в точке c' скорость была 40 км/ч, нужно проанализировать профиль пути на подходе к ней. В нашем случае перед точкой c' находится спуск 9,9 ‰ и, чтобы от построенной кривой v(s) (сплошная линия) попасть в точку c', нужно использовать режим торможения. Построение удобно вести в обратном порядке от точки c' (штриховая линия c'c''). Если в точке c' перейти на выбег, то скорость будет возрастать и превысит допустимую. Поэтому режим торможения нужно использовать и правее точки c'.

После точки (c) начинается подъем 3 ‰ на котором скорость движения на выбеге будет уменьшаться. Следовательно, целесообразно найти точку (c''') перехода с тормоза на выбег, при движении от которой поезд увеличит скорость до 40 км/ч в точке (c), а затем будет двигаться с меньшей скоростью по подъему 3 ‰. Для этого используем обратное построение при выбеге от точки (c). Точка пересечения этой линии с кривой при торможении (c''') и является искомой точкой. Дальнейшее построение отрезков кривой скорости вправо от точки c выполняем на выбеге с учетом профиля пути в направлении точки d''', в которой необходимо перейти в режим тяги, чтобы кривая v(s) прошла через точку d'. С этой целью обратным построением из точки d' получаем отрезок d'd''' (в режиме тяги при i = – 1 ‰).

Поскольку поезд находится вблизи станции (B), на которой будет остановка, а на спрямленном элементе 12 находится спуск 6 ‰, в конце спрямленного элемента 11 (в точке d'') можно перейти на выбег и следовать в этом режиме до торможения перед остановкой на станции (B).

5.4. Построение кривой времени в функции пути выполняем в соответствии с разделами 8.6 и 8.7. Из таблицы 8.4 берем величину Δ при выбранном масштабе пути и строим отрезок кривой времени в пределах данного отрезка пути, снося средние скорости движения $v_{ср}$ на вертикаль, проведенную на расстоянии Δ влево от начала координат. Для уменьшения размеров чертежа по вертикали кривую t(s) строим частями по 10 мин.

На основании построений (см. рис. 1) получаем следующие времена хода: на перегоне (АБ) – t = 10,5 мин, на перегоне (БВ) – t = 8,8 мин, на участке (АВ) – t = 19,3 мин. Эти данные используют для составления графика движения поездов.

6. Определение общего и удельного расхода электрической энергии на тягу поездов

6.1. Построение кривой тока электровоза $I_э(s)$ проводим на основании токовых характеристик $I_э(v)$ (см. рис. 11.2), как указано в разделе 11.3. При трогании поезда (v = 0) тяговые электродвигатели соединены последовательно, и в их цепь включен пусковой реостат, $I_э$ равен 685 А (точка А). С увеличением скорости до 10 км/ч реостат выводится, и ток $I_э$ снижается в соответствии с ограничением по сцеплению до 595 А (точка С). Переключение при этой скорости

электродвигателей на последовательно-параллельное соединение с введением в цепь пускового реостата приводит к удвоению тока за счет двух параллельных ветвей тяговых электродвигателей – $I_э$ = 1190 А (точка D). С увеличением скорости до 22 км/ч реостат выводится, а ток снижается до 1150 А (точка G). Переход на параллельное соединение вызывает удвоение тока электровоза, так как при этом будет четыре параллельных ветви электродвигателей – $I_э$ = 2300 А (точка Н) и т.д.

Используя этот график, получаем (см. рис. I): при трогании поезда со станции (А) ток $I_э$ = 685 А (точка 1). В той точке, где скорость составляет 10 км/ч, ток / равен 595 А (точка 2) и удваивается до 1190 А (точка 5). Далее ток $I_э$ снижается и в точке пути, где скорость равна 22 км/ч, становится равным 1150 А (точка 4), он увеличивается до 2300 А в точке 5 и т.д. В тех местах, где поезд достигает скоростей перехода на ОВI, ОВ2 и т.д., возникают броски тока, соответствующие броскам тока на графике $I_э(v)$. После выхода на характеристику $I_э(v)$ третьей ступени ослабления возбуждения ток с увеличением скорости снижается, а с уменьшением – возрастает. В точке 0 ток отключен. Соединив полученные точки прямыми линиями, получим график $I_э(v)$.

6.2. Расход электрической энергии, потребляемой тяговыми электродвигателями, определяем в соответствии с разделом 13.2 по формуле (13.1). Значения Δt для каждого отрезка пути, на котором ток изменяется по закону прямой линии, берем из кривой t(s) (см. рис. 1).

Так как на первом отрезке пути ток изменялся от 685 А в точке 1 до 595 А в точке 2, средний ток равен:

$$I_{эср} = \frac{I_{эн} + I_{эк}}{2} = \frac{685 + 595}{2} = 640 \text{ А}.$$

Время протекания этого тока из кривой t(s) составит Δt = 0,4 мин. Следовательно,

$$I_{эср} \cdot \Delta t = 640 \cdot 0{,}4 = 256 \text{ А} \cdot \text{мин}.$$

Все данные заносим в таблицу 3. Расход электрической энергии, потребляемой тяговыми электродвигателями равен:

$$A_т = \frac{U_с \cdot I_{эср} \cdot \Delta t}{60 \cdot 1000} = \frac{3000 \cdot 20318}{60 \cdot 1000} = 1015{,}9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Таблица 3

Участок кривой тока	$I_{эн}$	$I_{эк}$	$I_{эср}$	Δt	$I_{эср} \cdot \Delta t$

(см. рис. 1)	A	A	A	мин	A·мин
1 – 2	685	595	640	0,40	256,0
3 – 4	1190	1150	1170	0,45	526,5
5 – 6	2300	2140	2220	0,95	2109,0
6 – 7	2140	1970	2055	0,10	205,5
8 – 9	2480	2060	2270	0,20	454,0
10 – 11	2670	2270	2470	0,30	741,0
12 – 13	2780	2420	2600	0,30	780,0
13 – 14	2420	2090	2255	0,70	1578,5
14 – 15	2090	1860	1975	0,40	790,0
15 – 16	1860	1680	1770	0,40	708,0
16 – 17	1680	1860	1770	0,45	796,5
17 – 18	1860	2090	1975	0,45	889,0
18 – 19	2090	2380	2235	0,70	1564,5
19 – 20	2380	2530	2455	0,70	1718,5
20 – 21	2530	2530	2530	2,30	581,9
21 – 22	2530	2090	2310	0,20	462,0
22 – 23	2090	1860	1975	0,20	395,0
23 – 24	1860	1640	1750	0,30	525,0
			Всего	9,50	20318,0

6.3. Расход электрической энергии на собственные нужды определяем исходя из энергии, которую потребляют вспомогательные машины за 1 минуту (см. таблицу 13.2). Для электровоза ВЛ10 этот расход равен 2,08 кВт·ч/мин. Время движения поезда по участку t = 19,3 мин.

$$A_{сн} = 2{,}08 \cdot 19{,}3 = 40{,}1 \text{ кВт·ч}.$$

6.4. Полный расход электрической энергии в соответствии с разделом 13.5. A

$$A = A_т + A_{сн} = 1015{,}9 + 401 = 1056{,}0 \text{ кВт·ч}.$$

6.5. Удельный расход электрической энергии рассчитываем по формуле (13.16). Длина участка между осями станций (A и B) – 19,5 км (см. рис. 1). Тогда имеем:

$$a_т = \frac{1000 \cdot A}{s} = \frac{1000 \cdot 1056}{19{,}5 \cdot 3150} = 17{,}2 \text{ Вт·ч/т·км}.$$

7. Проверка нагревания тяговых электродвигателей

7.1. Расчет выполняем аналитическим методом, рассмотренным в разделе 12.2, по формуле (12.2) с учетом ограничения $\Delta t/T \leq 0{,}1$. Значения времени при каждом среднем токе берем из кривой t(s) или из таблицы 3. Нужно иметь в виду, что при токе $I_д = 0$ температура тяговых электродвигателей снижается. Для определения тока, потребляемого каждым электродвигателем, используем кривую тока $I_э(s)$ или таблицу 3, деля значения тока $I_э$ на число параллельных ветвей

электродвигателей. На С – соединении $I_э = I_д$; на СП – $I_э/2$; на П – $I_э/4$. Все данные сводим в таблицу 4.

7.2. По среднему току $I_{дср}$ определяем значение □□из рис. 12.3. Значение Т для тягового электродвигателя ТЛ-2К равно 20 мин. На первом отрезке кривой скорости $I_{д1}$ = 685 А; $I_{д2}$ = 595 А, следовательно, $I_{дср}$ = 640 А. Для этого тока из рис. 12.3 □□= 270 °С. Время движения при этом токе Δt = 0,4 мин (из графика t(s)).

7.3. Начальное превышение температуры электродвигателей условно принимаем равным 15 °С. Для каждой последующей строки расчета начальное значение превышения температуры □$_0$ берем как конечное значение □ в предыдущей строке.

Тогда на первом отрезке скорости получим: □t □1□ □t □ □ 270□

0,4

□15□□ □1□ 0,4 □ □ 20,10 °С.

□ □ □□ □ □ □$_0$ □□

T □ T □ 20 □ 20 □

Данные и результаты расчета сведены в таблицу 4. На участке кривой тока 20-21 величина Δt/T оказалась больше 0,1; поэтому он разбит на две части (по 1,15 мин). Поскольку электровоз работает под нагрузкой непрерывно только на первом перегоне, проверку нагревания ограничим этим участком.

