

Приложение

к рабочей программе по специальности

23.02.06 Техническая эксплуатация

подвижного состава железных дорог

направление подготовки: электроподвижной
состав

КУРС ЛЕКЦИЙ

профессионального модуля

**ПМ.01 Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного
состава (электроподвижной состав)**

**МДК 01.02. Эксплуатация подвижного состава и обеспечение
безопасности движения поездов (электроподвижной состав)**

Тема 2.5. Основы локомотивной тяги

Содержание

Пояснительная записка	4
ТЕМА 2.5. ОСНОВЫ ЛОКОМОТИВНОЙ ТЯГИ	7
Лекция 1 Силы, действующие на поезд	7
Лекция 2 Основные режимы движения поезда, сила тяги, сцепление колёс с рельсом, повышение тяговых свойств локомотива	9
Лекция 3 Тяговые характеристики. Характеристики тягового электродвигателя (ТЭД) на ободу колеса локомотива	20
Лекция 4 Сравнение ТЭД с различными возбуждениями	24
Лекция 5 Построение тяговой характеристики при износе бандажа колёсной пары при изменении напряжения и поля ТЭД, пуск ЭПС. Ограничения на использование силы тяги	26
Лекция 6 Силы сопротивления движению поезда. Виды, физическая сущность, способы снижения	30
Лекция 7 Способы расчёта основного и дополнительного сопротивления	32
Лекция 8 Спрямление профиля пути.....	39
Лекция 9 Тормозные силы поезда. Назначение, классификация.....	43
Лекция 10 Расчет тормозных сил поезда, тормозной коэффициент.	49
Лекция 11 Обеспеченность поезда тормозными средствами	54
Лекция 12 Характеристики электрического торможения и принципы регулирования	57
Лекция 13 Тормозные задачи и методы их решения.....	59
Лекция 14 Решение тормозных задач с помощью номограмм.	61
Лекция 15 Масса поезда. Методы расчёты массы поезда поезда.....	66
Лекция 16 Условия движения поезда в режимах тяги, выбега и торможения.....	73
Лекция 17 Уравнение движения поезда	75
Лекция 18 Аналитический метод решения уравнения.	77

Лекция 19 Графический метод решения уравнения движения поезда.....	79
Лекция 20 Практические приёмы построения кривой скорости в функции пути	82
Лекция 21 Практические приёмы построения кривой времени в функции пути	88
Лекция 22 Расход электрической энергии	90
Лекция 23 Токовые характеристики электроподвижного состава	92
Лекция 24 Построение кривых тока электроподвижного состава.....	95
Лекция 25 Факторы, влияющие на расход электрической энергии	97
Лекция 26 Методы определения расхода электроэнергии. Полный и удельный расход электрической энергии	101
Лекция 27 Нагревание ТЭД. Методы расчёта нагревания электрических машин.....	103
Лекция 28 Способы экономии электрической энергии.....	108
Список использованных источников	111

Пояснительная записка

Курс лекций по профессиональному модулю ПМ.01 Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава МДК 01.02. Эксплуатация подвижного состава и обеспечение безопасности движения поездов (электроподвижной состав) Тема 2.5. Основы локомотивной тяги составлен для оказания помощи студентам при освоении учебного материала по специальности 23.02.06 Техническая эксплуатация подвижного состава железных дорог (электроподвижной состав).

Курс лекций составлен в соответствии с примерной программой профессионального модуля ПМ.01 Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава по специальности 23.02.06 Техническая эксплуатация подвижного состава железных дорог (электроподвижной состав), с рабочей программой профессионального модуля ПМ.01 Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава по специальности 23.02.06 Техническая эксплуатация подвижного состава железных дорог (электроподвижной состав).

В ходе освоения профессионального модуля ПМ.01 обучающийся должен:

иметь практический опыт:

ПО.1 Эксплуатации, технического обслуживания и ремонта деталей, узлов, агрегатов, систем подвижного состава железных дорог с обеспечением безопасности движения поездов;

уметь:

У.1 определять конструктивные особенности узлов и деталей подвижного состава;

У.2 обнаруживать неисправности, регулировать и испытывать оборудование подвижного состава;

У.3 определять соответствие технического состояния оборудования подвижного состава требованиям нормативных документов;

У.4 выполнять основные виды работ по эксплуатации, техническому

обслуживанию и ремонту подвижного состава;

У.5 управлять системами подвижного состава в соответствии с установленными требованиями;

знать:

3.1 конструкцию, принцип действия и технические характеристики оборудования подвижного состава;

3.2 нормативные документы по обеспечению безопасности движения поездов;

3.3 систему технического обслуживания и ремонта подвижного состава.

Результатом освоения программы профессионального модуля является овладение профессиональными (ПК) и общими (ОК) компетенциями:

ПК 1.1 Эксплуатировать подвижной состав железных дорог;

ПК 1.2 Производить техническое обслуживание и ремонт подвижного состава железных дорог в соответствии с требованиями технологических процессов;

ПК 1.3 Обеспечивать безопасность движения подвижного состава.

ОК 1 Понимать сущность и социальную значимость своей будущей профессии, проявлять к ней устойчивый интерес

ОК 2 Организовывать собственную деятельность, определять методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество

ОК 3 Решать проблемы, оценивать риски и принимать решения в нестандартных ситуациях

ОК 4 Осуществлять поиск, анализ и оценку информации, необходимой для постановки и решения профессиональных задач, профессионального и личностного развития

ОК 5 Использовать информационно-коммуникационные технологии для совершенствования профессиональной деятельности

ОК 6 Работать в коллективе и команде, обеспечивать её сплочение, эффективно общаться с коллегами, руководством, потребителями

ОК 7 Ставить цели, мотивировать деятельность подчинённых, организовывать и контролировать их работу с принятием на себя ответственности за результат выполнения заданий

ОК 8 Самостоятельно определять задачи профессионального и личностного развития, заниматься самообразованием, осознанно планировать повышение квалификации

ОК 9 Быть готовым к смене технологий в профессиональной деятельности

Курс лекций изложен в лаконичной форме, что поможет студентам быстро и качественно подготовиться к практическим занятиям, экзамену по профессиональному модулю ПМ 01 в рамках Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования.

ТЕМА 2.5. ОСНОВЫ ЛОКОМОТИВНОЙ ТЯГИ

Лекция 1

Силы, действующие на поезд

План лекции

1.1 Характеристика сил, действующих на поезд

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 уравниваются 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.

Таковыми внешними силами, действующими на механическую систему — поезд, являются сила тяги F_k , развиваемая локомотивом, тормозная сила B_t , 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_y :

$$F_y = F_k - W - B_t. \quad (1)$$

Контрольные вопросы:

1. Какие силы, действующие на поезд, являются внешними?
2. Какие силы, действующие на поезд, называются управляемыми?

Лекция 2

Основные режимы движения поезда, сила тяги, сцепление колёс с рельсом, повышение тяговых свойств локомотива

План лекции

2.1 Основные режимы движения

2.2 Образование силы тяги

2.3 Касательная сила тяги и её ограничение

2.4 Факторы, влияющие на реализацию сил сцепления колес с рельсами

2.5 Коэффициент сцепления. Расчётный коэффициент сцепления

2.1 Основные режимы движения

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 : $F_y = F_k - W$;

режим выбега при отсутствии сил тяги и торможения, когда на поезд действуют только силы сопротивления движению: $F_y = -W$;

режим торможения, когда к силам сопротивления движению прибавляется тормозная сила B_t : $F_y = -(W + B_t)$.

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 t , в тоннах, на ускорение под действием силы тяжести $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Удельная сила тяги f_k , удельные силы сопротивления движению ω , удельная

тормозная сила b_T и удельная ускоряющая сила f_y (Н/кН) рассчитываются по следующим формулам:

$$f_k = \frac{F_k}{mg}; \omega = \frac{W}{mg}; b_T = \frac{B_T}{mg}; f_y = \frac{F_y}{mg} \quad (2)$$

Разделив в уравнении (1.1) левую и правую части на вес поезда, получим, Н/кН:

$$f_y = f_k - \omega - b_T. \quad (3)$$

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.

2.2 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

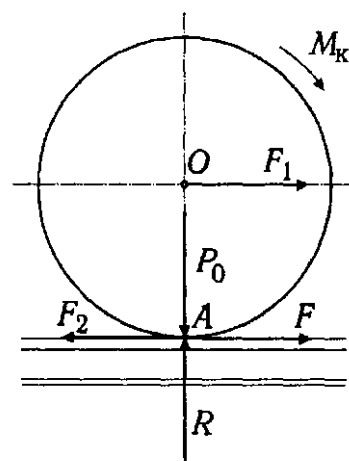


Рисунок 1 - Схема образования силы тяги

рисунке 1 показано колесо, к которому приложен вращающий момент M_k , действующий по часовой стрелке. Оно прижато к рельсу с силой P_0 .

Вращающий момент M_k можно заменить парой сил F_1 , F_2 . Сила F_1 приложена к центру колеса O , а сила P_2 — в точке A его касания с рельсом. Под действием сил F_2 и P_0 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 A колесо за счет сил сцепления не перемещается, под действием силы F_1 оно начинает поворачиваться относительно точки A — мгновенного центра вращения. Так как мгновенный центр вращения при этом перемещается по поверхности головки рельса слева направо, центр колеса (точка O) поступательно движется в этом же направлении.

2.3 Касательная сила тяги и её ограничение

Рассмотренные процессы можно распространить на колесную пару. Сила $F_{кд}$, действующая на оба колеса колесной пары, является касательной силой тяги движущей колесной пары. Сумму сил $F_{кд}$ всех движущих колесных пар называют касательной силой тяги локомотива F_k 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'_k . 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:

$$F_a = F_k - W'_k \pm F_{kз}. \quad (4)$$

Эту формулу обычно используют для определения силы тяги на автосцепных приборах по известной касательной силе тяги при неизменной скорости движения ($F_{кз} = 0$) 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. рисунок 1). Однако силу F_2 можно увеличивать только до предельного значения силы сцепления:

$$F_2 = F \leq F_{сц}.$$

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 :

$$\psi_0 = \frac{F_{сц}}{1000m_{лo}g} \quad (5)$$

где $F_{сц}$ — наибольшая сила тяги колесной пары или сила сцепления, Н;

$m_{лo}g$ — нагрузка от колесной пары на рельсы, кН, определяемая как произведение массы, приходящейся на одну колесную пару локомотива t , в тоннах, и ускорения свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

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 $m_{\text{л}}g$, 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 электровагоны 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:

$$F_k \leq 1000 m_{\text{л}} g \psi, \quad (6)$$

где F_k — касательная сила тяги локомотива, Н;

$m_{\text{л}}g$ — сцепной вес локомотива, кН.

Из формулы (6) видно, что при постоянном весе $m_{\text{л}}g$ коэффициент сцепления ψ 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.

2.4 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 морозящем 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 место контакта колес и рельсов. Он разрушает пленки, и его твердые абразивные частицы внедряются в контактирующие 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.

Касательная сила тяги условного двухосного локомотива $F_k = F_1 + F_2$ (рисунок 2) приложена на уровне головки рельса, а силы сопротивления движению состава W_c действуют на локомотив через автосцепные приборы. Эти силы,

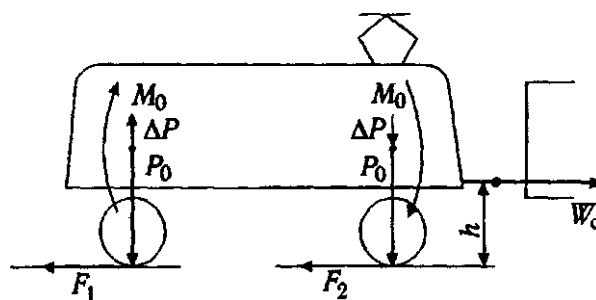


Рисунок -2 Перераспределение нагрузок колесных пар на рельсы

направленные в разные стороны, приложены на плече h , равном высоте оси автосцепки над уровнем головок рельсов, и образуют так называемый опрокидывающий момент M_0 , который разгружает переднюю по ходу колесную пару на величину ΔP и перегружает заднюю колесную пару на ту же величину.

При уменьшенной нагрузке первая колесная пара раньше других потеряет 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 ($\pm 2\%$), что при неблагоприятных условиях также снижает коэффициент сцепления локомотива. Развеска локомотива изменяется и вследствие прогиба рельсов под нагрузкой от колес.

Колебания подпрессоренной 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.

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. При жестких характеристиках и параллельном включении тяговых электродвигателей коэффициент сцепления локомотива будет больше.