Таблица 4

Участок кривой тока (см. рис. 1)	$I_{дср}$	Δt	□□	Δt/T	□t □□ T	□ □t □$_0$□1□ □□ □ T □	□
	А	мин	°С	-	°С	°С	°С
1 – 2	640	0,4	270	0,020	5,40	14,70	20,10
3 – 4	585	0,45	205	0,0225	4,61	19,65	24,25
5 – 6	555	0,95	180	0,0475	8,55	23,11	31,66
6 – 7	513,5	0,1	150	0,005	0,75	31,50	32,25
8 – 9	567,5	0,2	190	0,010	1,90	31,93	33,83
10 – 11	617,5	0,3	235	0,015	3,53	33,32	36,84
12 – 13	650	0,3	285	0,015	4,28	36,29	40,57
13 – 14	563,7	0,7	185	0,035	6,48	39,15	45,62
14 – 15	493,7	0,4	130	0,020	2,60	44,71	47,31
15 – 16	442,5	0,4	105	0,020	2,10	46,36	48,46
16 – 17	442,5	0,45	105	0,0225	2,36	47,37	49,74
17 – 18	493,8	0,45	130	0,0225	2,93	49,74	51,54

18 – 19	558,8	0,7	180	0,035	6,30	50,94	56,04
19 – 20	613,8	0,7	230	0,035	8,05	54,08	62,13
20 – 21	632,5	1,15	255	0,0575	14,66	58,55	73,22
		1,15	255	0,0575	14,66	69,01	83,67
21 – 22	577,5	0,2	195	0,010	1,95	82,83	84,78
22 – 23	493,8	0,2	105	0,010	1,30	83,93	85,23
23 – 24	410	0,3	90	0,015	1,35	83,95	85,30

В результате расчетов получаем наибольшее превышение температуры электродвигателя ТЛ-2К над температурой окружающей среды, равное 85,3 °С. Приведем ее к расчетной температуре по формуле (12.4). Коэффициент $к_{сз}$ летом равен 1, коэффициент $к_{нв}$ берем из таблицы 12.2. При заданной расчетной температуре $t_{нв}$ = 20 °С получим для обмотки полюсов $к_{нв}$ = 0,98. Тогда, получим:

$$\tau_р = \tau к_{сз} к_{нв} = 85,3 \cdot 1,0 \cdot 0,98 = 83,6 \ ^{o}С.$$

Это превышение температуры ниже допустимой $\tau_{доп}$ = 130 °С (см. табл. 12.1). Следовательно, по условиям использования мощности (нагреванию) тяговых электродвигателей состав массой 3150 т можно провести по заданному участку АВ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ПРИМЕР ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Задание. Даны два перегона (АБ) и (БВ) участка со спрямленным и приведенным профилем пути (рис. 3), обслуживают электровозы ВЛ80С массой 192 т. Тяговые характеристики локомотива изображены на рисунке 4.12. На участке, имеющем звеньевой путь, обращаются грузовые составы, состоящие из четырехосных вагонов на роликовых подшипниках со средней массой 60 тонн и восьмиосных вагонов со средней массой 144 тонны. Процентное соотношение вагонов в составе (по массе): четырехосных вагонов на роликовых подшипниках $p_{4р}$ = 75 % и восьмиосных вагонов p_8 = 25 %. Поезд следует по участку от станции (А) к станции (В) без остановок. Наибольшую скорость движения по участку условно примем 80 км/ч. Расчетный тормозной коэффициент принимаем $\theta_р$ равным 0,34.

Постоянно действующих предупреждений о снижении скорости движения нет.

Требуется:

- определить массу состава;
- построить диаграммы удельных ускоряющих сил в режиме тяги;
- построить диаграммы удельных замедляющих сил при выбеге и служебном торможении;
- построить кривые скорости и времени в функции пути;

• определить общий и удельный расход электрической энергии на тягу поез-
да;

• определить температуру обмоток тяговых электродвигателей при работе с составом рассчитанной массы, для оценки использования мощности в летних условиях при расчетной температуре + 20 °С.

Решение. Поскольку задан уже спрямленный и приведенный профиль (см. рис. 3), спрямление профиля пути здесь не рассматриваем (оно изложено в приложении 1).

1.Определение массы состава

1.1. В результате анализа профиля пути, как указано в разделе 9.1 (см. рис. 3), находим, что наиболее тяжелым для тяги поезда является элемент 4 с подъемом i = 12,9 ‰ и длиной 5850 м, перед которым расположены подъемы 10 и 6,1 ‰ . На этих подъемах развить большую скорость и создать запас кинетической энергии не удастся. Поэтому подъем 12,9 ‰ принимаем за расчетный.

Массу состава определяем из условия движения по расчетному подъему с установившейся скоростью (см. раздел 9.2) по формуле (9.2). Расчетные силу тяги $F_{кр}$ и скорость $v_р$ для электровоза ВЛ80С берем из таблицы 9.1. На 29-й позиции $F_{кр}$ = 501 кН, $v_р$ = 43,4 км/ч.

1.2. Удельное основное сопротивление движению при работе под током рассчитываем по формуле (6.1). При $v_р$ = 43,4 км/ч, получим:

$$w_0 = 1{,}9 + 0{,}01v + 0{,}0003v^2 = 1{,}9 + 0{,}01 \cdot 43{,}4 + 0{,}0003 \cdot 43{,}4^2 = 2{,}90$$

$Н_{кН}$.

Удельное основное сопротивление движению каждого типа вагонов при скорости 43,4 км/ч определяем по формулам из раздела 6.2. Для четырехосных вагонов на роликовых подшипниках расчет выполняем по формуле (6.13). При $m_{во4р} = m_{в4р}/4$ = 15 т., равно:

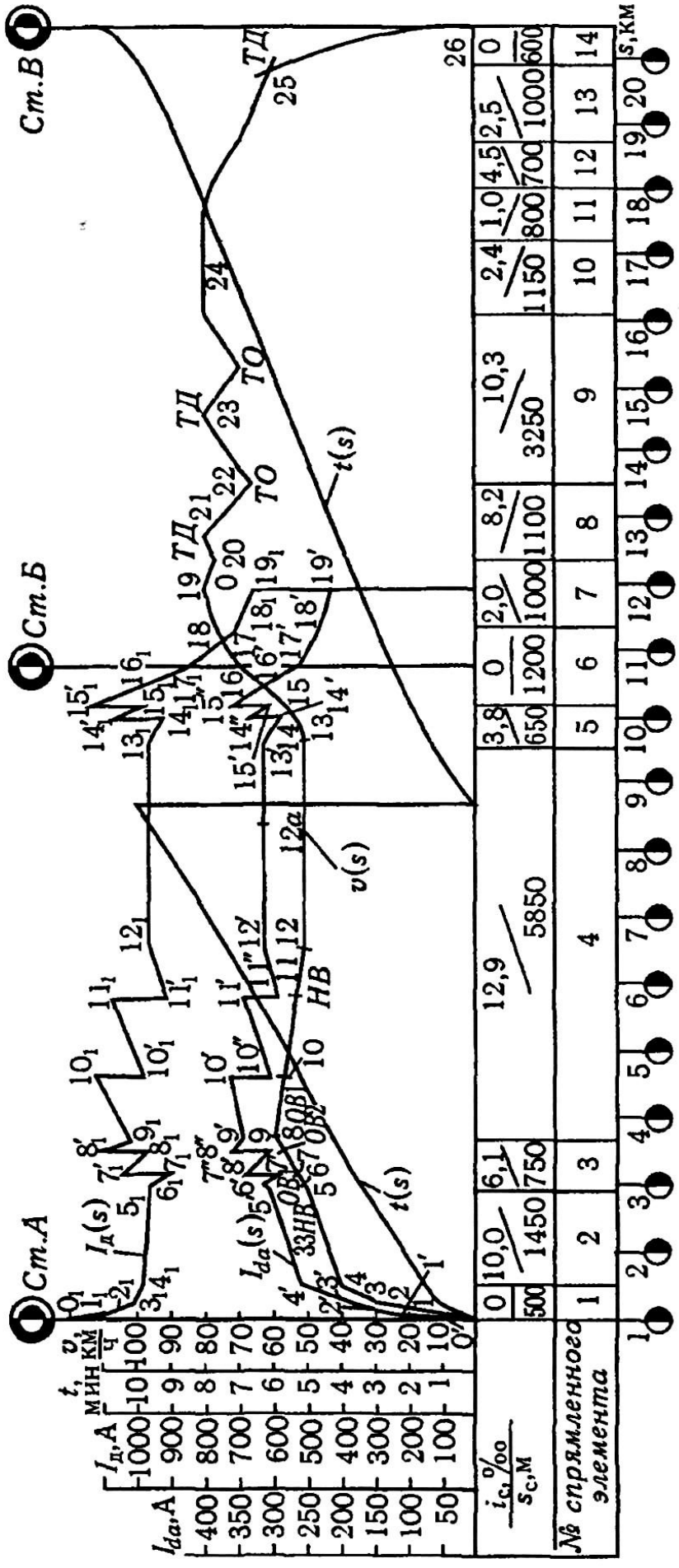


Рис. 3. График тяговых расчетов на участке переменного тока

w_{04} $_{р}$ 0,7 _____ 3 0,1 $vm_{во}$ 0,4 0025 v^2 0,7

_____ 3 0,1 43,4 150,0025 43,4^2 1,50 Нкн.

Для восьмиосных вагонов расчет проводим по формуле (6.14). Масса, приходящаяся на ось, $m_{во8} = m_{в8}/8 = 18$ т. Тогда, имеем:

w_{08} 0,7 _____ 6 0,038 $mv_{во}$ $_{8}$ 0,0025 v^2 0,7

_____ 6 0,038 43,418 0,0021 43,4^2 1,38 Нкн.

Удельное основное сопротивление движению состава при скорости движения 43,4 км/ч определяем в соответствии с разделом 6.3 по формуле (6.35):

w_{0} P_4 w_{04} 100 $_{р}$ P_8 w_{08} 75 1,50 100 25 1,38

1,47 Нкн.