Проскальзывание колес. Как уже отмечалось, реализуемая сила тяги при

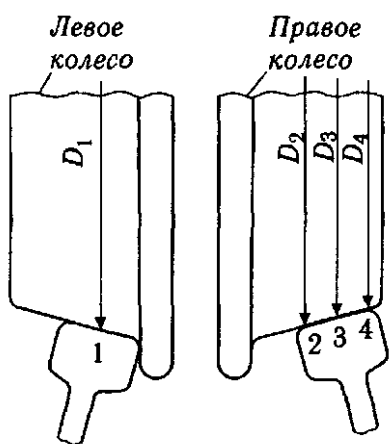


Рисунок 3 - Влияние коничности бандажей и положения колесной пары в рельсовой колее на проскальзывание колес

этом снижается. Проскальзывания колесных пар возникают вследствие конусности бандажей и при разности диаметров колес одной колесной пары. На рис. 3 показаны колеса, имеющие коническую форму рабочей поверхности, и рельсы, установленные с уклоном внутрь колее (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 (точка), а правого — по меньшему 03. 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.

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

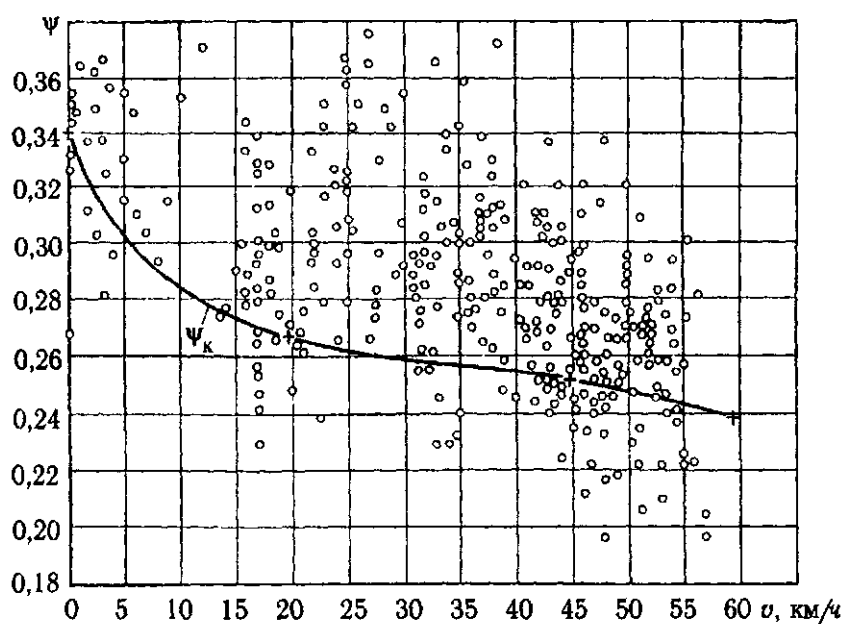


Рисунок 4 - Результаты экспериментального определения коэффициента сцепления

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 (рисунок 4). Большой разброс замеров объясняется различными состояниями поверхности рельсов, жесткости пути, атмосферных условий.

Полученные данные (см. рисунок 4) обрабатывают методами математической статистики и определяют значения расчетного коэффициента сцепления локомотива ψ_k .

2.5 Коэффициент сцепления. Расчётный 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 тепловозов—

$$\psi_k = 0,118 + \frac{5}{27,5 + v}; \quad (7)$$

в кривых малого радиуса R (менее 800 м) —

$$\psi_{k\text{ кр}} = \psi_k \frac{3,5R}{400 + 3R} \quad (8)$$

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, H , определяют по формуле:

$$F_{к\text{ сц}} = 1000m_{л}g\psi_{к}. \quad (9)$$

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

Контрольные вопросы:

1. Назовите три составляющие ускоряющей силы.
2. Как называется ускоряющая сила, имеющая отрицательное значение?
3. Что необходимо для создания поступательного движения поезда?
4. Что называется касательной силой тяги локомотива?
5. Что такое боксование?
6. Что называют сцепным весом локомотива?

Лекция 3

Тяговые характеристики. Характеристики тягового электродвигателя (ТЭД) на ободах колеса локомотива

План лекции

3.1 Электромеханические характеристики на валу ТЭД постоянного тока

3.2 Электромеханические характеристики ТЭД, отнесённые к ободам колёс

3.3 Перерасчёт характеристик при изменении передаточного отношения редуктора и диаметров колёсных пар

3.1 Электромеханические характеристики на валу ТЭД постоянного тока

Электрические машины постоянного тока могут иметь различные способы возбуждения: последовательное, параллельное, смешанное или независимое (рисунок 5). В зависимости от способа возбуждения машины обладают разными электромеханическими характеристиками.

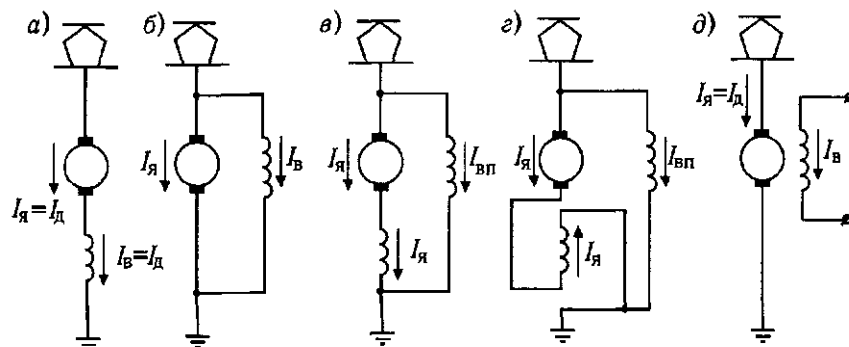


Рисунок 5 - Схемы электродвигателей с различным включением обмоток возбуждения:
а — последовательным; б — параллельным; в и г — смешанным соответственно с согласным и встречным включением параллельной и последовательной обмоток возбуждения; д — независимым

Электромеханическими характеристиками на валу тягового электродвигателя называют зависимость частоты вращения якоря $n(I_{\text{д}})$, вращающего момента $M(I_{\text{д}})$ и коэффициента полезного действия $\eta(I_{\text{д}})$ от

потребляемого тока при неизменном напряжении и постоянной температуре обмоток 115°C (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.

3.2 Электромеханические характеристики ТЭД, отнесённые к ободам колёс

Электромеханическими характеристиками, отнесённые к ободам колёс называются зависимость скорости движения $v(I_d)$, силы тяги на ободах колёсной пары $F_{kd}(I_d)$ и КПД $\eta(I_d)$ от тока электродвигателя при неизменном напряжении и постоянной температуре обмоток электродвигателя.

Вал якоря связан с колесной парой 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.

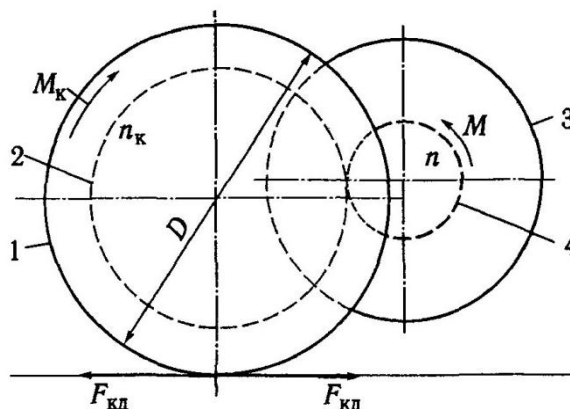


Рисунок 6 – Схема передачи вращающего момента от тягового электродвигателя на колёсную пару

Отношение числа зубьев зубчатого колеса к числу зубьев шестерни называют *передаточным отношением μ редуктора*.

Зависимость скорости движения $v(I_d)$ от тока электродвигателя называют *скоростной характеристикой*.

$$v = 0,188 D n / \mu, \quad (10)$$

где D – диаметр колёс колёсной пары, м;

n – частота вращения вала ТЭД, об/мин.

Зависимость силы тяги на ободах колёсной пары $F_{kd}(I_d)$ от тока электродвигателя называют *электротяговой характеристикой*

$$F_{kd} = 2 M \mu \eta_p / D, \quad (11)$$

где M – вращающий момент на валу ТЭД, Н·м;

η_p – КПД передачи.

3.3 Перерасчёт характеристик при изменении передаточного отношения редуктора и диаметров колёсных пар

Скоростная и электротяговая характеристики зависят от передаточного отношения редуктора и диаметров колёс.

Диаметры колёс уменьшаются из-за износа и периодических обточек. ТЭД одного и того же типа используют на разных локомотивах, имеющих различные передаточные отношения редуктора.

Скорости движения локомотива v_1 и v_2 при одной и той же частоте вращения вала, но при различных диаметрах колёс колёсной пары D_1 и D_2 и передаточных отношениях редуктора μ_1 и μ_2 связаны следующей формулой

$$v_2 = \frac{D_2}{D_1} \cdot \frac{\mu_1}{\mu_2} v_1. \quad (12)$$

Т.о. скорость движения при неизменной частоте вращения якоря ТЭД будет больше при большем диаметре колёсных пар и меньшем передаточном отношении редуктора.

Силы тяги F_{kd1} и F_{kd2} при одной и той же вращающемся моменте, но при различных диаметрах колёс колёсной пары D_1 и D_2 и передаточных отношениях редуктора μ_1 и μ_2 связаны следующей формулой:

$$F_{\text{кд2}} = \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{\mu_2}{\mu_1} F_{\text{кд1}}. \quad (13)$$

Т.о. большую силу тяги при неизменном вращающем моменте тягового электродвигателя получают при меньшем диаметре колёсных пар и большем передаточном отношении редуктора.

Контрольные вопросы:

1. Что называют электромеханическими характеристиками на валу ТЭД?
2. Что называют скоростной характеристикой?
3. Что называют передаточным отношением?
4. Что называют электротяговой характеристикой?

Лекция 4

Сравнение ТЭД с различными возбуждениями

План лекции

4.1 Сравнение характеристик при различных способах возбуждения ТЭД

4.1 Сравнение характеристик при различных способах возбуждения ТЭД

Характеристику, при которой с изменением тока или силы тяги скорость движения изменяется значительно, называют мягкой; если же колебания скорости малы, характеристику называют жёсткой.

При последовательном возбуждении электродвигателя с увеличением тока I_d возрастает и магнитный поток. Скорость движения с увеличением тока I_d будет снижаться вначале интенсивно, а затем более плавно (рисунок 7, а) в соответствии с темпом увеличения магнитного потока, который при больших токах возрастает незначительно из-за насыщения магнитной системы. Тяговый электродвигатель последовательного возбуждения обладает мягкой скоростной характеристикой в зоне малых токов и более жёсткой – при больших токах I_d .

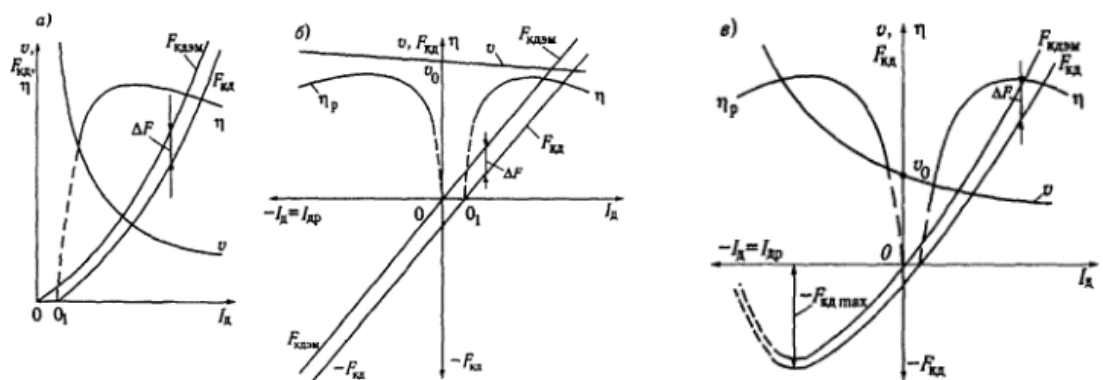


Рисунок 7 – Электромеханические характеристики ТЭД:

а – последовательного возбуждения; б – параллельного возбуждения; в – смешанного возбуждения

При параллельном или независимом возбуждении скоростная характеристика $v(I_d)$ (рисунок 7, б) жёстка 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_d в связи с тем, что магнитный поток остаётся почти постоянным.

Тяговые электродвигатели смешанного возбуждения приведены на рисунке 7,в. При согласном включении обмоток параллельного и последовательного возбуждения характеристика $\omega(I_d)$ занимает 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.

Контрольные вопросы:

1. Что называют мягкой и жёсткой скоростной характеристикой?
2. Как изменяется скоростная характеристика при различном возбуждении ТЭД?

Лекция 5

Построение тяговой характеристики при износе бандажа колёсной пары при изменении напряжения и поля ТЭД, пуск ЭПС. Ограничения на использование силы тяги

План лекции

5.1 Тяговые и удельные тяговые характеристики локомотива

5.2 Построение тяговой характеристики электроподвижного состава

5.3 Ограничения на использование силы тяги

5.1 Тяговые и удельные тяговые характеристики локомотива

Скоростная и электротяговая характеристики позволяют определить силу тяги при данной скорости движения в такой последовательности: по скорости находят ток тягового электродвигателя I_d , а по нему силу тяги, развиваемую колёсной парой. Однако для определения сил, действующих на поезд, необходимо определять силу тяги непосредственно от скорости движения.

Тяговой характеристикой называется зависимость силы тяги $F_k(v)$ от скорости движения.

Силу тяги локомотива F_k , Н, равную произведению силы тяги, реализуемой каждой колёсной парой, на число движущих колёсных пар или тяговых электродвигателей, определяют по формуле:

$$F_k = n_{\text{л}} \times F_{\text{кд}}, \quad (14)$$

где $n_{\text{л}}$ – число тяговых электродвигателей локомотива или движущих колёсных пар.

Удельной тяговой характеристикой называют зависимость удельной силы тяги $f_k(v)$ от скорости движения.

$$f_k = \frac{F_k}{mg}, \quad (15)$$

где m – масса поезда, определяется по формуле:

$$m = m_c + m_{\text{л}},$$

где m_c – масса состава;

$m_{\text{л}}$ – масса локомотива.

5.2 Построение тяговой характеристики электроподвижного состава

Практически из электромеханических характеристик, отнесённых к ободу колеса (рисунок 8, а) задаются током $I_{\text{д1}}$ и определяют скорость движения v_1 и силу тяги $F_{\text{кд1}}$. Затем $F_{\text{кд1}}$ умножают на число тяговых электродвигателей или движущих колёсных пар и вычисляют силу тяги локомотива $F_{\text{к1}}$. Значение скорости откладывают по оси абсцисс графика (рисунок 8, б), а силу тяги $F_{\text{к1}}$ – по оси ординат. Полученная точка с координатами v_1 и $F_{\text{к1}}$ находится на тяговой характеристике электроподвижного состава.

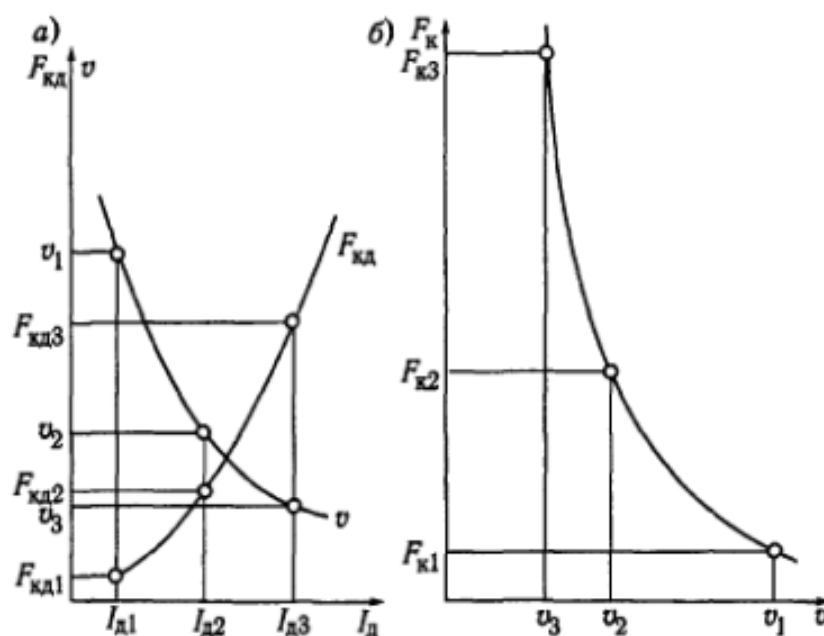


Рисунок 8 – Построение тяговой характеристики электроподвижного состава

Аналогично задавая токи $I_{\text{д2}}$, $I_{\text{д3}}$ находят скорости движения v_2 , v_3 , силы тяги $F_{\text{кд2}}$, $F_{\text{кд3}}$, а затем рассчитывают силы тяги $F_{\text{к2}}$, $F_{\text{к3}}$ и определяют точки для построения тяговой характеристики и т.д. Соединив полученные точки плавной кривой, получают тяговую характеристику. Обычно берут 8 ... 10 точек,

причём на скоростных характеристиках их располагают чаще в местах резкого изменения направления линии и реже – при небольших изгибах характеристик.

5.3 Ограничения на использование силы тяги

Рабочая зона на тяговых характеристиках ограничивается условиями надёжной работы электроподвижного состава. В зоне высоких скоростей тяговая характеристика (рисунок 9) ограничена наибольшей допустимой (или конструкционной) скоростью движения (линия 1).

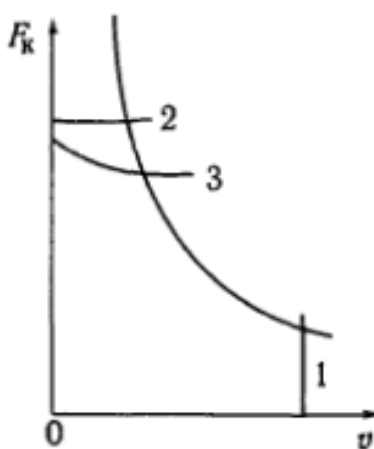


Рисунок 9 – Ограничения тяговых характеристик

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 колёсных пар с рельсами (кривая 3).

Ограничения силы тяги по коммутации определяют следующим образом: для заданного значения наибольшего тока по электротяговым характеристикам тягового двигателя определяют силу тяги $F_{кд}$, пересчитывают её в F_k и наносят на тяговую характеристику (линия 2).

Сила тяги по сцеплению колёс с рельсами зависит от нагрузки, передаваемой колёсными парами на рельсы, условий сцеплений и конструктивных особенностей электроподвижного состава. Её определяют по формуле (9).

Из двух ограничений – по коммутации тяговых электродвигателей и

сцеплению колёс с рельсами действительным ограничением силы тяги на каждой тяговой характеристике или при одинаковых скоростях является та, которая имеет меньшее значение и располагается на графике $F_k(v)$ ниже.

В случае изменения передаточного отношения зубчатой передачи и диаметра бандажей изменяются и тяговые характеристики. Пересчёт тяговых характеристик в этом случае можно выполнить, пользуясь перестроением электромеханических характеристик.

Контрольные вопросы:

1. Что называют тяговой характеристикой?
2. Как осуществляется построение тяговой характеристики?
3. Чем ограничиваются тяговые характеристики?

Лекция 6

Силы сопротивления движению поезда. Виды, физическая сущность, способы снижения

План лекции

6.1 Основное сопротивление движению

6.2 Виды основного сопротивления движению

6.3 Виды дополнительного сопротивления движению

6.1 Основное сопротивление движению

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_K .

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.

6.2 Виды основного сопротивления движению

Основные силы сопротивления:

- сила трения в подшипниках подвижного состава возникает под воздействием нагрузки на шейку оси подвижного состава q_{01} и вращении колесной пары по часовой стрелке, равная произведению силы q_{01} на

коэффициент трения φ .

- сила трения качения колёс по рельсам возникает вследствие деформации опорных поверхностей колёс, рельсов и просадки пути.
- сила трения скольжения колёс по рельсам. Качение колёс по рельсам сопровождается их проскальзыванием, вызывающим силу трения скольжения между колёсами и рельсами.
- сила сопротивления от ударов на неровностях пути. При прохождении стыков и неровностей пути возникают удары, которые вызывают силы, действующие против направления движения поезда.
- сила сопротивления воздушной среды.

6.3 Виды дополнительного сопротивления движению

К силам дополнительно сопротивления движению относятся:

- дополнительное сопротивление от уклонов;
- дополнительное сопротивление при движении поезда в кривых;
- дополнительное сопротивление при трогании с места;
- дополнительное сопротивление от подвагонных генераторов, обеспечивающих вагоны энергией для освещения, зарядки аккумуляторной батареи, работы электродвигателей вентиляционного агрегата;
- дополнительное сопротивление при низких температурах окружающего воздуха;
- дополнительное сопротивление движению от ветра.

Контрольные вопросы:

1. Какие силы относятся к силам сопротивления движению поезда?
2. Из чего складываются силы сопротивления движению поезда?
3. Назовите основные силы сопротивления движению.
4. Назовите дополнительные силы сопротивления движению

Лекция 7

Способы расчёта основного и дополнительного сопротивления

План лекции

7.1 Расчёт сил основного удельного сопротивления

7.2 Расчёт дополнительного сопротивления движению

7.3 Расчёт общего сопротивления движению поезда

7.1 Расчёт сил основного удельного сопротивления

Основные удельные сопротивления движению

- при движении по звеньевому (стыковому) пути:

Для локомотива ω'_0 (Н/кН)

- в режиме тяги (под током):

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2 \quad (16)$$

- в режиме выбега (без тока):

$$\omega_x = 2,4 + 0,011v + 0,00035v^2 \quad (17)$$

Для гружёных вагонов

- четырёхосные на роликовых подшипниках и вагонов рефрижераторных поездов:

$$\omega''_{04} = 0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{m_{\text{в}04}}, \quad (18)$$

где $m_{\text{в}04}$ – масса приходящаяся на ось вагона, определяется по формуле:

$$m_{\text{в}04} = \frac{m_{\text{в}4}}{4}, \quad (19)$$

$m_{\text{в}4}$ – масса вагона

- четырёхосные на подшипниках скольжения и шестиосные на роликовых подшипниках:

$$\omega''_{06} = 0,7 + \frac{8 + 0,1v + 0,0025v^2}{m_{\text{в}06}} \quad (20)$$

- восьмиосные вагонов на роликовых подшипниках:

$$\omega''_{08} = 0,7 + \frac{6 + 0,038v + 0,0021v^2}{m_{в08}} \quad (21)$$

Для порожних вагонов

- четырёхосные на подшипниках скольжения:

$$\omega''_{04} = 1,5 + 0,045v + 0,00027v^2 \quad (22)$$

- четырёхосные и шестиосные на роликовых подшипниках

$$\omega''_{06} = 1,50 + 0,044v + 0,00024v^2 \quad (23)$$

- пассажирские цельнометаллические на роликовых подшипниках

$$\omega''_{0п} = 0,7 + \frac{8 + 0,18v + 0,003v^2}{m_{в0п}} \quad (24)$$

- *при движении по безстыковому пути:*

Для локомотива ω'_0 (Н/кН)

- в режиме тяги (под током):

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,008v + 0,00025v^2 \quad (25)$$

- в режиме выбега (без тока): $\omega'_x = 2,4 + 0,009v + 0,00035v^2$

Для гружёных вагонов

- четырёхосные на роликовых подшипниках и вагонов рефрижераторных поездов:

$$\omega''_{04} = 0,7 + \frac{3 + 0,09v + 0,002v^2}{m_{в04}} \quad (26)$$

- четырёхосные на подшипниках скольжения и шестиосные на роликовых подшипниках:

$$\omega''_{06} = 0,7 + \frac{8 + 0,08v + 0,002v^2}{m_{в06}} \quad (27)$$

- восьмиосные вагонов на роликовых подшипниках:

$$\omega''_{08} = 0,7 + \frac{6 + 0,026v + 0,0017v^2}{m_{в08}} \quad (28)$$

Для порожних вагонов

- четырёхосные на подшипниках скольжения:

$$\omega''_{04} = 1,5 + 0,042v + 0,00018v^2 \quad (29)$$

- четырёхосные и шестиосные на роликовых подшипниках

$$\omega''_{06} = 1,0 + 0,0442v + 0,00016v^2 \quad (30)$$

- пассажирские цельнометаллические на роликовых подшипниках

$$\omega''_{0п} = 0,7 + \frac{8 + 0,16v + 0,0023v^2}{m_{вон}} \quad (31)$$

Основное сопротивление движению состава W''_0 (Н):

$$W''_0 = \omega''_{01}m_1g + \omega''_{02}m_2g + \dots + \omega''_{0n}m_ng, \quad (32)$$

где $\omega''_{01}, \omega''_{02}, \dots, \omega''_{0n}$ – основное удельное сопротивление каждого типа вагонов, входящих в состав, Н/кН;

$m_1, m_2, \dots, m_n$ – сумма масс соответствующих типов вагонов, входящих в состава, т;

g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$.

Основное удельное сопротивление движению состава, Н/кН:

$$\omega''_0 = \frac{W''_0}{m_c g} = \frac{\omega''_{01}m_1 + \omega''_{02}m_2 + \dots + \omega''_{0n}m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}, \quad (33)$$

где m_c – масса состава, равная сумме масс вагонов.

Если соотношение вагонов различных типов в составе задают в процентах по массе вагонов, то основное удельное сопротивление движению состава, Н/кН:

$$\omega''_0 = \frac{p_1\omega''_{01} + p_2\omega''_{02} + \dots + p_n\omega''_{0n}}{100}, \quad (34)$$

где $p_1, p_2, \dots, p_n$ – процентное соотношение масс вагонов различных типов.

Основное сопротивление движению локомотива, Н:

$$W'_0 = \omega'_0 m_{л} g, \quad (35)$$

где $m_{л}$ – масса локомотива, т.