1.3. Масса состава равна:

m_c $F_{кр}$ $m_{л}$ g w_0 i_P 501000 192 9,81 2,90 12,9 3342 т.

g w_0 i_P 9,81 1,47 12,9

Округляем массу состава до 3350 тонн.

1.4. Проверяем полученную массу состава по условиям трогания поезда в соответствии с разделом 9.4 на остановочных пунктах при i = 0 по формуле (9.5). Силу тяги электровоза ВЛ80С при трогании берем из табл. 9.1 – $F_{ктр}$ = 677,8 кН. Удельное основное и дополнительное сопротивление состава при трогании определяем для четырехосных и восьмиосных вагонов на роликовых подшипниках по формуле (6.53):

для четырехосных вагонов на роликовых подшипниках:

$w_{4трр}$ 28 28 1,27 Н ; $m_{во4р}$ 7 15 7 кН

для восьмиосных вагонов –

$w_{8тр}$ 28 28 1,12 Н . $m_{во8}$ 7 18 7 кН

Удельное основное и дополнительное сопротивление при трогании состава рассчитываем по формуле (6.35):

$$w_{тр} = \frac{p_{4p} \cdot w_{4тр}}{100} + \frac{p_8 \cdot w_{8тр}}{100} = \frac{75 \cdot 1{,}27}{100} + \frac{25 \cdot 1{,}12}{100} = 1{,}23 \text{ Н/кН}.$$

Масса состава по условиям трогания на станции:

$$m_{стр} = \frac{F_{кртр}}{g \cdot (w_{тр} + i)} - m_л = \frac{677800}{9{,}81 \cdot (1{,}23 + 0)} - 192 = 55981 \text{ т};$$

т.е. $m_{стр} > m_c$, следовательно, состав массой 3350 т можно взять с места на остановочных пунктах участка (при i = 0).

2. Расчет и построение диаграммы удельных ускоряющих сил

2.1. Расчет удельных сил сопротивления движению состава при различных скоростях движения выполняем на основании удельных сил сопротивления вагонов различных типов, определяемых по формулам (6.13…6.14). Например, при скорости v = 20 км/ч:

$$w_{04} = 0{,}7 + \frac{3 + 0{,}1v + m_{BO}(0{,}4 + 0025v^2)}{3 + 0{,}1 \cdot 20 + 15(0{,}0025 \cdot 20^2)} + 1{,}10 \text{ Н/кН};$$

$$w_{08} = 0{,}7 + \frac{6 + 0{,}038v + 18(0{,}0021v^2)}{6} + 1{,}12 \text{ Н/кН}.$$

Удельное основное сопротивление движению состава при v = 20 км/ч определяем по формуле (6.35):

$$w_0 = \frac{P_4 \cdot w_{04}}{100p} + \frac{P_8 \cdot w_{08}}{100} = \frac{75 \cdot 1{,}10}{100} + \frac{25 \cdot 1{,}12}{100} = 1{,}11 \text{ Н/кН}.$$

Результаты расчетов при скоростях, кратных 10 км/ч, расчетной скорости, скоростях выхода на характеристику 33-й позиции (49,5 км/ч) и перехода на характеристики ослабленного возбуждения (51,5 и 54,5 км/ч) заносим в таблицу 5.

Таблица 5

Режим	v, км/ч	w''_0, Н/кН	w''_{04}, Н/кН	w''_{08}, Н/кН	w'_0, Н/кН	w_0, Н/кН	$F_к$, кН	$f_к$, Н/кН	$f_у - f_к$, Н/кН
Разгон	0	2,03	0,983	1,07	1,00	1,06	678	19,5	18,6
	10	2,03	0,983	1,07	1,00	1,06	584	16,8	15,8
	20	2,22	1,10	1,12	1,11	1,17	551	15,9	14,6
	30	2,47	1,25	1,20	1,24	1,31	526	15,1	13,8
	40	2,93	1,43	1,30	1,40	1,48	509	14,6	13,2
	49,5	3,13	1,54	1,42	1,58	1,66	491	14,1	12,5
НВ	51,5	3,23	1,69	1,45	1,63	1,72	541	13,0	11,3
	60	3,58	1,90	1,58	1,82	1,92	292	8,41	6,49
	70	4,07	2,18	1,75	2,08	2,19	188	5,42	3,23
	80	4,62	2,50	1,95	2,36	2,48	130	3,75	1,27
	90	5,23	2,85	2,17	2,68	2,82	94,6	2,72	- 0,10
	100	5,90	3,23	2,41	3,03	3,18	74,0	2,13	- 1,06
ОВ1	51,5	3,23	1,69	1,45	1,63	1,72	526	15,1	13,4
	54,5	3,39	1,76	1,49	1,69	1,78	457	13,2	11,4
	60	3,58	1,90	1,58	1,82	1,92	350	10,1	8,16
	70	4,07	2,18	1,75	2,08	2,19	243	7,00	4,81
	80	4,62	2,50	1,95	2,36	2,48	182	5,25	2,77
	90	5,23	2,85	2,17	2,68	2,82	141	4,10	1,25
	100	5,90	3,23	2,41	3,03	3,18	109	3,13	0,05
ОВ2	54,5	3,39	1,76	1,49	1,69	1,78	514	14,8	13,0
	60	3,58	1,90	1,58	1,82	1,92	424	12,2	10,3
	70	4,07	2,18	1,75	2,08	2,19	296	8,52	6,33
	80	4,62	2,50	1,95	2,36	2,48	218	6,27	3,78
	90	5,23	2,85	2,17	2,68	2,82	170	4,88	2,06
	100	5,90	3,23	2,41	3,03	3,18	134	3,87	0,68

2.2. Удельное основное сопротивление движению электровоза в режиме тяги рассчитываем по формуле (6.1). Так, для v = 20 км/ч: $w''_0 = 1{,}9 + 0{,}01v + 0{,}0003v^2 = 1{,}9 + 0{,}01 \cdot 20 + 0{,}0003 \cdot 20^2 = 2{,}22$ Н/кН.

2.3. Удельное основное сопротивление движению поезда определяем по формуле (6.38). Для v = 20 км/ч: $w_0 = \dfrac{w''_0 \cdot m_л + w'_0 \cdot m_c}{m}$ = $\dfrac{2{,}22 \cdot 1923542 + 1{,}11 \cdot 3350}{}$ = 1,17 Н/кН.

2.4. Удельные силы тяги при различных скоростях определяем по формуле (1.2). Силу тяги берем из тяговых характеристик электровоза ВЈ180С (см. рис. 4.12). Так, для скорости v = 20 км/ч сила тяги $F_к$ = 549 кН:

$$F^к = \frac{549000}{}$$

$f_к$ □ □ □15,81 Н/кН . m□g 3542 □9,81

2.5. Удельные ускоряющие силы в режиме тяги (при v = 20 км/ч) определяем по формуле: f_y □ $f_к$ □ w_0 □15,81□1,17 □14,64 Н/кН .

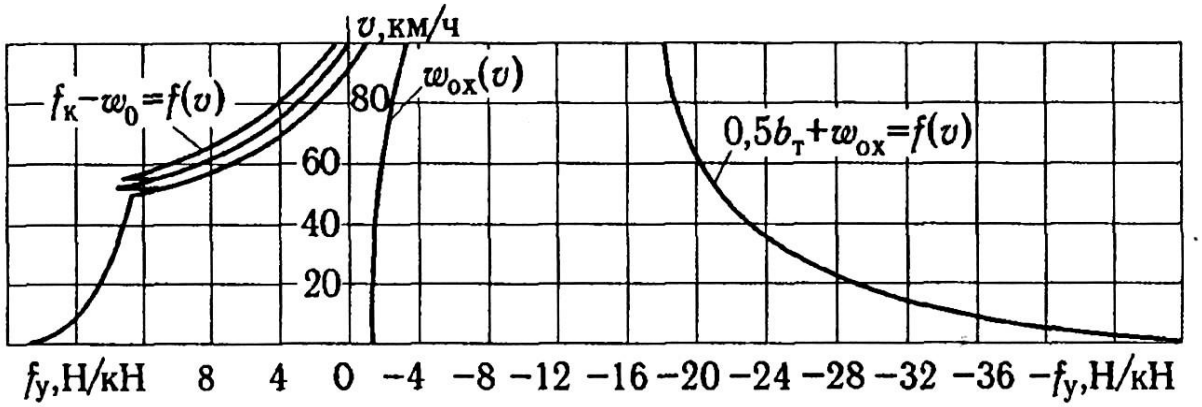


Рис. 4. Диаграмма удельных ускоряющих и замедляющих сил поезда массой состава 3350 т на участке переменного тока

Результаты всех расчетов по пунктам 2.1...2.5 приведены в таблице 5 и по ним построена диаграмма удельных ускоряющих сил (рис. 4) в масштабе, взятом из таблицы 8.4.