Основное сопротивление движению поезда

- в режиме тяги (под током):

$$W_0 = W'_0 + W''_0 \quad (36)$$

- в режиме выбега (без тока):

$$W_{0x} = W_x + W''_0 \quad (37)$$

Основное удельное сопротивление движению поезда:

- в режиме тяги (под током):

$$\omega_0 = \frac{W'_0 + W''_0}{mg} = \frac{\omega'_0 m_{\text{л}} + \omega''_0 m_{\text{с}}}{m_{\text{л}} + m_{\text{с}}} \quad (38)$$

- в режиме выбега (без тока):

$$\omega_{0x} = \frac{\omega_x m_{\text{л}} + \omega''_0 m_{\text{с}}}{m} \quad (39)$$

7.2 Расчёт дополнительного сопротивления движению

- Дополнительное сопротивление от уклонов W_i создаётся составляющей веса поезда, действующей на подъёме против движения поезда, а на спусках – по направлению движения. $\omega_i = i$

- Дополнительное сопротивление при движении поезда в кривых W_r составляется из сил трения, приведённые к ободам колёсных пар.

$$\omega_r = \frac{700}{R} \cdot \frac{S_{\text{кр}}}{l_{\text{п}}}, \quad (40)$$

где R – радиус кривой,

$S_{\text{кр}}$ – длина кривой,

$l_{\text{п}}$ – длина поезда

- Дополнительное сопротивление при трогании с места составляется из силы трения в подшипниках, силы трения качения колеса, нагрузки от колёсных пар на рельсы, температуры окружающего воздуха:

для подвижного состава на подшипниках скольжения –

$$\omega_{\text{тр}}^{\text{ск}} = \frac{142}{m_{\text{во}} + 7}; \quad (41)$$

для подвижного состава на роликовых подшипниках –

$$\omega_{\text{тр}}^p = \frac{28}{m_{\text{во}} + 7}; \quad (42)$$

где $m_{\text{во}}$ – масса, приходящаяся на одну ось, т.

В том случае, когда в составе находятся разнотипные вагоны с различными массами, приходящимися на одну ось, удельную силу $\omega_{\text{тр}}$ определяют как средневзвешенную величину.

- Дополнительное сопротивление от подвагонных генераторов, обеспечивающих вагоны энергией для осведения, зарядки аккумуляторной батареи, работы электродвигателей вентиляционного агрегата, определяют исходя из мощности генераторов по формуле:

$$\omega_{\text{пг}} = \frac{136P'}{m_{\text{во}} v}; \quad (43)$$

где P' – средняя условная мощность подвагонного генератора, приходящаяся на один вагон поезда, кВт:

$$P' = \frac{P_{\text{пг}} n_{\text{бк}} + (P_{\text{пг}} + P_{\text{гк}}) n_{\text{кв}}}{n_{\text{в}}}; \quad (44)$$

где $P_{\text{пг}}$ – фактическая мощность подвагонного генератора (кВт), которая расходуется на нужды вагона, за исключением кондиционирования воздуха, принимаемая для среднесетевых условий равной 2 кВт;

$n_{\text{бк}}$ – число вагонов без кондиционирования воздуха, но имеющих подвагонные генераторы;

$P_{\text{гк}}$ – фактическая мощность подвагонного генератора, расходуемая на кондиционирование воздуха (средняя за время работы кондиционера), принимаемая равной 9 кВт;

$n_{\text{кв}}$ – число вагонов с кондиционирования воздуха;

$n_{\text{в}}$ – общее число вагонов в поезде.

Дополнительное сопротивление движению $\omega_{\text{пг}}$ учитывают при скоростях движения 20 км/ч и выше. При низких скоростях это сопротивление в расчётах не учитывают.

- Дополнительное сопротивление при низких температурах $\omega_{нт}$ окружающего воздуха определяется по формуле.

$$\omega_{нт} = \omega_0 (k_{нт} - 1), \quad (45)$$

где $k_{нт}$ – коэффициент, зависит от скорости движения и от температуры наружного воздуха, задаётся по таблице 1

Таблица 1

Скорость движения, v км/ч	Значение коэффициента $k_{нт}$ при $t_{нв}$, °C, для грузовых вагонов					
	-30	-35	-40	-45	-50	-60
20	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
40	1,03	1,03	1,04	1,04	1,05	1,06
60	1,05	1,06	1,07	1,07	1,08	1,09
80	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12
100	1,09	1,10	1,12	1,13	1,14	1,15
120	1,11	1,12	1,13	1,15	1,16	1,17

- Дополнительное сопротивление движению от ветра $\omega_{ов}$ определяется по формуле:

$$\omega_{в} = \omega_0 (k_{в} - 1), \quad (46)$$

где $k_{в}$ – коэффициент, зависит от скорости ветра и скорости движения поезда, задаётся по таблице 2

Таблица 2

Скорость ветра, м/с	Значение коэффициента $k_{в}$ при скоростях движения, км/ч								
	10	20	40	60	80	100	120	140	160
6	1,12	1,11	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,03
8	1,19	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,08	1,07	1,06
10	1,31	1,28	1,24	1,20	1,16	1,14	1,12	1,10	1,09
12	1,42	1,39	1,32	1,27	1,23	1,19	1,15	1,14	1,12

При скорости ветра более 12 км/ч его влияние учитывают на период особо неблагоприятных погодных условий по номограммам.

При действии нескольких составляющих дополнительного сопротивления движению их удельные значения складываются:

$$\omega_{д} = \omega_i + \omega_r + \omega_{пт} + \omega_{нт} + \omega_{в} \quad (47)$$

7.3 Расчёт общего сопротивления движению поезда

При движении поезда на него действует алгебраическая сумма сил основного и дополнительного сопротивлений, которую называют общим сопротивлением движению поезда W_k . При работе локомотива под током в режиме тяги или электрического торможения общее сопротивление, Н:

$$W_k = W_o + W_d \quad (48)$$

Аналогично определяют общее удельное сопротивление движению поезда, Н/кН:

$$\omega_k = \omega_o + \omega_d \quad (49)$$

В случае работы локомотива на холостом ходу (выбег или механическое торможение) общее удельное сопротивление движению поезда имеет вид, Н/кН:

$$\omega_k = \omega_{ох} + \omega_d \quad (50)$$

Контрольные вопросы:

1. Значения, каких показателей используются для вычисления основного и дополнительного сопротивления движению?

Лекция 8

Спрямление профиля пути

План лекции

8.1 Профиль пути

8.2 Спрямление профиля пути

8.3 Построение профиля пути

8.1 Профиль пути

Каждый участок железнодорожного пути вследствие изменения рельефа земной поверхности, на которой он проложен, не может быть строго прямолинейным. Для тяговых расчётов используют продольный профиль участка – это ломанная линия, состоящая из прямолинейных отрезков с разными углами наклона к горизонтали – уклонами $\pm i$, ‰, и различными высотами h конечных точек по отношению к какому-то исходному уровню (высотой над уровнем моря).

Продольный профиль участка можно представлять в виде

- таблицы

Номера элементов	Длина элемента l , м	Крутизна уклона i , ‰	Радиус кривой R , м	Длина кривой $S_{кр}$, м
1 (станция А)	1700	0,0		
2	2400	– 2,5	650	350
3	800	– 1,5		
4	1600	0,0		
5	1850	+12,5		
6	500	+3,5		
7	6800	+7,3		
8 (станция Б)	1600	0,0		
9	800	+1,5	1500	600
10	1000	0,0		
11	1200	–9,0		
12	1000	0,0	1000	500
13	800	+6,0	650	450
14	600	+4,5		
15	875	0,0		
16	7000	–7,0		
17	1650	–2,0		
18	2400	0,0		
19	1600	+2,0	1300	650
20 (станция В)	1400	0,0		

Рисунок 10 – Таблица продольного профиля пути

- двумерное изображение

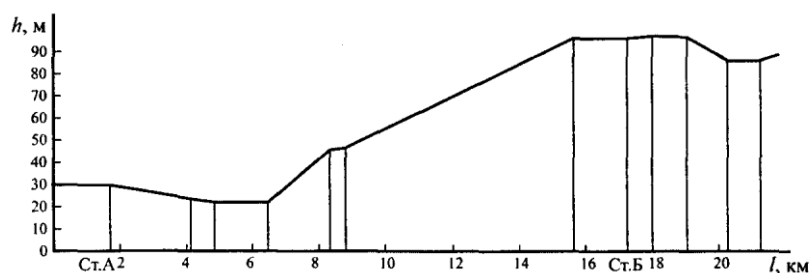


Рисунок 11 – Двумерное изображение продольного профиля пути

- одномерное изображение

$\frac{0,0}{1700}$	$\frac{-2,5}{2400}$	$\frac{-1,5}{800}$	$\frac{0,0}{1600}$	$\frac{+12,5}{1850}$	$\frac{+7,3}{6800}$	$\frac{0,0}{1600}$	$\frac{+1,5}{800}$	$\frac{0,0}{1000}$	$\frac{-9,0}{1200}$	$\frac{0,0}{1000}$
--------------------	---------------------	--------------------	--------------------	----------------------	---------------------	--------------------	--------------------	--------------------	---------------------	--------------------

Рисунок 12 – Одномерное изображение продольного профиля пути

Высота конечной точки i -го элемента профиля (отметка переломной точки) вычисляется по формуле:

$$h_i = h_{i-1} + \frac{i}{1000} \times l \quad (51)$$

где h_i , h_{i-1} – отметки (высоты) соответственно конечной и начальной точек элемента профиля (в метрах);

i – уклон элемента профиля, ‰;

l – длина элемента профиля пути, м.

8.2 Спрямление профиля пути

Для упрощения тяговых расчётов продольный профиль подвергают обработке. Спрямление профиля пути – это замена несколько мало отличающихся крутизной элементов одним, длина которого равна сумме длин этих элементов.

Правила спрямления пути

1. Разрешается спрямлять элементы профиля только одного знака.
2. Нельзя спрямлять элементы пути со станциями.
3. Нельзя спрямлять элементы пути с расчётным подъёмом

Спрямлённый уклон i'_c (‰) определяется по формуле:

$$i'_c = \frac{\sum_{j=1}^k i_j S_j}{\sum_{j=1}^k S_j} = \frac{i_1 S_1 + i_2 S_2 + \dots + i_k S_k}{S_1 + S_2 + \dots + S_k}, \quad (52)$$

где k – количество элементов профиля, используемых для спрямления;

$i_1, i_2, \dots, i_k$ – уклоны 1-го, 2-го и k -го элементов профиля, ‰;

$S_1, S_2, \dots, S_k$ – длины 1-го, 2-го и k -го элементов профиля, м.

Для каждого элемента действительного (исходного) профиля пути, входящего в спрямлённый участок, должно выполняться неравенство:

$$S_j \leq \frac{2000}{i'_c - i_j}, \quad (1 \leq j \leq k) \quad (53)$$

Если это условие не выполняется, то необходимо выбрать другой вариант объединения элементов.

Фиктивный подъём i''_c (‰) определяется по формуле:

$$i''_c = \frac{700}{S_c} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{S_{кр.j}}{R_{кр.j}}, \quad (54)$$

где n – количество элементов спрямлённого профиля с заданными длинами и радиусами кривой;

S_c – длина спрямлённого элемента, м;

$S_{кр.j}$ – длина j -той кривой, м;

$R_{кр.j}$ – радиус j -той кривой, м;

j – порядковый номер кривой, $1 \leq j \leq n$

Приведённый (окончательный) уклон i_c (‰) определяется по формуле:

$$i_c = i'_c + i''_c \quad (55)$$

Уклоны в ‰ определяются с точностью до десятых.

8.3 Построение профиля пути



Контрольные вопросы:

1. Что называется продольным профилем участка?
2. Что называется спрямлением профиля пути?
3. Назовите правила спрямления профиля пути.

Лекция 9

Тормозные силы поезда. Назначение, классификация.

План лекции

9.1 Назначение тормозных сил

9.2 Классификация тормозных сил

9.3 Образование тормозной силы при механическом торможении и её ограничение

9.1 Назначение тормозных сил

Тормозными силами называют управляемые внешние силы, действующие против движения поезда для снижения скорости движения или поддержания её на спуске. От значения тормозных сил зависит безопасность движения поездов. Поэтому должна быть обеспечена высокая надёжность и эффективность тормозов.

9.2 Классификация тормозных сил

В зависимости от принципа создания тормозных сил применяют механическое и электрическое торможение. При механическом движении тормозная сила образуется в результате трения тормозных колодок о поверхности катания колёс или о тормозные диски, специально укреплённые на колёсных парах некоторых типов пассажирских вагонов и вагонов электропоезда. Тормозные силы создаются на ободах всех колёсных 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 одновременным 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 идёт 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 отдаётся в контактную сеть для полезного использования. Естественно, что тормозные силы при электрическом торможении можно получить на ободах только движущих колёсных пар.

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.

При механическом торможении поезда в создании тормозных сил участвует значительно большее число колёсных пар (локомотива, вагонов), создающих соответственно большие тормозные силы.

9.3 Образование тормозной силы при механическом торможении и её 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 (рисунок 13) с силой K_1 , то в месте контакта возникает сила трения $K_1\varphi_k$, противодействующая вращению колеса (φ_k — коэффициент трения колодки о колесо).

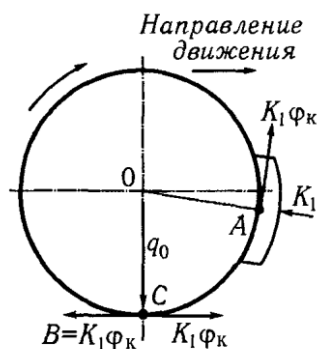


Рисунок 13 – Образование тормозной силы

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_0 , то в результате сцепления колеса с рельсом сила $K_1\varphi_k$, приложенная от колеса к рельсу и стремящаяся сдвинуть рельс по направлению движения, вызовет реакцию рельса В, равную силе $K_1\varphi_k$ 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, Н:

$$B=1000K\varphi_k, \quad (56)$$

где K – суммарная сила нажатия колодок на колесную пару, кН.

Сила K 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 K 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 –

$$\varphi_k = 0,6 \cdot \frac{1,63K + 100}{8,15K + 100} \cdot \frac{v + 100}{5v + 100}; \quad (57)$$

для чугунных колодок с повышенным содержанием фосфора –

$$\varphi_k = 0,5 \cdot \frac{1,63K + 100}{5,3K + 100} \cdot \frac{v + 100}{5v + 100}; \quad (58)$$

для композиционных колодок –

$$\varphi_k = 0,44 \cdot \frac{0,1K + 20}{0,41K + 20} \cdot \frac{v + 150}{2v + 150}; \quad (59)$$

где K – действительная сила нажатия колодок на одну колёсную пару, кН.

В таблице 3 приведены значения φ_k для различных типов колодок при различных скоростях движения и нажатии 24,5 кН.

Таблица 3 – Значения φ_k различных тормозных колодок

Скорость, v км/ч	Чугунные	Чугунных колодок с повышенным содержанием фосфора	Композиционные
0	0,280	0,304	0,329
10	0,205	0,223	0,309
20	0,168	0,183	0,294
40	0,130	0,142	0,271
60	0,112	0,122	0,256
80	0,100	0,110	0,244
100	0,093	0,101	0,235
120	0,088	0,096	0,228
140	0,084	0,091	0,222
160	0,080	0,088	0,217

Для получения повышения тормозного эффекта в поезде и повышения безопасности движения необходимо иметь возможно большие тормозные силы. Однако они ограничиваются сцеплением колёс подвижного состава с рельсами. Если тормозная сила колёсной пары превышает силы сцепления колёс, то начнётся проскальзывание колёс относительно рельсов. Колёсная пара может перестать вращаться — заклинить тормозными колодками и перейти к скольжению по рельсу. Возникнет так называемый юз. В результате этого на поверхностях катания колёс образуются местные износы — выбоины. В дальнейшем при качении такой колёсной пары слышны удары при каждом обороте колеса.

Чтобы исключить юз колёсных пар, тормозная сила должна быть меньше или в пределе равна силе сцепления колёс с рельсами:

$$n_k K \varphi_k \leq \psi q_0, \quad (60)$$

где ψ - коэффициент сцепления колесной пары с рельсами;

q_0 — 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:

$$\delta = n_k K / q_0 \leq \psi / \varphi_k. \quad (61)$$

Обычно при расчетах принимают следующие значения коэффициента нажатия колодок: чугунные колодки — для локомотивов $\delta = 0,5 \dots 0,6$; для грузовых вагонов $\delta = 0,6 \dots 0,7$; для пассажирских вагонов $\delta = 0,7 \dots 0,9$. При композиционных колодках $\delta = 0,3$.

Контрольные вопросы:

1. Что называется тормозными силами?
2. На чём основан механический способ создания тормозных сил?
3. На чём основан электрический способ создания тормозных сил?
4. Чем ограничивается тормозная сила?

Лекция 10

Расчет тормозных сил поезда, тормозной коэффициент.

План лекции

10.1. Расчёт тормозных сил поезда

10.1 Расчёт тормозных сил поезда

Тормозную силу поезда определяют как сумму тормозных сил, развиваемых каждой колесной парой подвижного состава:

$$B_T = 1000 \sum K \varphi_k \quad (62)$$

где B_T – тормозная сила поезда, Н;

K – сила нажатия колодок на колёсную пару, кН;

1000 – переводной коэффициент (кН в Н).

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 от силы нажатия K , другим значением – расчетным коэффициентом трения $\varphi_{кр}$, не зависящим от силы K .

Расчётный коэффициент трения $\varphi_{кр}$ определяется по формулам:

для чугунных колодок –

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{v + 100}{5v + 100}; \quad (63)$$

для композиционных колодок –

$$\varphi_{кр} = 0,36 \frac{v + 150}{2v + 150}; \quad (64)$$

Значения расчётных коэффициентов трения колодок о колёса приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значение расчётного коэффициента трения $\phi_{кр}$ тормозных колодок

Скорость, v км/ч	Чугунные	Композиционные
0	0,270	0,360
10	0,198	0,339
20	0,162	0,332
30	0,140	0,309
40	0,126	0,297
50	0,116	0,288
60	0,108	0,280
70	0,102	0,273
80	0,097	0,267
90	0,093	0,262
100	0,090	0,257
110	0,087	0,253
120	0,085	0,249
130	0,083	0,246
140	0,081	0,242
150	0,079	0,240
160	0,077	0,237

Расчётные силы нажатия K_p могут определены по формулам, кН:

для стандартных чугунных колодок -

$$K_p = 2,22K \frac{1,63K + 100}{8,15K + 100} \quad (65)$$

для чугунных колодок с повышенным содержанием фосфора –

$$K_p = 1,85K \frac{1,63K + 100}{5,3K + 100} \quad (66)$$

для композиционных колодок –

$$K_p = 1,22K \frac{0,1K + 20}{0,41K + 20} \quad (67)$$

Если в одном поезде окажутся вагоны с чугунными и композиционными колодками, то силу нажатия колодок на бандажи пересчитываю на один вид

колодок (обычно чугунных) с учетом равной эффективности тормозов.

Расчётные силы нажатия при различных режимах приведены в таблице 5.

Таблица 5

Тип вагона	Расчётная сила нажатия тормозных колодок на ось K_p , кН, при режимах		
	гружёном	среднем	порожнем
Грузовые вагоны, оборудованные чугунными тормозными колодками	69	49	34
Грузовые вагоны, оборудованные композиционными тормозными колодками (в пересчёте на чугунные колодки)	84	69	34
Вагоны рефрижераторного подвижного состава с чугунными тормозными колодками	88	59	34

При известных расчётных нажатиях тормозных колодок на оси подвижного состава и расчётных коэффициентах трения колодок о колёса тормозную силу поезда определяют суммированием тормозных сил, развиваемых каждой колёсной парой:

$$B_T = 1000 \varphi_{кр} \sum K_p. \quad (68)$$

Удельную тормозную силу b_T , Н/кН, определяют по формуле:

$$b_T = \frac{B_T}{mg} = 1000 \varphi_{кр} \frac{\sum K_p}{mg} \quad (69)$$

Отношение суммарных сил расчётного нажатия колодок на колёса к весу поезда называют расчётным тормозным коэффициентом поезда:

$$\vartheta_p = \frac{\sum K_p}{mg} \quad (70)$$

Тогда удельная тормозная сила –

$$b_T = 1000 \varphi_{кр} \vartheta_p \quad (71)$$

Расчетный тормозной коэффициент характеризует степень обеспечения поезда тормозными средствами. Чем больше ϑ_p , тем больший тормозной

эффект создадут тормозные силы, тем быстрее можно остановить поезд. Наименьшее значение расчетного тормозного коэффициента при пневматических тормозах на чугунных и композиционных колодках 0,33 установлено для:

груженых грузовых, порожних грузовых поездов с числом осей 400 до 500, рефрижераторных поездов при скоростях движения 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 локомотивом 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 скорости = 90..100 км/ч на пневматических тормозах и композиционных колодках должны иметь не менее 0,55.

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 отдельных 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 — $0,59_{р.}$. В случае применения полного служебного торможения принимают $0,89_{р.}$

Контрольные вопросы:

1. Как определяют тормозную силу поезда?
2. Как определить тормозную силу поезда, если вагоны в составе не однотипные и имеют разную силу нажатия колодок на колёса?

Лекция 11

Обеспеченность поезда тормозными средствами

План лекции

11.1 Обеспеченность поезда тормозными средствами

11.1 Обеспеченность поезда тормозными средствами

Для обеспечения безопасности движения, т.е. возможности остановки поезда на установленной длине тормозного пути, необходимо знать, а имеет ли данный поезд необходимые для этой цели тормозные средства. В соответствии с принятыми на железных дорогах России нормами тормозных расчетов обеспеченность поезда тормозными средствами характеризуется величиной расчетного тормозного коэффициента, представляющего собой отношение суммарной расчетной силы нажатия тормозных колодок поезда к его массе (масса вагонов и локомотива). Суммарная расчетная сила нажатия тормозных колодок определяется умножением установленного расчетного нажатия тормозных колодок на одну ось на количество осей поезда. Установлены следующие величины расчетных нажатий на одну ось чугунных тормозных колодок: 8, 9 и 10 т для пассажирских вагонов с массой тары соответственно 42—47, 48—52, 53 т и более; 3,5; 7,0 и 5,0 т для грузовых вагонов соответственно на порожнем, груженом и среднем режимах работы воздухораспределителя; 9 и 6 т для рефрижераторных вагонов соответственно на груженом и среднем режимах торможения. При композиционных тормозных колодках грузовых вагонов установлены величины нажатия колодок на ось 7,0 т на среднем режиме и 3,5 т на порожнем режиме торможения.

Наряду с расчетным тормозным коэффициентом на практике используют величину нажатия тормозных колодок, приходящуюся на каждые 100 т массы поезда. Для груженых грузовых поездов нажатие тормозных колодок на каждые 100 т массы поезда должно быть не менее 33 т, а для порожних грузовых поездов — не менее 58 т. Для рефрижераторных поездов нажатие

тормозных колодок должно быть не менее 33 т на каждые 100 т массы поезда при скоростях движения до 90 км/ч и не менее 55 и 60 т при скоростях движения соответственно 90—100 и 100—120 км/ч. Для пассажирских поездов нажатие тормозных колодок на каждые 100 т массы поезда должно быть не менее 60, 78 и 80 т при скоростях движения соответственно до 120, 120—140, 140—160 км/ч. При этом при скоростях движения 120—160 км/ч обязательно применение электропневматического тормоза и композиционных колодок.

Расчет суммарного нажатия тормозных колодок на все оси поезда производит осмотрщик-автоматчик. Результаты расчета записываются им в справку формы ВУ-45, которая передается машинисту локомотива. В этой справке также указываются: номер поезда и локомотива, масса поезда и количество осей поезда; количество ручных тормозов в осях; плотность тормозной магистрали поезда.

Иногда в условиях эксплуатации не могут быть обеспечены вышеуказанные нормативы минимального нажатия тормозных колодок. В этом случае можно вести поезд, но максимальная скорость движения, установленная из расчета тормозных средств с нормальной эффективностью действия тормозов, должна быть уменьшена на 2 км/ч на каждую недостающую тонну нажатия тормозных колодок на каждые 100 т массы грузового поезда независимо от уклона пути; на 1,0 км/ч для спусков пути до 6 ‰ и на 2,0 км/ч для спусков круче 6 ‰ на каждую недостающую тонну нажатия тормозных колодок на каждые 100 т массы пассажирского и рефрижераторного поездов. Полученная таким образом допустимая скорость движения округляется до величины, кратной 5 км/ч в сторону уменьшения. Например, при недостатке нажатия тормозных колодок грузового поезда 3,0 т на каждые 100 т массы поезда наибольшая допустимая скорость движения должна быть 94 км/ч или округленно 90 км/ч при максимально установленной для грузовых поездов скорости движения 100 км/ч при 33 т нажатия колодок на каждые 100 т массы поезда.

В исключительных случаях при недостатке нажатия тормозных колодок

наибольшие допустимые скорости движения может устанавливать начальник дороги, пользуясь номограммами тормозных путей, которые построены на основании проведенных ранее расчетов тормозных путей по принятой на железных дорогах России методике при различных массах поезда, скоростях движения, уклонов пути и величинах расчетного нажатия тормозных колодок на каждые 100 т массы поезда при экстренном (ЭТ) и полном служебном торможении (ПСТ). При этом величина наибольшей допустимой скорости движения должна быть на 20 % меньше скорости, определенной по номограммам.

Контрольные вопросы:

1. Чем характеризуется обеспеченность поезда тормозными средствами?