3. Построение диаграммы удельных замедляющих сил при выбеге и механическом торможении

3.1. Удельное основное сопротивление движению электровоза при движении без тока определяем по формуле (6.2) или берем из таблицы 6.1. Например, при 20 км/ч: w_X □ 2,4 □ 0,011□V □ 0,00035 □V^2 □ 2,4 □ 0,011□20 □ 0,00035 □20^2 □ 2,76 Н/кН. Удельное основное сопротивление движению состава берем из таблицы 5.

3.2. Удельное основное сопротивление движению поезда при работе электровоза без тока рассчитываем по формуле (6.40). Так, для v = 20 км/ч, имеем:

$$f_з \square w_{ox} \square \frac{w_x \square m_л \square w\square_0 \square \square m_c}{m} \square \frac{2{,}76\square 192 \square 1{,}11\square 3350}{184 \square 3150} \square 1{,}20 \text{ Н/кН}.$$

3.3. Удельные тормозные силы (см. раздел 7.3) рассчитываем на основании расчетного коэффициента трения чугунных колодок о колеса подвижного состава, определяемого по формуле (7.8) или взятого из табл. 7.2 и заданного расчетного тормозного коэффициента □$_р$ □ 0,34. При v = 20 км/ч, получим:

$$\square_{кр} \square 0{,}27\square \frac{100 \square V}{100 \square 5V} \square 0{,}27\square \frac{100 \square 20}{100 \square 5\square 20} \square 0{,}162 .$$

Удельную тормозную силу определяем по формуле (7.19). При v = 20 км/ч, получим: $b_т$ □1000 □□$_{кр}$ □□$_р$ □1000 □0,162□0,34 □ 55,08 Н/кН .

3.4. Удельные замедляющие силы при служебном торможении (для v = 20 км/ч) 0,5$b_т$ определяем по формуле: $f_{зс}$ □ w_{ox} □ 0,5$b_т$ □1,20 □ 0,5□55,08 □ 28,74 Н/кН.

Все результаты расчетов приведены в таблице 6 и по ним построены диаграммы удельных замедляющих сил при выбеге и служебном торможении в выбранных из табл. 8.4 масштабах (см. рис. 4).

Таблица 6

v	w□$_0$□	w_x	w_{ox}	□$_{кр}$	$b_т$	$f_{зс}$ □ w_{ox} □ 0,5$b_т$
км/ч	Н/кН	Н/кН	Н/кН	–	Н/кН	Н/кН
0	1,00	2,55	1,09	0,270	91,80	46,99
10	1,00	2,55	1,09	0,198	67,32	34,75
20	1,11	2,76	1,20	0,162	55,08	28,74
30	1,24	3,05	1,34	0,140	47,74	25,20
40	1,40	3,40	1,51	0,126	42,84	22,93
50	1,60	3,83	1,72	0,116	39,34	21,39
60	1,82	4,32	1,96	0,108	36,72	20,32
70	2,08	4,89	2,23	0,102	34,68	19,57
80	2,36	5,52	2,53	0,097	33,05	19,06
90	2,68	6,23	2,87	0,093	31,71	18,73
100	3,03	7,00	3,24	0,090	30,60	18,54

4. Построение кривых скорости и времени в функции пути

4.1. Кривые скорости и времени в функции пути строим в соответствии с разделами 8.6 и 8.7 по диаграмме удельных ускоряющих и замедляющих сил с учетом масштабов, выбираемых по табл. 8.4. Принимаем следующие интервалы скоростей Δv: не более 10 км/ч – при разгоне в режиме тяги, выбеге и торможении при v > 50 км/ч; не более 5 км/ч – при работе по характеристикам НВ, ОВ1, ОВ2 и торможении в зоне скоростей v < 50 км/ч. В каждом интервале скоростей Δv определяем $v_{ср}$ и среднее значение удельной ускоряющей или замедляющей силы. Используя линейку и угольник, строим отрезки кривой v(s) в каждом интервале скоростей с учетом профиля пути. Построенная кривая v(s) показана на рисунке 3. В процессе построения на нее наносим отметки об изменении режима (НВ, ОВ1, ОВ2), отключении тока (О), включении механических тормозов (ТД – тормоза действуют) и отпуске (ОТ), а начало и конец каждого построенного отрезка обозначаем цифрами 1...26.

Режим изменяем в зависимости от условий движения поезда с возможно большей скоростью и с учетом рационального расхода электрической энергии. На

перегоне (АБ) идут подъемы, поэтому локомотив работает в режиме тяги. На первых трех элементах скорость движения возрастает с выходом на 33-ю позицию со степенью ослабления возбуждения ОВ2. На расчетном подъеме скорость снижается.

Затем на элементах 5, 6 и 7 профиля пути скорость снова возрастает. Перед спусками на элементах 8...11 в середине элемента 7 переходим на выбег. На элементах 8 и 9 вынуждены включить тормоза, чтобы не превысить допустимую скорость (80 км/ч). Чередовать торможение и отпуск нужно таким образом, чтобы в конце крутого спуска i = – 10,3 ‰ поезд достиг допустимой скорости. В этом случае потери в тормозах будут меньше, а запас кинетической энергии в поезде наибольший.

Перед остановкой поезда на станции (В) построение ведем в обратном порядке (от точки 26 к точке 25). Пересечение этой линии с линией движения на выбеге в прямом направлении и дает точку 25, в которой должны начать действовать тормоза (см. рис. 3).

4.2. Кривую времени в функции пути строим в соответствии с разделами 8.6 и 8.7. Взяв из табл. 8.4 величину Δ при выбранном масштабе пути, строим отрезки кривой времени в пределах Δs. Для уменьшения размеров чертежа по вертикали кривую t(s) строим частями по 10 минут. Из построенной на рисунке 3 кривой t{s) видно, что время хода по перегону (АБ) составляет 12,5 мин, по перегону (БВ) – 8,6 мин, а по участку (АВ) – 21,1 мин (в конце участка кривая t(s) проведена вместо 10 мин до 11,1 мин). Эти данные можно использовать для составления графика движения поездов.

5. Построение кривых тока

5.1. Зависимость тока тягового электродвигателя от пройденного пути $I_д(s)$ строим в соответствии с разделом 11.3 по токовым характеристикам электродвигателя НБ-418К (см. рис. 11.3, а) и кривой скорости v(s). Значения тока $I_д$ определяем для точек излома кривой скорости v(s) и скоростей, соответствующих изменениям режима движения (переход на ослабленное возбуждение и обратно), отмеченных цифрами на рис. 3. При v = 0 ток $I_д$ = 1230 А, при v = 10 км/ч ток $I_д$ = 1105 А и т.д. Эти токи откладываем в точках пути, где v = 0, v = 10 км/ч и т.д. Соединив полученные точки отрезками прямых линий, получим зависимость $I_д$ (s).

5.2. Зависимость активной составляющей тока электровоза ВЛ80С в функции пути строим на основании раздела 11.3 по токовым характеристикам $I_{da}(v)$ (см. рис. 11.8) и кривой v(s). Токи определяем для точек излома кривой скорости от точки 0 до точки 19 и откладываем в тех точках пути, где поезд движется с этими скоростями. При v = 0 ток I_{da} = 46,3 А (точка 0' на рис. 3), при v = 10 км/ч, I_{da} = 93 А (точка 1' на рис. 3) и т.д.

Полученные точки нумеруют от 0' до 19'. Соединив их, получаем график $I_{da}(s)$.

6. Определение расхода электрической энергии

6.1. Расход электрической энергии рассчитываем в соответствии с разделом 13.2, исходя из кривой тока $I_{da}(s)$. Средний ток при изменении его от одной точки до соседней определяем как среднее арифметическое между начальным I_{dan} и конечным I_{dak} значениями. Из кривой t(s) берем время, в течение которого электровоз потребляет ток I_{dacp}.

Расход электрической энергии рассчитываем без учета колебаний напряжения ($к_U = 1$) по формуле (13.2):

$$A_т = \frac{U_c \cdot к_U \cdot I_{dacp} \cdot t}{60 \cdot 1000}.$$

При $к_U = 1$ и $U_c = 25\,000$ В, получим: $A_т = \frac{U_c \cdot к_U \cdot I_{dacp} \cdot t}{60 \cdot 1000}$, кВт·ч.