Лекция 12

Характеристики электрического торможения и принципы регулирования

План лекции

12.1 Электрическое торможение

12.1 Электрическое торможение

Для торможения подвижного состава тяговые двигатели переводятся в генераторный режим, при котором они создают тормозной момент. Их якоря получают вращение через зубчатую передачу от вращения колесных пар за счет запасенной кинетической энергии поезда или при движении поезда под уклон. На проводники обмотки якоря каждого электродвигателя будет действовать выталкивающая сила, направленная против вращения якоря, затормаживающая вращение якоря, а через зубчатую передачу затормаживающая вращение колесной пары.

В зависимости от условий, при которых требуется осуществлять торможение, генератор может отдавать электрическую энергию в сеть или гасить ее в реостате. В первом случае торможение называется рекуперативным, во втором — реостатным.

Рекуперативное торможение с энергетической точки зрения является наиболее выгодным, так как отданная в сеть электрическая энергия полезно используется другими электровозами или электропоездами. Рекуперативное торможение возможно в случае превышения напряжения контактной сети вырабатываемой электродвигателем ЭДС. Это невозможно при последовательном возбуждении тяговых двигателей, которые используются в режиме тяги. В этом случае при переходе в режим рекуперативного торможения тяговые двигатели переключают на независимое возбуждение.

В случае подключения к обмотке якоря резистора электроэнергия, вырабатываемая электродвигателем, будет гаситься на резисторе — выделяется в виде тепла. За счет изменения величины сопротивления резистора можно

регулировать величину тормозной силы. Такой способ электрического торможения называется реостатным.

Преимуществом электрического торможения является значительно меньшая склонность колес к заклиниванию (юз) при больших значениях тормозной силы, чем при механическом торможении, и способность к самозащите колес от юза. В этом случае юз, как правило, проявляется в форме частичного проскальзывания колес по рельсу без резкой потери сцепления, как это имеет место при механическом торможении.

Преимущества электрического торможения: экономия тормозных колодок, простота управления на спусках, а при рекуперативном торможении и экономия электроэнергии.

Контрольные вопросы:

1. Какие два вида электрического торможения применяются на электровозах?

Лекция 13

Тормозные задачи и методы их решения

План лекции

13.1. Торможение поезда

13.2 Тормозные задачи и методы их решения

13.1. Торможение поезда

Тормозные средства поезда, создающие тормозные силы, определяют уровень безопасности движения поездов. Поэтому процесс торможения поездов необходимо рассмотреть более подробно. При торможении поезда тормозная сила возникает не сразу после поворота рукоятки крана машиниста в тормозное положение. Требуется время на распространение воздушной волны по тормозной магистрали поезда, срабатывание воздухораспределителей, перемещение тормозной рычажной передачи до соприкосновения тормозных колодок до установившегося значения. В связи с тем, что воздухораспределители вагонов головной части срабатывают раньше воздухораспределителей хвостовой части, головная часть поезда начинает тормозить раньше, а хвостовая – позднее. Тормозная сила вагонов, таким образом, возникает через некоторое время, постепенно увеличиваясь до установившегося значения.

13.2 Тормозные задачи и методы их решения

Поскольку режим торможения является важнейшим в обеспечении безопасности движения поездов, тормозным расчётам уделяют большое внимание и сводят их к решению тормозных задач. При этом приходится иметь дело с длиной тормозного пути S_t , наличием тормозных средств в поезде, определяемых расчётным тормозным коэффициентом ϑ_p , начальной v_n и конечной v_k скоростями движения и уклонами i . Конечную скорость обычно принимают равной нулю. Из этих пяти параметров определяют один из четырёх

заданных, используя аналитический или графический метод решения уравнения движения поезда. В зависимости от того, какую величину из пяти определяют, тормозные задачи подразделяются на три типа:

первый тормозная задача сводится к определению длины тормозного пути по заданным значениям v_n , v_k , v_p и i .

вторая тормозная задача рассчитывает допустимые скорости движения v_n на различных уклонах i , исходя из условия остановки поезда в пределах заданного тормозного пути S_t при заданном значении ϑ_p .

третья тормозная задача определяет, сколько тормозных средств нужно иметь в поезде (или какой должен быть ϑ_p), чтобы поезд, движущийся с заданной скоростью v_n , можно было остановить на заданном уклоне i в пределах тормозного пути S_t .

Контрольные вопросы:

1. Как возникают тормозные силы?
2. На какие типы подразделяются тормозные задачи?

Лекция 14

Решение тормозных задач с помощью номограмм.

План лекции

14.1. Тормозной путь и его определение. Расчёт тормозного пути

14.2 Тормозные расчёты с помощью номограмм

14.1. Тормозной путь и его определение. Расчёт тормозного пути

В расчётах увеличение тормозной силы условно заменяют мгновенным скачком тормозной силы, происходящим после поворота рукоятки крана машиниста в тормозное положение через время t_n . Его называют временем подготовки тормозов к действию. В течение времени принимают движение поезда равномерным. За это время поезд пройдёт пути S_n называемый подготовительным тормозным или предтормозным путём. Путь, проходимый поездом с действующими тормозами, называют действительным тормозным путём S_d .

Таким образом, тормозной путь, проходимый от поворота рукоятки крана машиниста до остановки поезда S_T , равен сумме подготовительного S_n и действительного тормозных путей S_d :

$$S_T = S_n + S_d \quad (72)$$

При равномерном движении со скоростью v_n (км/ч) подготовительный тормозной путь рассчитывается по формуле, м:

$$S_n = v_n t_n / 3,6 = 0,278 v_n t_n \quad (73)$$

где t_n – время подготовки тормозов, с;

3,6 – коэффициент, учитывающий соотношение между единицами скорости км/ч и м/с.

Однако скорость поезда в период подготовки тормозов t_n не постоянна: при движении на выбеге по горизонтальному пути или подъёму она снижается, а при следовании по крутому спуску – возрастает. Чтобы учесть её изменения, вводят поправку на время, увеличивая его на спусках и уменьшая на подъёмах.

При экстренном торможении для определения t_{π} используют следующие формулы:

для грузовых составов длиной 200 колёсных пар (осей) и менее при автоматических тормозах, а также для одиночно следующих грузовых локомотивов –

$$t_{\pi} = 7 - \frac{10i}{1000\vartheta_p \varphi_{кр}}; \quad (74)$$

для грузовых составов длиной более 200 до 300 осей при автоматических тормозах –

$$t_{\pi} = 10 - \frac{15i}{1000\vartheta_p \varphi_{кр}}; \quad (75)$$

для грузовых составов длиной более 300 осей при автоматических тормозах –

$$t_{\pi} = 12 - \frac{18i}{1000\vartheta_p \varphi_{кр}}; \quad (76)$$

где i – приведённый уклон, ‰. Для подъёмов его берут со знаком «+», для спусков со знаком «-»;

ϑ_p – расчётный коэффициент трения колодки о колесо при наибольшей скорости движения.

Число осей в грузовом составе n_c определяется по формуле:

$$n_c = \frac{p_8 m_c}{100 m_{во8}} + \frac{p_6 m_c}{100 m_{во6}} + \frac{p_4 m_c}{100 m_{во4}}; \quad (77)$$

где p_8 , p_6 , p_4 – процентное содержание в составе (по массе) соответственно восьмиосных, шестиосных, четырёхосных вагонов;

m_c – масса состава, т;

$m_{во8}$, $m_{во6}$, $m_{во4}$ – масса, т, приходящаяся на ось соответственно восьмиосного, шестиосного, четырёхосного вагона.

Если срабатывает автостоп, то время подготовки автоматических тормозов t_{π} увеличивают на 14 с (время срабатывания системы автостопа).

При ручных тормозах время подготовки к действию берут равным 60с,

причём в расчётах учитывают тормозную силу локомотива и тормозных вагонов. Расчётную силу нажатия чугунных тормозных колодок при ручном торможении принимают для рефрижераторных поездов 39,2 кН на ось; для грузовых вагонов с тормозной площадкой – 19,6 кН; для локомотивов – 49 кН.

Тормозная сила локомотива, развиваемая вспомогательным тормозом при удержании остановившегося поезда на отдельном пункте, имеющем уклон, кН –

$$B_T = 0,25 \Sigma K_p. \quad (78)$$

Действительный тормозной путь, м, определяют по формуле:

$$S_d = \sum \frac{500(v_2^2 - v_1^2)}{\zeta(1000\vartheta_p \phi_{кр} + \omega_{ox} + i)}, \quad (79)$$

где v_2, v_1 – конечная и начальная скорости в каждом интервале скоростей, км/ч;

$1000\vartheta_p \phi_{кр} + \omega_{ox} + i$ – замедляющая сила при экстренном торможении, Н/кН, при средней скорости в каждом интервале;

ζ – замедление поезда, при действии удельной замедляющей силы в 1 Н/кН, км/ч², для грузового поезда $\zeta=120$ км/ч².

В случае применения полного служебного торможения время подготовки считают таким же, как и для экстренного, а расчётный тормозной коэффициент уменьшают на 20%.

14.2 Тормозные расчёты с помощью номограмм

Номограммы – графики, связывающие тормозные пути при экстренном торможении с расчётными тормозными коэффициентами и со скоростями движения в начале торможения. Такие номограммы выполнены для разных уклонов и приведены для площадок и спусков через 2 ‰ для грузовых и пассажирских поездов.

На рисунке 14 приведён график $S_T(\vartheta_p)$ при скоростях движения от 30 до 120 км/ч для грузового поезда на горизонтальном прямолинейном пути ($i=0$).

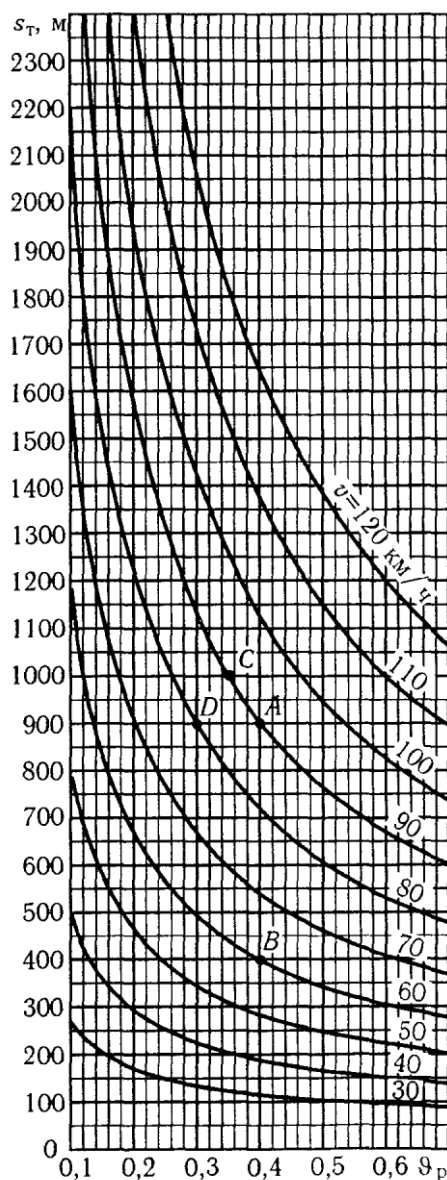


Рисунок 14 – Номограмма для тормозных расчётов грузового поезда при $i=0$

Для определения тормозного пути с начальной скорости, например 90 км/ч при $\vartheta_p=0,4$, находим точку A пересечения кривой $S_T(\vartheta_p)$ при $v=90$ км/ч с вертикальной линией, соответствующей $\vartheta_p=0,4$. 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, находи дополнительную точку B при $v=60$ км/ч. Тормозной путь будет равен разности ординат точек A и B: $900-405=495$ м.

Номограмму можно также использовать для:

определения необходимого расчётного коэффициента, при котором поезд

можно было остановить с заданной скорости в пределах заданного тормозного пути;

определения наибольшей скорости по заданному тормозному пути и расчётному тормозному коэффициенту.

Имея набор номограмм, можно находить результаты тормозных расчётов без выполнения самих расчётов.

Контрольные вопросы:

1. Как определяется тормозной путь?
2. Что называют номограммами тормозных расчётов?
3. Как используются номограммы при тормозных расчётах?

Лекция 15

Масса поезда. Методы расчёты массы поезда поезда

План лекции

15.1 Общие сведения о массе состава поезда

15.2 Условия расчёта массы грузового поезда

15.3 Выбор расчётного подъёма

15.4 Расчет массы состава по условию движения поезда с равномерной скоростью на расчетном подъеме и расчетной скорости по тяговым характеристикам

15.5 Проверка массы состава по условиям трогания поезда с места

15.6 Проверка массы состава по длине станционных путей

15.7 Расчет массы состава с использованием кинематической энергии поезда

15.1 Общие сведения о массе состава поезда

Масса состава – один из важнейших показателей, влияющих на эффективность работы железной дороги. Норма массы состава грузового поезда – один из важнейших показателей, который определяет количественную и качественную стороны работы железной дороги и, прежде всего, размеры движения, мощность локомотивов, полезную длину приемоотправочных путей и динамическую прочность сцепных приборов подвижного состава.