При изменении скорости от 0 до 10 км/ч ток изменяется от $I_{dan} = 46{,}3$ А (точка 0' на рис. 3) до $I_{dak} = 93$ А (точка 1'). Средний ток равен:

$$I_{dacp} = \frac{I_{dan} + I_{dak}}{2} = \frac{46{,}3 + 93{,}0}{2} = 69{,}7 \text{ А}.$$

Время, в течение которого протекает средний ток 69,7 А; $\Delta t = 0{,}5$ мин, следовательно, $I_{dacp} \cdot \Delta t = 69{,}7 \cdot 0{,}5 = 34{,}8$ А · мин. Все результаты расчетов сводим в таблицу 7. По данным табл. 7 получаем: $\sum(I_{dacp} \cdot \Delta t) = 3771{,}9$ А · мин. Следовательно, получим:

$$A_т = \frac{25000 \cdot 1 \cdot 3771{,}9}{60 \cdot 1000} = 1571{,}6 \text{ кВт·ч}.$$

Таблица 7

Участок кривой тока (см. рис. 1)	$I_{da_н}$	$I_{da_к}$	$I_{da_{ср}}$	Δt	$I_{эср} \cdot \Delta t$
	А	А	А	мин	А·мин
0–1	46,3	93	69,7	0,5	34,8
1–2	93	145	119,0	0,3	35,7
2–3	145	195	170,0	0,3	51,0
3–4	495	250	222,5	0,4	89,0

4□ □ 5□	250	284	267,0	1,9	507,3
5□ □ 6□	284	300	292,0	0,1	29,2
6□ □ 7□	300	284	292,0	0,15	43,8
7□□ □8□	332	302	317,0	0,35	111,0
8□□ □ 9□	360	320	340,0	0,2	68,0
9□ □10□	320	360	340,0	0,9	306,0
10□□ □11□	302	332	317,0	1,4	443,8
11□□□12□	284	300	292,0	0,7	204,4
12□ □13□	300	300	300,0	4,5	1350,0
13□ □14□	300	284	292,0	0,4	116,8
14□ □15□	332	302	317,0	0,4	126,8
15□ □16□	360	315	337,5	0,2	67,5
16□□ □17□	315	290	302,5	0,3	90,8
17□□ □18□	290	230	260,0	0,2	52,0
18□□ □19□	230	210	220,0	0,2	44,0
			Всего	13,4	3771,9

6.2. Расход электрической энергии на собственные нужды электровоза ВЛ80С рассчитываем (см. раздел 13.5), исходя из потребляемой вспомогательными машинами энергии за 1 мин 5,5 кВт·ч (см. табл. 13.2) и работы в течение всего времени хода поезда t = 21,1 мин. Следовательно, получим:

$$A_{сн} \square 5{,}5 \square 21{,}1 \square 116{,}0 \text{ кВт} \square \text{ч}.$$

6.3. Расход электрической энергии электровозом с учетом собственных нужд: А □ $A_т$ □ $A_{сн}$ □1571,6□116,0 □1687,6 кВт□ч. 6.4. Удельный расход электроэнергии определяем в соответствии с разделом 13.5 по формуле (13.16) с учетом собственных нужд. Длина участка s = 19,5 км (см. рис. 3). Тогда, получим:

$$a_т \square \frac{1000 \square A}{\square \square 25{,}83} \frac{1000 \square 1687{,}6}{\text{Вт} \square \text{ч/т} \square \text{км.}} \; m_c \square s \; 3350 \square 19{,}5$$

Без учета собственных нужд (по формуле (13.15)) –

$$a \square \frac{1000 \square A}{\square \square 24{,}06} \frac{1000 \square 1571{,}6}{\text{Вт} \square \text{ч/т} \square \text{км.}} \; m_c \square s \; 3350 \square 19{,}5$$

7. Проверка нагревания тяговых электродвигателей

7.1. Превышение температуры обмоток тяговых электродвигателей над температурой окружающего воздуха определяем аналитическим методом в

соответствии с разделом 12.2 по формуле (12.2), учитывая их работу не только в режиме тяги (под током), но и без тока, когда обмотки охлаждаются. Средние значения токов $I_{дср}$ определяем, исходя из начального $I_{дн}$ и конечного $I_{дк}$ токов, которые берем из кривой $I_д(s)$.

Таблица 8

Участок кривой тока (см. рис. 3)	$I_{дн}$	$I_{дк}$	$I_{дср}$	Δt	□□	$\Delta t/T$	□t □□ — T	□ □t □0□1□— □ T □	□
	А	А	А	мин	°С	-	°С	°С	°С
$0_1 – 1_1$	1230	1105	1167,5	0,5	210	0,0217	4,56	14,67	19,23
$1_1 – 2_1$	1105	1040	1072,5	0,3	170	0,0130	3,69	18,81	22,90
$2_1 – 3_1$	1040	1010	1025	0,3	156	0,0130	2,03	22,21	24,24
$3_1 – 4_1$	1010	990	1000	0,4	150	0,0174	2,61	23,81	26,43
$4_1 – 5_1$	990	955	972,5	1,9	143	0,0826	11,81	24,24	36,06
$5_1 – 6_1$	955	960	957,5	0,1	140	0,0043	6,02	35,90	36,50
$6_1 – 7_1$	960	910	935	0,15	135	0,0065	8,76	36,27	37,14
$7_1 – 8_1$	1060	960	1010	0,35	153	0,0152	2,33	36,58	38,91
$8_1 – 9_1$	1120	1015	1067,5	0,2	169	0,0087	1,47	38,57	40,04
$9_1 – 10_1$	1015	1120	1067,5	0,9	169	0,0391	6,61	38,47	45,08
$10_1 – 11_1$	960	1060	1010	1,4	153	0,0609	9,32	42,33	51,65
$11_1 – 12_1$	910	960	935	0,7	135	0,0304	4,10	50,08	54,19
$12_1 – 12_a$	960	960	960	2,2	141	0,0960	13,54	48,99	62,52
$12_a – 13_1$	960	960	960	2,3	141	0,1000	14,10	56,27	70,37
$13_1 – 14_1$	960	910	935	0,4	135	0,0174	2,35	69,15	71,49
$14_2 – 15_1$	1060	960	1010	0,4	153	0,0174	2,66	70,25	72,91
$15_2 – 16_1$	1120	990	1055	0,2	164	0,0087	1,43	72,28	73,71
$16_1 – 17_1$	990	770	880	0,3	115	0,0130	1,50	72,75	74,24
$17_1 – 18_1$	770	700	735	0,2	90	0,0087	0,78	73,60	74,38
$18_1 – 19_1$	700	6500	675	0,2	82	0,0087	0,71	73,73	74,44
19 – 20	0	0	0	0,3	0	0,0130	0	73,48	73,48
20 – 21	0	0	0	0,4	0	0,0174	0	72,52	72,52
21 – 22	0	0	0	0,3	0	0,0130	0	71,58	71,58
22 – 23	0	0	0	0,6	0	0,0261	0	69,71	69,71
23 – 24	0	0	0	2,0	0	0,0869	0	63,73	6373
24 – 25	0	0	0	2,3	0	0,1000	0	57,35	57,35
25 – 26	0	0	0	1,8	0	0,0783	0	52,86	52,86

Для точек кривой скорости 0 – 1 получаем: $I_{дн}$ = 1230 А (точка 0_1), $I_{дк}$ = 1105 А (точка 1_1). Ток $I_{дср}$ равен:

$$I_{дср} = (1230 + 1105)/2 = 1167,5 \text{ А}.$$

Время Δt берем из графика t(s). При работе под нагрузкой отрезки Δt = 0,5 мин можно взять из таблицы 7 (см. рис. 3).

По кривым □□□$I_д$□ для тягового электродвигателя НБ-418К (см. рис. 12.5) находим значения □□. Так, при $I_{дср}$ = 1167,5 А; □□ = 210 °С. Значение Т = 23 мин указано на рис. 12.5. При расчетах имеем в виду, что $\Delta t/T$ должно быть не более 0,1. Начальное превышение температуры условно принимаем □$_0$ □15 °С: □ □ □□ □

—□t □ □$_0$ □□□1□ —□t □□ □ 210□ —0,5 □15□□□1□ —0,5□□ □19,23 °С.

T □ T □ 23 □ 23 □

В каждой последующей строке расчета □$_0$ берем как значение □ в предыдущей. Данные и результаты расчета сведены в таблице 8. На участке 12_1 – 13_1 отношение $\Delta t/T$ = 4,5/23 оказалось больше 0,1; поэтому его разбили на два участка (Δt_1 = 2,2 мин и Δt_2 = 2,3 мин), добавив точку (12а). При $I_д$ = 0 (точки 22...26 на рис. 3) обмотки тягового электродвигателя охлаждаются, так как электровоз движется без тока (□□ □ 0). В этом случае используем формулу (12.3).

Наибольшее превышение температуры обмотки составляет 74,44 °С. Приведем его к расчетной температуре по формуле (12.4).

Коэффициент $к_{сз}$ летом равен 1, (коэффициент $к_{нв}$ берем из табл. 12.2.). При заданной расчетной температуре $t_{нв}$ = 20 °С получим для обмотки якоря: $к_{нв}$ = 0,99. Тогда, имеем:

□$_р$ □ □□$к_{сз}$ □$к_{нв}$ □ 74,44□1,0□0,99 □ 73,69 °С.

Это превышение температуры τ ниже допустимого, равного 120 °С. Следовательно, состав массой 3350 т по условиям использования мощности тяговых электродвигателей может быть проведен по участку (АВ).

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 ПРИМЕР ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ТЕПЛОВОЗА

Задание. Участок (АВ), имеющий звеньевой путь, со спрямленным и приведенным профилем, указанном на рисунке 5, обслуживается тепловозами 2ТЭ10В. Грузовые составы, обращающиеся на участке, состоят (по массе) из груженых четырехосных вагонов на роликовых подшипниках 60 %, порожних четырехосных – 10 % и восьмиосных вагонов – 30 %. Средние массы груженых вагонов принимаем: четырехосных на роликовых подшипниках – 74 т, восьмиосных – 160 т, порожних четырехосных – 20 т. Расчетный тормозной коэффициент □$_р$ □ 0,35 . Постоянно действующих предупреждений о снижении

скорости нет. Поезд следует от станции (А) до станции (В) без остановок. Наибольшую скорость движения по участку условно примем 80 км/ч.

Требуется:

♦ определить массу поезда;

♦ построить диаграммы удельных ускоряющих и замедляющих сил; решить уравнение движения поезда графическим методом с построением кривых скорости и времени в функции пути;

♦ определить общий и удельный расход топлива на тягу поезда; проверить нагревание тяговых электродвигателей в летних условиях при расчетной температуре 30 °С.

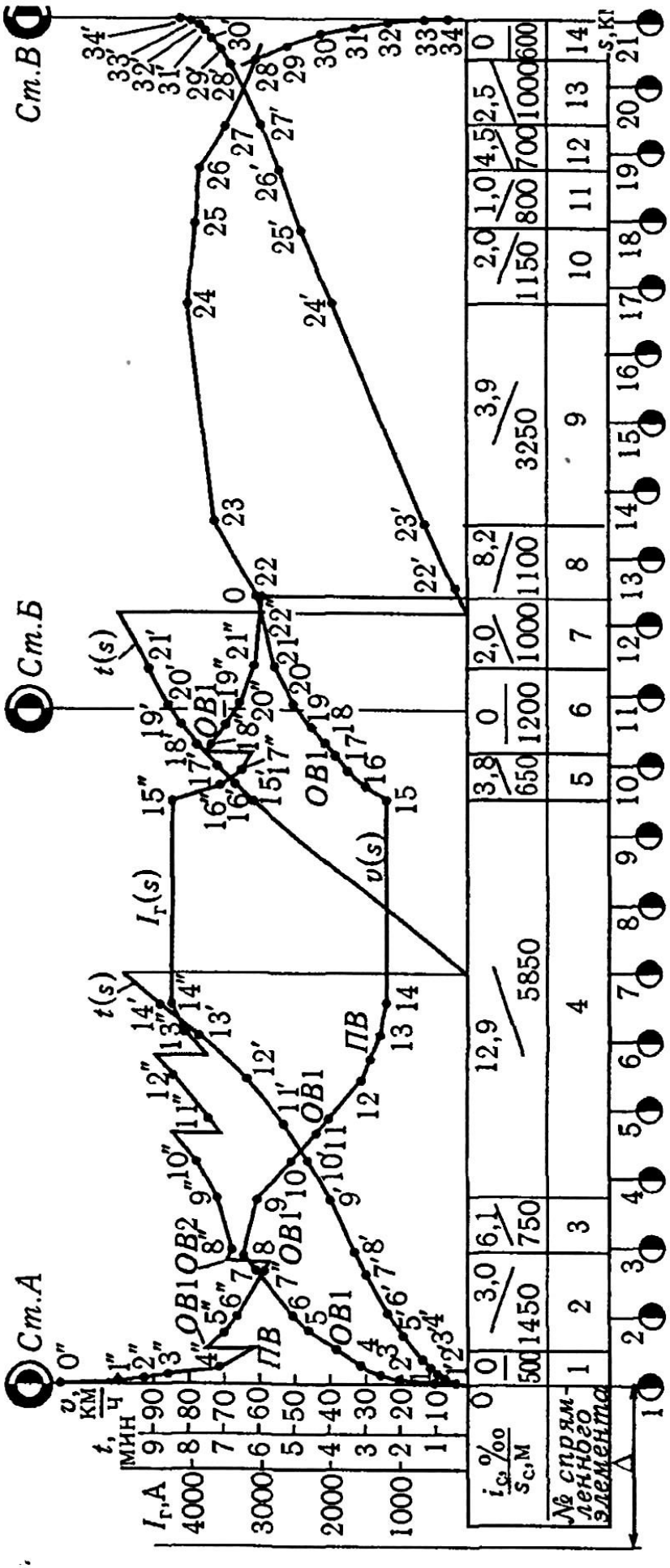


Рис. 5. График тяговых расчетов на участке АВ при тепловозной тяге

Решение. В связи с тем, что задан приведенный профиль пути, его обрабатывать не нужно. Спрямление и приведение профиля пути проводят в соответствии с разделом 8.4. Порядок спрямления изложен в приложении 1. На рисунке 5 показан профиль пути в масштабе, взятом из табл. 8.4.

1. Определение массы состава

1.1. Проанализировав профиль участка (АВ), как указано в разделе 9.1, приходим к выводу, что наиболее тяжелым является элемент 4. Он наиболее крутой (12,9 ‰) и протяженный (5850 м), а перед ним находится подъем 6,1 ‰, вследствие чего создать достаточный запас кинетической энергии за счет увеличения скорости движения поезда перед тяжелым подъемом не удастся. Расчет массы поезда проведем при условии движения поезда по расчетному подъему с установившейся расчетной скоростью. Расчетные силу тяги и скорость берем из таблицы 9.1. Для тепловоза 2ТЭ10В, имеем: $F_{кр}$ = 496 кН, $v_р$ = 23,4 км/ч.

1.2. Удельное основное сопротивление движению тепловоза при движении в режиме тяги при скорости $v_р$ рассчитываем по формуле (6.1) (см. раздел 6.2):

$$w_0 = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2 = 1,9 + 0,01 \cdot 23,4 + 0,0003 \cdot 23,4^2 = 2,30 \text{ Н/кН}.$$

Удельное основное сопротивление груженых четырехосных вагонов на роликовых подшипниках $w'_{04\,гр}$ рассчитываем по формуле (6.13). При $m_{о4гр}$ = 18,5 тонн и $v_р$ = 23,4 км/ч, получим:

$$w_{04\,гр} = 0,7 \cdot \frac{3 + 0,1v + m_{в04гр}0,0025v^2}{0,7 \cdot (0,1 \cdot 23,4 + 18 + 0,05 \cdot 0,0025 \cdot 23,4^2)} = 1,06 \text{ Н/кН}.$$

Удельное основное сопротивление порожних четырехосных вагонов на роликовых подшипниках $w''_{о4п}$ рассчитываем по формуле (6.16):

$$w_{04\,п} = 1,0 + 0,044v + 0,00024v^2 = 1,0 + 0,044 \cdot 23,4 + 0,00024 \cdot 23,4^2 = 2,16 \text{ Н/кН}.$$

Удельное основное сопротивление движению восьмиосных вагонов определяем по формуле (6.14). При $v_р$ = 23,4 км/ч и массе, приходящейся на ось, $m_{во8}$ = 20 тонн, равно: $w_{08} = 0,7 \cdot \frac{6 + 0,038mv_{во8} + 0,0025v^2}{0,7 \cdot (6 + 0,038 \cdot 23,4 \cdot 20 + 0,0021 \cdot 23,4^2)} = 1,10$ Н/кН.

Удельное основное сопротивление движению состава рассчитываем по формуле (6.35) (см. раздел 6.3):

$$w_0 = \frac{P_{4п} \cdot w_{04п} + P_{4гр} \cdot w_{04гр} + P_8 \cdot w_{08}}{P_{4п} + P_{4гр} + P_8} = \frac{10 \cdot 2{,}16 + 60 \cdot 1{,}06 + 30 \cdot 1{,}10 + 1{,}18}{100} \text{ Нк/Н}.$$

1.3. Массу состава при установившейся скорости движения определяем по формуле (9.2). Из табл. 7.3 находим: $m_л$ = 276 т, из табл. 9.1 – $F_{кр}$ = 496 кН. Тогда, получим:

$$m_c = \frac{F_{кр} - m_л g (w_0 + i_р)}{g (w_0 + i_р)} = \frac{496000 - 276 \cdot 9{,}81 \cdot (2{,}30 + 12{,}9)}{9{,}81 \cdot (1{,}18 + 12{,}9)} = 3293 \text{ т}.$$

Округляем массу состава до 3300 т.

1.4. Проверяем полученную массу состава по условиям трогания поезда в соответствии с разделом 9.3 на остановочных пунктах (при i = 0) по формуле (9.5). Силу тяги при трогании тепловоза 2ТЭ10В берем из табл. 9.1: $F_{ктр}$ = 797 кН.

Удельное основное и дополнительное сопротивление состава при трогании определяем для вагонов на роликовых подшипниках по формуле (6.52):

для восьмиосных вагонов –

$$w_{8тр} = m_{во} 28_8 / 7 = 2028 / 7 = 1{,}04 \text{ Нк/Н};$$

для груженых четырехосных вагонов –

$$w_{4тргр} = m_{во} 28_{4гр} / 7 = 18{,}285 / 7 = 1{,}10 \text{ Нк/Н};$$

для порожних четырехосных вагонов –

$$w_{4трп} = m_{во} 28_{4п} / 7 = 528 / 7 = 2{,}33 \text{ Нк/Н}.$$

Удельное основное сопротивление состава при трогании рассчитываем по формуле (6.35):

$$w_{тр} = \frac{p_{4п} \cdot w_{4трп} + p_{4гр} \cdot w_{4тргр} + p_8 \cdot w_{8тр}}{p_{4п} + p_{4гр} + p_8} = \frac{10 \cdot 2{,}33 + 60 \cdot 1{,}10 + 30 \cdot 1{,}04}{100} = 1{,}20 \text{ Нк/Н}.$$

Массу состава по условиям трогания поезда на остановочных пунктах при (i = 0) определяем по формуле (9.5):

$$m_{стр} = \frac{F_{кртр}}{g(w_{тр} + i)} = \frac{797800}{9{,}81(1{,}20 + 0)} = 276 \text{ т};$$

Поскольку $m_{стр} > m_c$, тепловоз 2Т310В может взять состав массой 3300 т с места на остановочных пунктах.