Увеличение масс составов в допустимых пределах позволяет повысить провозную способность железнодорожных линий, снизить себестоимость и повысить экономичность перевозок, улучшить использование силы тяги и мощность локомотива, снизить удельный расход электрической энергии или топлива на тягу поездов.

Чрезмерно большая масса состава может вызвать преждевременный выход из строя оборудования локомотива.

15.2 Условия расчёта массы грузового поезда

Масса грузового состава рассчитывается исходя из полного использования мощности и тяговых качеств локомотива при движении по наиболее тяжелому подъему в соответствии с нормами. В целях повышения провозной способности линий, для обеспечения унифицированной массы состава и технической скорости движения, необходимо предусматривать применение кратной тяги и подталкивания на лимитирующих перегонах, безостановочный пропуск поездов по станциям, за которыми расположены крутые подъемы и т.д.

Затем её проверяют по условиям трогания на отдельных пунктах, возможности расположения поезда в пределах длины приёмно-отправочных путей на станциях и нагреванию тяговых электродвигателей или генераторов.

На тех участках дорог, где климатические условия значительно изменяются в зависимости от времени года, расчетная масса состава должна определяться для летнего и зимнего периодов.

15.3 Выбор расчётного подъёма

Перед расчетом массы состава грузового поезда анализируют профиль пути и выбирают наиболее тяжелый для движения поезда подъем, называемый расчетным (i_p), с учётом его крутизны и крутизны уклонов, прилегающих к нему элементов профиля 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 и принимают за расчетный. Наименьшую допустимую ПТР скорость движения по подъёму называют расчётной скоростью, а реализуемую при этом локомотивом силу тяги – расчётной силой тяги.

Если же наиболее крутой подъем имеет небольшую протяженность, а характер прилегающих к нему элементов профиля пути, допускаемые скорости по состоянию пути и расположение остановочных пунктов позволяют установить, что этот подъем может быть преодолен с использованием

кинетической энергии поезда, то такой подъем не следует принимать за расчетный. В этом случае выбор расчетного подъема усложняется, и массу состава определяют с учетом использования кинетической энергии поезда (метод подбора).

На расчётном подъёме учитывают дополнительное сопротивление движению от спрямлённого подъёма и кривых, которые заменяют фиксированными подъёмами в пределах спрямлённого элемента. Если на наиболее трудном подъёме протяжённостью более длины поезда находится одна или несколько кривых малого радиуса, то спрямлённые элементы разбивают на элементы, длина которых должна быть не более длины поезда.

За расчётный подъём принимают тот из полученных приведённых элементов, на котором дополнительное сопротивление от кривой наибольшее. В том случае, когда отличие в крутизне приведённых элементов не превышает 0,3 %, их длину можно принимать больше длины поезда. Расчётный подъём выбирают для каждого направления движения. При этом массы поезда для разных направлений движения оказываются различными.

Расчётную силу тяги и расчётную скорость локомотива устанавливают по тяговой характеристике, исходя из возможно более полного использования мощности локомотива с учётом ограничений силы тяги. Расчётную силу тяги и скорость тепловоза устанавливают по тяговой характеристике на последней позиции контроллера машиниста, соответствующей полному использованию мощности дизеля при токе продолжительного режима.

15.4 Расчет массы состава по условию движения поезда с равномерной скоростью на расчетном подъеме и расчетной скорости по тяговым характеристикам

При движении поезда по расчётному подъёму с установившейся расчётной скоростью масса состава m_c , т, определяется по формуле:

$$m_c = \frac{F_{кр} - (\omega'_0 + i_p)m_l g}{(\omega''_0 + i_p)g}, \quad (78)$$

где ω'_0 - основное удельное сопротивление движению локомотива, $\frac{\text{Н}}{\text{кН}}$;

ω''_0 - основное удельное сопротивление движению вагонов, $\frac{\text{Н}}{\text{кН}}$;

$F_{\text{кр}}$ – расчётная сила тяги, Н;

i_p – расчётный подъём, ‰;

$m_{\text{л}}$ – масса локомотива, т;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

15.5 Проверка массы состава по условиям трогания поезда с места

Масса состава по условиям трогания $m_{\text{с тр}}$, т определяется по формуле:

$$m_{\text{с тр}} = \frac{F_{\text{кр тр}}}{(\omega_{\text{тр}} + i_{\text{тр}})g} - m_{\text{л}}, \quad (79)$$

где $F_{\text{кр тр}}$ – сила тяги локомотива при трогании с места, Н; устанавливается по тяговой характеристике при $v = 0$;

$\omega_{\text{тр}}$ - удельное сопротивление при трогании с места, $\frac{\text{Н}}{\text{кН}}$; определяется по формуле

$$\omega_{\text{тр}} = \frac{28}{m_{\text{во}} + 7},$$

где $m_{\text{во}}$ – масса, приходящаяся на ось состава в целом, т; $m_{\text{во}} = 20$ т.

Если $m_{\text{с тр}} > m_{\text{с}}$, то поезд может тронуться с места остановки, если $m_{\text{с тр}} < m_{\text{с}}$, то трогание невозможно.

15.6 Проверка массы состава по длине станционных путей

Длина поезда $l_{\text{п}}$, м определяется по формуле:

$$l_{\text{п}} = l_{\text{с}} + n_{\text{л}} l_{\text{л}} \quad (80)$$

где $l_{\text{с}}$ – длина состава, м;

$l_{\text{л}}$ - длина локомотива, м;

$n_{\text{л}}$ – число локомотивов, м.

Длина состава l_c , м определяется по формуле

$$l_c = \sum n_i l_i \quad (81)$$

где l_i – длина вагоном по осям автосцепки, м;

n_i – число однотипных вагонов в сформированном составе.

Число вагонов каждого типа n_i определяется по формуле

$$n_i = \frac{m_c}{m_b} \cdot \frac{p_i}{100} \quad (82)$$

где m_c – масса состава, т;

p_i – процентное соотношение однотипных вагонов в составе, %;

m_b – масса однотипных вагонов, т.

Таблица 6 - Длины по осям автосцепки, м

Полувагон			Цистерна		Платформа
8 осей	6 осей	4 оси	8 осей	4 оси	4 оси
20	17	14	21	12	14

В расчётах учитывают неточности установки поезда, которое принимают равным 10 м. В этом случае, условие для проверки массы состава по длине станционных путей:

$$l_{\pi} + 10 \leq l_{\text{поп}},$$

где $l_{\text{поп}}$ – длина приёмо-отправочных путей, м

Если условие выполняется, то поезд установится в пределах станционных путей, иначе поезду необходимо пропустить эту станции без остановки.

15.7 Расчет массы состава с использованием кинематической энергии поезда

Если характер профиля пути, расположение остановочных пунктов и допускаемые скорости движения по состоянию пути на участке не позволяют надёжно определить расчетный затяжной подъем, то массу состава рассчитывают методом подбора.

Для этого задаются расчетным подъемом по значению меньшим, чем

самый крутой на участке, определяют по нему массу состава по формуле (78) и рассчитывают удельные ускоряющие силы поезда. Полученную массу состава проверяют на прохождение поездом участков профиля пути с подъемами большей крутизны, чем расчетный подъем, учитывая при этом использование кинетической энергии поезда. Такую проверку выполняют аналитически или графическим методом.

При аналитическом методе для проверки прохождения подъёмов большей крутизны сначала определяют проходимый поездом путь, м, для этого используют формулу:

$$S = \sum \Delta S = \frac{4,17(v_{ki}^2 - v_{hi}^2)}{(f_{к\text{ ср}} - \omega_{к\text{ ср}})_i}, \quad (83)$$

где v_{ki} , v_{hi} - начальная и конечная скорости в каждом интервале, км/ч;

ΔS_i - путь, проходимый поездом за время изменения скорости от до , м;

$(f_{к\text{ ср}} - \omega_{к\text{ ср}})_i$ - среднее значение ускоряющей или замедляющей силы поезда действующей на каждом интервале скоростей $v_{hi} \dots v_{ki}$, Н/кН.

Затем если в интервале скоростей от v_h до конечной – расчётной скорости v_p поезд пройдёт путь S больший чем длина проверяемого подъёма, то поезд преодолеет этот подъём за счёт работы, совершаемой локомотивом, с использованием запасённой в поезде кинетической энергии. В том случае, когда S окажется меньше длины проверяемого подъёма, такой состав локомотив не может провести по этому подъёму. Тогда массу состава уменьшают и повторяют проверочный расчёт.

Для повышения точности расчёта интервалы изменения скорости нужно брать в пределах 10 км/ч.

Формулу (83) удобно использовать, если известна скорость подхода к проверяемому элементу. Если же она неизвестна, то расчёт приходится вести для ряда элементов от места, в котором скорость известна.

При графической методе массу состава m_{cl} рассчитывают по формуле (79) для подъёма 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 подъёме скорость не опустится ниже расчётной v_p , то поезд можно провести по участку. Если же в конце подъёма скорость окажется ниже v_p , то нужно уменьшить массу состава и повторить построения.

Контрольные вопросы:

1. Что называют нормой массы состава грузового поезда?
2. Какие показатели можно повысить с увеличением массы состава в допустимых пределах?
3. К чему может привести чрезмерное увеличение массы состава?
4. Исходя из каких условий рассчитывается масса грузового состава?
5. Какой подъём на профиле пути называется расчётным?
6. Что называется расчётной силой тяги?
7. При каких условиях наиболее крутой подъём на профиле пути не следует принимать за расчётный?
8. При каких условиях массу состава рассчитывают методом подбора?
9. Как рассчитать массу состава методом подбора?

Лекция 16

Условия движения поезда в режимах тяги, выбега и торможения

План лекции

16.1 Условия движения поезда

16.1 Условия движения поезда

В результате взаимодействия 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 горизонтальной осей. Кроме того, возникают колебания подвижного состава и его узлов. Учёт сил, вызывающих эти перемещения, самих перемещений и колебаний усложнил бы изучение закономерностей движения поезда.

Поэтому в расчётах 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 колёсные пары, а у локомотивов – также якоря тяговых электродвигателей и элементы передачи. Остальные перемещения в учёт не принимают. Замена рассредоточенной массы поезда материальной точки вносит некоторую погрешность в расчёты при движении на переломах профиля пути. Однако она вполне допустима для обычных расчётов, связанных с движением поезда.

Кроме совершения работы по перемещению поезда, локомотив 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 движение по подъёму – на повышение потенциальной энергии, равной произведению веса поезда на высоту подъёма.

В режиме выбега, когда передачи тепловозов отсоединяют дизели от колёсных пар, поезд не потребляет энергию. Он движется за счёт запасённой 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 подъём с уменьшением скорости.

При торможении к силам сопротивления движения прибавляются тормозные силы.

Контрольные вопросы:

1. Почему в тяговых расчётах поезд представляют в виде материальной точки?
2. Какими силами, возникающими при движении поезда, пренебрегают в тяговых расчётах?

Лекция 17

Уравнение движения поезда

План лекции

17.1 Уравнение движения поезда

17.1 Уравнение движения поезда

Уравнением движения поезда называют математическое выражение, связывающее кинематические параметры движения поезда (скорость, время хода) с величинами действующих на него сил. Уравнение движения поезда показывает связь между силами, действующими на поезд, и ускорением его движения.

Уравнением движения поезда называют выражение:

$$F_y = \frac{m(1 + \gamma)a}{12,96} \quad (84)$$

где F_y – ускоряющая сила поезда, Н;

m – масса поезда, т;

γ – коэффициент инерции вращающихся частей;

a – ускорение движения поезда, км/ч².

Значения коэффициентов инерции вращающихся частей $(1 + \gamma)$ различны для разных видов подвижного состава (таблица 7). Коэффициент γ для поезда, состоящего из различного типа вагонов и локомотивов, определяют как средневзвешенную величину по формуле:

$$\gamma = \frac{m_{c1}\gamma_1 + m_{c2}\gamma_2 + \dots + m_{\text{л}}\gamma_{\text{л}}}{m} \quad (85)$$

где $m_{c1}, m_{c2}, \dots$ – массы отдельных частей состава в тоннах, имеющих коэффициенты соответственно $\gamma_1, \gamma_2, \dots$;

$m_{\text{л}}$ – масса локомотива в тоннах, имеющего коэффициент $\gamma_{\text{л}}$;

m – масса поезда, т.

Уравнением движения также является выражение:

$$a = \zeta f_y \quad (86)$$

где ζ – ускорение поезда в км/ч² при действии ускоряющей силы в 1 Н/кН;

f_y – удельная ускоряющая сила, Н/кН.