2. Расчет и построение диаграммы удельных ускоряющих сил

2.1. Удельные силы основного сопротивления движению состава определяем, исходя из удельного основного сопротивления вагонов различных типов. Рассчитываем их следующим образом:

для восьмиосных по формуле (6.14), например для скорости 40 км/ч –

$$w_{08} = 0{,}7 + \frac{6 + 0{,}038 m_{vBO} + 8 \cdot 0{,}0025 v^2}{6 + 0{,}038 \cdot 4020 + 0{,}0021 \cdot 40^2} \cdot 0{,}7 = 1{,}24 \text{ Н/кН};$$

для груженых четырехосных вагонов на роликовых подшипниках по формуле (6.13) при скорости 40 км/ч –

$$w_{04гр} = 0{,}7 + \frac{3 \cdot (0{,}1 v m_{в04гр} + 0{,}0025 v^2)}{(0{,}1 \cdot 4018 + 0{,}5 \cdot 0{,}0025 \cdot 40^2)} \cdot 0{,}7 = 1{,}29 \text{ Н/кН};$$

для порожних четырехосных вагонов на подшипниках скольжения по формуле (6.16) при скорости 40 км/ч – $w_{04п} = 1{,}0 + (0{,}044 v + 0{,}00024 v^2) \cdot 1{,}0$

$0{,}044 \cdot 40 + 0{,}00024 \cdot 40^2 = 3{,}14$ Н/кН.

Удельное основное сопротивление состава рассчитываем по формуле (6.35). При v = 40 км/ч, имеем:

$$w_0 = \frac{P_{4п} \cdot w_{04п} + P_{4гр} \cdot w_{04гр} + P_8 \cdot w_{08}}{10 \cdot 3{,}14 \cdot 60} = \frac{100 \cdot 1{,}29}{30 \cdot 1{,}24} = 1{,}46 \text{ Н/кН}.$$

Все результаты расчетов при скоростях, кратных десяти, для точки пересечения ограничивающей линии с тяговой характеристикой на 15-м положении главной рукоятки контроллера машиниста, точек включения и отключения ослабления возбуждения и для номинального режима сводим в таблицу 9.

Таблица 9

v, км/ч	w□04□п, Н/кН	w□04□гр, Н/кН	w□08□, Н/кН	w□0□, Н/кН
0 – 10	1,46	0,93	1,03	1,01
19	1,92	1,01	1,07	1,12
20	1,98	1,02	1,08	1,13
23,4	2,16	1,06	1,10	1,18
27,5	2,39	1,11	1,11	1,24
30	2,54	1,15	1,15	1,29
38	3,02	1,26	1,22	1,42
40	3,14	1,29	1,24	1,46
43	3,34	1,34	1,26	1,52
50	3,80	1,47	1,36	1,67
60	4,50	1,67	1,49	1,90
62,5	4,69	1,73	1,53	1,97
70	5,26	1,90	1,65	2,16
80	6,06	2,19	1,82	2,45
90	6,90	2,44	2,02	2,76
100	7,80	2,75	2,24	3,10

2.2. Основное удельное сопротивление движению тепловоза в режиме тяги определяем по формуле (6.1). Для скорости 40 км/ч: w□$_0$ □1,9 □ 0,01□v □ 0,0003□v^2 □1,9 □ 0,01□40 □ 0,0003□40^2 □ 2,78 Н$_{кН}$.

2.3. Основное удельное сопротивление движению поезда определяем по формуле (6.38). Для скорости 40 км/ч: w$_0$ □ w□$_0$ □m$_л$ m□ w□$_0$□ □m$_с$ □ 2,78□2763576□1,46□3300 □1,56 Н$_{кН}$.

2.4. Удельные силы тяги рассчитываем по формуле (1.2), исходя из сил тяги тепловоза, которые берем из тяговых характеристик тепловоза 2ТЭ10В (см. рис.

5.13). Для скорости, например, 40 км/ч, сила тяги $F_к$ = 305,9 кН. Удельная сила тяги равна:

$$f_к = \frac{F^к}{mg} = \frac{305900}{3576 \cdot 9,81} = 8,72 \text{ Н/кН}.$$

При расчетах $f_к$ для скоростей, при которых возможны два режима работы (ПВ – при увеличении скорости и ОВ1 – при снижении и т.д.), силу тяги $F_к$ принимаем средней. Удельные ускоряющие силы в режиме тяги, например, при скорости 40 км/ч, рассчитываем по формуле: $f_y = f_к - w_0 = 8,72 - 1,56 = 7,16$ Н/кН.

При расчетах f_y сопротивление движению от 0 до 10 км/ч принимают постоянным, рассчитываемым по формулам при 10 км/ч. Нужно иметь в виду, что силы тяги при этих скоростях отличаются, поэтому f_y также получаются различными.

Все расчеты по определению удельных ускоряющих сил сводим в таблицу 10 и по ней строим диаграмму удельных ускоряющих сил (рис. 6) в масштабе, выбранном из табл. 8.4.

Таблица 10

v, км/ч	w'_0, Н/кН	w''_0, Н/кН	w_0, Н/кН	$F_к$, кН	$f_к$, Н/кН	$f_y = f_к - w_0$, Н/кН
0	2,03	1,01	1,09	797,0	22,72	21,6
10	2,03	1,01	1,09	666,8	19,01	17,9
19	2,20	1,12	1,20	599,3	17,08	15,9
23,4	2,30	1,18	1,27	496,2	14,14	12,9
27,5	2,40	1,24	1,33	437,4	12,47	11,1
30	2,47	1,29	1,38	402,0	11,46	10,1
38	2,71	1,42	1,52	324,0	9,25	7,7
40	2,78	1,46	1,56	305,9	8,72	7,2
43	2,88	1,52	1,62	282,4	8,05	6,4
50	3,15	1,67	1,78	246,2	7,02	5,2
60	3,58	1,90	2,03	294,0	5,82	3,8
62,5	3,70	1,97	2,10	196,1	5,59	3,5
70	4,07	2,16	2,31	176,6	5,03	2,7
80	4,62	2,45	2,62	153,0	4,36	1,7
90	5,23	2,76	2,95	137,0	3,91	1,0
100	5,90	3,10	3,32	119,6	3,40	0,1

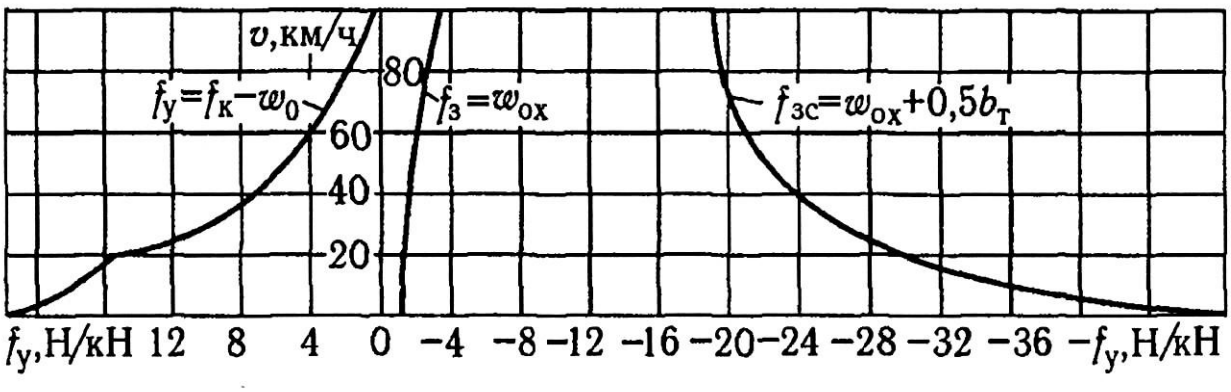


Рис. 6. Диаграмма удельных ускоряющих и замедляющих сил при тепловозной тяге

3. Построение диаграммы удельных замедляющих сил в режиме выбега и торможения

3.1. Удельное основное сопротивление движению тепловоза при работе на холостом ходу определяем по формуле (6.2) или берем из табл. 6.1. При скорости 40 км/ч. w_x □ 2,4 □ 0,011□v □ 0,00035 □v^2 □ 2,4 □ 0,011□40 □ 0,00035 □40^2 □ 3,40 Н/кН. Удельное основное сопротивление движению состава выбираем из табл. 9.

3.2. Удельное основное сопротивление движению поезда при работе тепловоза на холостом ходу рассчитываем по формуле (6.40). Для скорости 40 км/ч, получим:

$$w_{ox} \square \overline{w_x \square m_л \square w\square_0\square \square m_c} \square 3,40\square 276 \square 1,46\square 3300 \square 1,61$$

Н/кН. m 3576

Результаты расчетов сил сопротивления движению поезда при других скоростях приведены в таблице 11 и по ним построена диаграмма удельных замедляющих сил на выбеге (см. рис. 6).

Таблица 11

v	w□$_0$□	w_x	w_{ox}	□$_{кр}$	$b_{тс}$	$f_{зс}$ □ w_{ox} □ 0,5$b_т$
км/ч	Н/кН	Н/кН	Н/кН	–	Н/кН	Н/кН
0	1,01	2,54	1,13	0,270	47,25	48,40
10	1,01	2,54	1,13	0,198	34,65	35,80
20	1,13	2,76	1,26	0,162	28,35	29,60
30	1,29	3,05	1,43	0,140	24,50	25,90
40	1,46	3,40	1,61	0,126	22,05	23,70
50	1,67	3,83	1,84	0,116	20,30	22,10
60	1,90	4,32	2,09	0,108	18,90	21,00

70	2,16	4,89	2,37	0,102	17,85	20,20
80	2,45	5,52	2,69	0,097	16,98	19,70
90	2,76	6,23	3,03	0,093	16,28	19,30
100	3,10	7,00	3,40	0,090	15,75	19,20

3.3. Удельные тормозные силы рассчитываем в соответствии с разделом 7.3. Расчетный тормозной коэффициент трения чугунных колодок о колеса подвижного состава определяем по формуле (7.8) или выбираем из таблицы 7.2. При скорости 40 км/ч, имеем:

$$\varphi_{кр} = 0{,}27 + \frac{100}{100 + 5v} + 0{,}27 + \frac{100}{100 + 5 \cdot 40} = 0{,}126 .$$

3.4. Удельные тормозные силы определяем по формуле (7.19) при заданном $\psi_р = 0{,}35$. При скорости 40 км/ч, получим: $b_т = 1000 \cdot \varphi_{кр} \cdot \psi_р = 1000 \cdot 0{,}126 \cdot 0{,}35 = 44{,}10$ Н/кН .

3.5. Удельные замедляющие силы при служебном торможении (при скорости 40 км/ч) рассчитываем по формуле: $f_{зс} = w_{ox} + 0{,}5b_т = 1{,}61 + 0{,}5 \cdot 44{,}10 = 23{,}66$ Н/кН.

Все результаты расчетов при других скоростях сведены в таблицу 11, по ним построена диаграмма удельных замедляющих сил при служебном торможении (см. рис. 6).

4. Построение кривых скорости v(s) и времени t(s) графическим методом

4.1. Кривые скорости v(s) и времени t(s) строим в соответствии с разделами 8.6 и 8.7. Построение кривой ведем по диаграмме удельных ускоряющих и замедляющих сил в выбранных масштабах (см. рис. 5). При построении кривой v(s) нумеруем точки конца каждого прямолинейного участка (точки от 1 до 34), указываем точки прямых переходов с ПВ на ОВ1 и с ОВ1 на ОВ2 и обратных переходов, место выключения тока (0) и включения тормозов (ТД).

Из построения видно, что скорость поезда на расчетном подъеме достигает установившегося значения. Следовательно, масса поезда вычислена правильно. Если бы скорость не снизилась до расчетной, то массу состава нужно было бы определить с учетом использования запаса кинетической энергии поезда.

Режим ведения выбираем таким образом, чтобы поезд двигался с возможно большей скоростью и рациональным расходом топлива. С этой целью в конце элемента 7 профиля пути (точка 22) переходим на выбег, так как на последующих спусках скорость возрастает вплоть до допустимой. Кривую v(s) при торможении перед остановкой на станции (В) строим по кривой замедляющих сил $w_{ox} + 0{,}5b_т = f(v)$ в обратном порядке, начиная с точки v = 0 на станции (В). Пересечение

полученной кривой v(s) с кривой скорости, которую вели от начала участка, дает искомую точку 28, в которой должны начать действовать тормоза.

4.2. Кривую времени t(s) строим по кривой v(s), взяв из таблицы 8.4 масштаб времени и отрезок Δ. Для уменьшения размеров чертежа по вертикали кривую t(s) строим частями по 10 мин, снося ее до оси абсцисс.

На основании построений (см. рис. 5) получаем следующие времена хода: перегоне (АБ) – t = 18,5 мин, перегоне (БВ) – t = 9,7 мин, участок (АВ) – t = 28,2 мин.

5. Расчет расхода дизельного топлива на тягу поезда или генераторов

5.1. Расход дизельного топлива на тягу поезда определяем в соответствии с разделом 13.7. Массу топлива, расходуемого в 1 мин, берем из рис. 13.6 при работе в режиме тяги, из рис. 13.9 или табл. 13.4 – на холостом ходу.

При разгоне расход определим из следующих соображений: чтобы скорость изменилась от 0 до 10 км/ч, машинист, как видно из тяговой характеристики, может вывести главную рукоятку контроллера до 10-го положения. Условно примем среднее шестое положение рукоятки контроллера машиниста со средним расходом топлива при средней скорости 5 км/ч (3 · 2 = 6 кг/мин) на две секции (находим интерполированием). При изменении скорости от 10 до 19 км/ч и переводе главной рукоятки с 10-го до 15-го положения за среднюю позицию примем 13-ю. При $v_{ср}$ = 14,5 км/ч; G = 7,4 · 2 = 14,8 кг/мин на две секции. При скоростях 19...90 км/ч в 15-м положении рукоятки расход, как видно из рисунка (13.6), 17,1 кг/мин. Расход дизельного топлива при движении по всему участку складывается из периода разгона (точки 0 – 2), движения в режиме тяги на 15-м положении рукоятки (точки 2 – 22) и на выбеге (точки 22 – 24). Расход топлива на холостом ходу берем из таблице 13.4. Для тепловоза 2ТЭ10В g_x = 0,76 кг/мин (на два дизеля).

Исходя из этих данных, рассчитываем расход дизельного топлива по формуле (13.18) с индексами, соответствующими точкам на рисунке 5:

$$E = G_{0-1} \cdot t_{0-1} + G_{1-2} \cdot t_{1-2} + G_{2-22} \cdot t_{2-22} + g_{x22-34} \cdot t_{22-34}.$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 12.

Таблица 12

Участок кривой скорости (см. рис. 5)	$v_{ср}$, км/ч режим	Δt, мин	G, g кг/мин	G · Δt, кг
0 – 1	5	0,4	6,0	2,4
1 – 2	14,5	0,3	14,8	4,4
2 – 22	Работа на 15-й позиции главного контроллера машиниста	19,6	17,1	335,2
22 – 34	Холостой ход	7,9	0,76	6,0
∑Δt = 28,2				E = 348 кг

5.2. Зная расход дизельного топлива, определим удельный расход натурного топлива на измеритель 10^4 т·км по формуле (13.19):

$$e = \frac{mE_c s}{10^4} = \frac{3300348 \cdot 20}{10^4} = 52{,}73 \text{ кгт} \cdot \text{км}.$$

5.3. Удельный расход условного топлива на измеритель 10^4 т·км определяем по формуле (13.20); тепловой эквивалент принимаем Э = 1,43:

$$e_y = e \cdot Э = 52{,}73 \cdot 1{,}43 = 75{,}40 \frac{\text{кг}}{\text{т} \cdot \text{км}}.$$

6. Проверка нагревания тяговых электродвигателей или генераторов

6.1. Как отмечено в разделе 12.1, нагревание тяговых электродвигателей или генераторов тепловозов проверяют только в тех случаях, когда вводится ограничение скорости движения на труднейших подъемах до значений ниже расчетных. В нашем примере таких ограничений нет, поэтому проверку электродвигателей на нагревание можно не выполнять. В случае необходимости проверки тяговых электродвигателей или генераторов на нагревание ее выполняют так, как указано в приложениях 1 и 2, применительно к тяговым электродвигателям электровоза. Следовательно, тепловоз 2ТЭ10В может провести по заданному участку состав массой 3300 т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горский А.В., Воробьев А.А. Надежность электроподвижного состава: Учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005. – 303 с.
2. Инструкция по эксплуатации тормозов подвижного состава железных дорог. – М.: Транспорт, 1994. – 96 с.
3. Мугинштейн JI.A., Лисицин АЛ. Нестационарные режимы тяги.
Сцепление. Критическая масса поезда. – М.: Интекст, 1996.
4. Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов. – УМК МПС России, 2000. – 592 с.
5. Ротанов Н.А., Курбасов А.С., Быков Ю.Г., Литовченко В.В.
Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
6. Тихменев Б.Н., Кучумов В. А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. – М.: Транспорт, 1988. – 310 с.
7. Теория электрической тяги. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н., Озеров М.И. Под ред. Исаева И.П. — М.: Транспорт, 1995. 294 с.
8. Рациональные режимы вождения поездов и испытания локомотивов. Под ред. Осипова С.И. — М.: Транспорт, 1984. 280 с.
9. Правила тяговых расчетов для поездной работы. — М.: Транспорт, 1985. 287 с.
10. ПРАВИЛА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ТОРМОЗНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТОРМОЗАМИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА. — М.: утв. Приказом Минтранса России № 151 от 03.06.2014 г. С изменениями от 2022 г. 1. Электровоз ВЛ85. Руководство по эксплуатации. Тушканов Б.А., Пушкарев Н.Г., Позднякова Л.А. и др. — М.: Транспорт, 1992. 480 с.
2. Электровоз ВЛ80^{С}. Руководство по эксплуатации. — М.: Транспорт, 1982. 622 с.
3. Электровоз ВЛI80^{Р}. Руководство по эксплуатации. Под. ред. Тушканова Б.А. — М.: Транспорт, 1985. 541 с.
4. Электровозы ВЛ10 и ВЛ10^{У}: Руководство по эксплуатации. Под. ред. Кикнадзе О.А. — М.: Транспорт, 1981. 519 с.
5. Электровоз ВЛ11: Руководство по эксплуатации. Под. ред. Чирокадзе Г.И., Кикнадзе О.А. — М.: Транспорт, 1983. 464 с.

6. Электровоз ВЛ11М: Руководство по эксплуатации. — М.: Транспорт, 1994. 416 с.

7. Тепловоз 2ТЭ10В: Руководство по эксплуатации и обслуживанию. — М.: Транспорт, 1975. 431 с.

8. Тепловоз 2ТЭ116. — М.: Транспорт, 1985. 328 с.

9. Посмитюха А.А. Эксплуатация автотормозов, устройств АЛСН и радиосвязи. — М.: Транспорт, 1991. 286 с.

10. Вождение поездов. Пособие машинисту. Черепашенец Р.Г., Бирюков В.А., Судиловский А.Н. Под ред. Черепашенца Р.Г. — М.: Транспорт, 1994. 304 с.