Так как $f_y = f_k - \omega_k - b_T$, то ускорение –

$$a = \zeta(f_k - \omega_k - b_T) \quad (87)$$

Таблица 7 – Значения коэффициентов

Вид подвижного состава	$(1+\gamma)$	$\zeta, \frac{\text{км/ч}^2}{\text{Н/кН}}$
Тепловозы	1,07...1,13	112...118
Грузовые вагоны:		
гружёные	1,03...1,04	122...123
Порожние	1,07...1,08	117...119

Чтобы решить уравнение движения поезда, нужно найти удельные ускоряющие или замедляющие силы, которые определяют из удельных сил тяги, удельных сил сопротивления движению и удельных тормозных сил во всём диапазоне скоростей движения.

Контрольные вопросы:

1. Что называется уравнением движения поезда?
2. Что нужно для решения уравнения движения поезда?

Лекция 18

Аналитический метод решения уравнения.

План лекции

18.1 Аналитический метод решения уравнения движения поезда

18.1 Аналитический метод решения уравнения движения поезда

В результате решения уравнения движения заданной массы определяют скорость движения в любой точке пути и время, необходимое для прохождения любого отрезка пути. Для этого вначале рассчитывают удельные ускоряющие и замедляющие силы при всех возможных скоростях движения.

Аналитический метод решения заключается 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 ($t=0$), км/ч;

v_2 – скорость в конце отрезка времени, км/ч;

a – ускорение движения, км/ч²;

Δt – отрезок времени, в течение которого определяют изменение скорости, ч;

Отсюда отрезок времени –

$$\Delta t = \frac{v_2 - v_1}{a} = \frac{\Delta v}{a}.$$

Если в это выражение подставить значение a из формулы (86) с учётом действия удельной ускоряющей силы в интервале скоростей Δv , то получим Δt , ч:

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{\zeta f_{\text{уср}}} \quad (88)$$

В формуле (87) определяют время, в течении 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 путём ΔS в километрах и средней скоростью движения v_{cp} (км/ч) находят из определения средней скорости $v_{cp} = \Delta s / \Delta t$, откуда

$$\Delta s = v_{cp} \Delta t.$$

Подставив сюда значение Δt из (88) получают:

$$\Delta S = \frac{v_{cp} \Delta v}{\zeta f_{y_{cp}}} \quad (89)$$

Если заменить $v_{cp} = (v_1 + v_2) / 2$, $\Delta v = v_2 - v_1$ и $(v_1 + v_2)(v_2 - v_1) = v_2^2 - v_1^2$, то путь можно вычислить так:

$$\Delta S = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \zeta f_{y_{cp}}} \quad (90)$$

По формулам (88) и (89) рассчитывают путь, проходимый поездом при изменении скорости от v_1 до v_2 под действием удельной ускоряющей (замедляющей) силы $f_{y_{cp}}$. При постоянной удельной ускоряющей силе путь ΔS пропорционален разности квадратов конечной и начальной скоростей.

Формулы (87), (88), (89) позволяют определить время и путь в каждом интервале скоростей. Если необходимо знать значения Δt и ΔS в нескольких интервалах скоростей, то расчёты проводят для каждого интервала, а результаты суммируют.

Аналитический метод требует большого числа расчётов и значительных затрат времени.

Контрольные вопросы:

1. В чём заключается аналитический метод решения уравнения движения поезда?

Лекция 19

Графический метод решения уравнения движения поезда

План лекции

19.1 Диаграммы удельных ускоряющих и замедляющих сил, действующих на поезд

19.2 Построение диаграммы ускоряющих и замедляющих сил

19.1 Диаграммы удельных ускоряющих и замедляющих сил, действующих на поезд

Для графического решения уравнения движения поезда надо иметь графическое представление удельных сил, действующих на поезд.

Графическое представление, показывающее зависимость удельных ускоряющих и замедляющих сил от скорости движения, называют диаграммами удельных ускоряющих и замедляющих сил (рисунок 15).

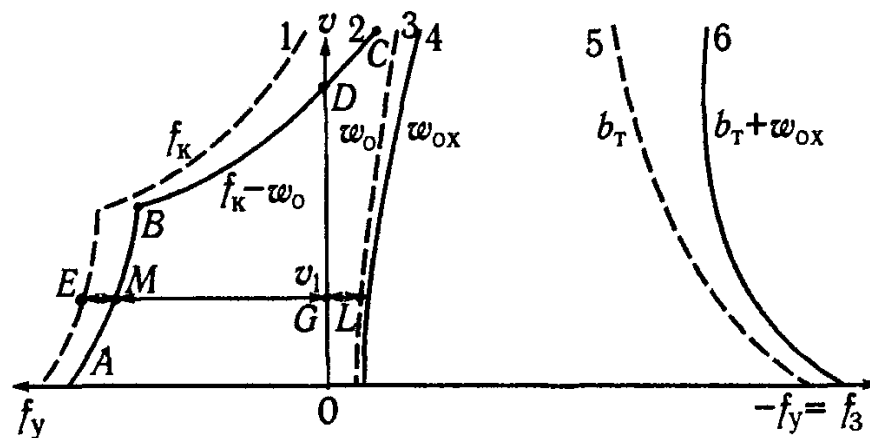


Рисунок 15 – Диаграмма удельных ускоряющих и замедляющих сил

На рисунке 15 кривая 1 – зависимость удельной силы тяги от скорости движения, кривая 3 – удельных сил основного сопротивления движения поезда при работе локомотива под током, кривая 4 – удельных сил основного сопротивления движения при работе локомотива без тока, кривая 5 – удельных тормозных сил. Причём ускоряющие силы отложены по оси абсцисс влево от начала координат, замедляющие – вправо от начала координат, в скорости – по

оси ординат.

19.2 Построение диаграммы ускоряющих и замедляющих сил

Для построения диаграмм удельных сил поезда необходимо решить три уравнения:

В режиме тяги:

$$f_y = f_k - \omega \quad (91)$$

В режиме выбега:

$$f_y = -\omega \quad (92)$$

В режиме торможения:

$$f_y = -(b_T + \omega) \quad (93)$$

На диаграмме должны быть отражены удельные ускоряющие и замедляющие силы в режимах тяги, выбега и торможения при всех возможных скоростях движения на прямом и горизонтальном пути при $i=0$. По формулам (16)-(39), (63), (71) производят расчёты ускоряющих и замедляющих сил для скоростей 0-10, 20, 30 ... 100 км/ч (через 10 км/ч) и скоростей, соответствующих расчётной и пересечению кривой ограничения по сцеплению и характеристикой ОВ2, результаты сводят в таблицу 8 и на основании таблицы строят зависимости

Таблица 8

Режим тяги									Режим выбега		Режим торможения		
v , км/ч	F_k , Н	$\omega'_{0,}$ Н/кН	$\omega''_{04,}$ Н/кН	$\omega''_{08,}$ Н/кН	$\omega''_{0,}$ Н/кН	ω_0 , Н/кН	f_k , Н/кН	$f_y = f_k - \omega_0$, Н/кН	ω_x , Н/кН	ω_{0x} , Н/кН	$\varphi_{кр}$	b_T , Н/кН	$f_{зс} = \omega_{0x} + 0,5b_T$, Н/кН
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0													
...													
90													

Диаграмму строят на миллиметровой бумаге в выбранном масштабе (таблица 9) по точкам тонкими линиями с помощью лекала. При этом скорости откладывают по оси ординат, удельные ускоряющие силы – по оси абсцисс влево от начала координат, удельные замедляющие – по оси абсцисс вправо от

начала координат.

Таблица 9 – Масштабы для построения графиков

Величина	Значения масштаба, мм		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Сила 1 Н/кН	12	6	10
Скорость 1 км/ч	2	1	2
Путь 1 км	40	20	48
Постоянная Δ	30	30	25
Время 1 ч	600	600	600
Время 1 мин	10	10	10

Контрольные вопросы:

1. Что называется диаграммой удельных ускоряющих и замедляющих сил?
2. Что необходимо для построения диаграммы удельных ускоряющих и замедляющих сил?

Лекция 20

Практические приёмы построения кривой скорости в функции пути

План лекции

20.1 Скорость и время движения поезда

20.2 Основные принципы определения скорости движения

20.3 Практические приёмы построения кривых скорости

20.1 Скорость и время движения поезда

В соответствии с ПТР при выполнении тяговых расчетов поезд рассматривается как материальная точка, в которой сосредоточена вся масса поезда и к которой приложены внешние силы, действующие на реальный объект (поезд). Условно принимают, что эта материальная точка расположена в середине поезда.

Скорость поезда в разном направлении движения будет отличной. При этом должно соблюдаться условие, что скорость поезда по входным стрелкам станции, на которой предусмотрена остановка, в соответствии с ПТЭ не должна превышать 50 км/ч вследствие возможного приема на боковой путь для скрещения или обгона.

Скорость зависит от включения и выключения электродвигателей локомотива, от включения и отпуска тормозов.

Максимально допустимая скорость движения поезда не должна превышать наибольшую допустимую скорость по тормозным средствам или конструкционную. Если же она превышает, то нужно применить служебное регулировочное торможение.

При движении поезда выполняется проверка тормозов в пути следования, которая согласно Инструкции по эксплуатации тормозов выполняется при достижении поездом скорости 40-60 км/ч на площадке или спуске, снижение скорости при этом для грузовых поездов допускается на 15-20 км/ч.

Когда локомотив, например, входит на входные стрелки, центр массы

поезда находится от них на расстоянии, равном половине длины поезда ($l_{\text{п}}/2$).

20.2 Основные принципы определения скорости движения

Кривой скорости принято называть графическую зависимость $v(S)$ скорости движения поезда от пройденного пути. Расчёт кривой скорости можно выполнять аналитическими и графическими методами.

20.3 Практические приёмы построения кривых скорости

Для построения кривой скорости необходимо наличие спрямлённого профиля пути и диаграммы удельных ускоряющих и замедляющих сил, построенных на различных миллиметровках в выбранном масштабе.

По мере построения диаграмму прикладывают слева, спрямлённый профиль справа, соблюдая параллельность вертикальных осей и совпадение горизонтальных осей.

Построение кривой скорости происходит следующим образом:

1. На каждом элементе профиля пути определить и построить равновесную скорость в виде горизонтальных площадок.

Равновесную скорость определяют по диаграмме удельных ускоряющих и замедляющих сил, восстанавливая вертикальную линию из точки на оси абсцисс, соответствующей величине уклона в ‰: для подъёма влево, а для спусков вправо от начала координат (рисунок 16).

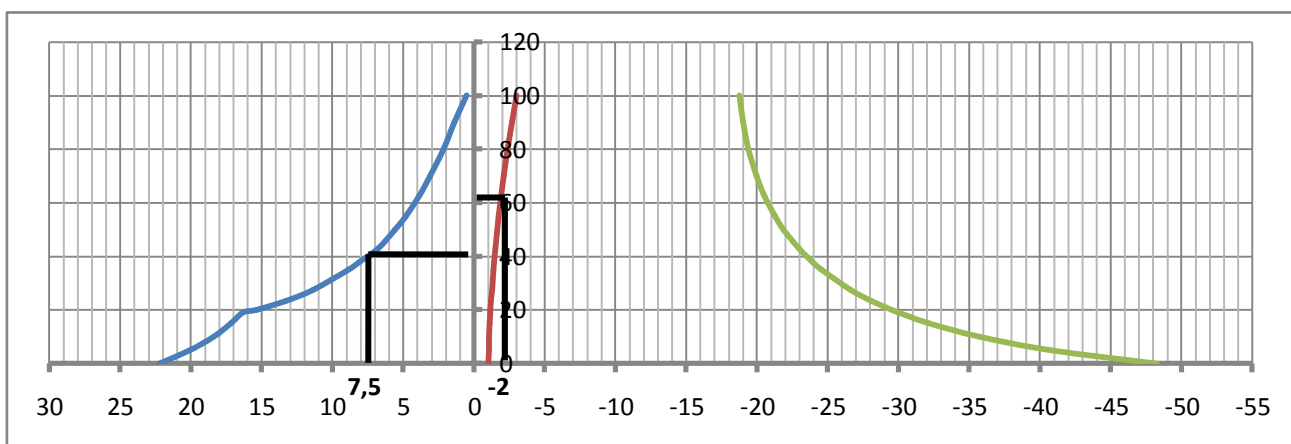


Рисунок 16 – Выбор равновесной скорости

При подъёме 7,5‰ равновесная скорость равна 40 км/ч; при спуске -2‰ равновесная скорость равна 60 км/ч. На подъёмах круче расчётного, значения равновесной скорости принимают равными расчётной скорости.

2. Определить режим движения поезда на элементе профиля пути:

режим тяги – при трогании с места на станции отправления, на подъёмах, на прямом горизонтальном элементе пути;

режим холостого хода (выбега) – на спусках, на подъёмах при достижении равновесной скорости;

режим торможения – на затяжных спусках, на элементе пути при проследовании на станцию с остановкой.

При выборе режима движения поезда руководствуются требованием обеспечения движения с максимально возможной скоростью.

3. Построить кривую скорости:

3.1 Режим тяги при трогании с места (движении по горизонтальному пути):

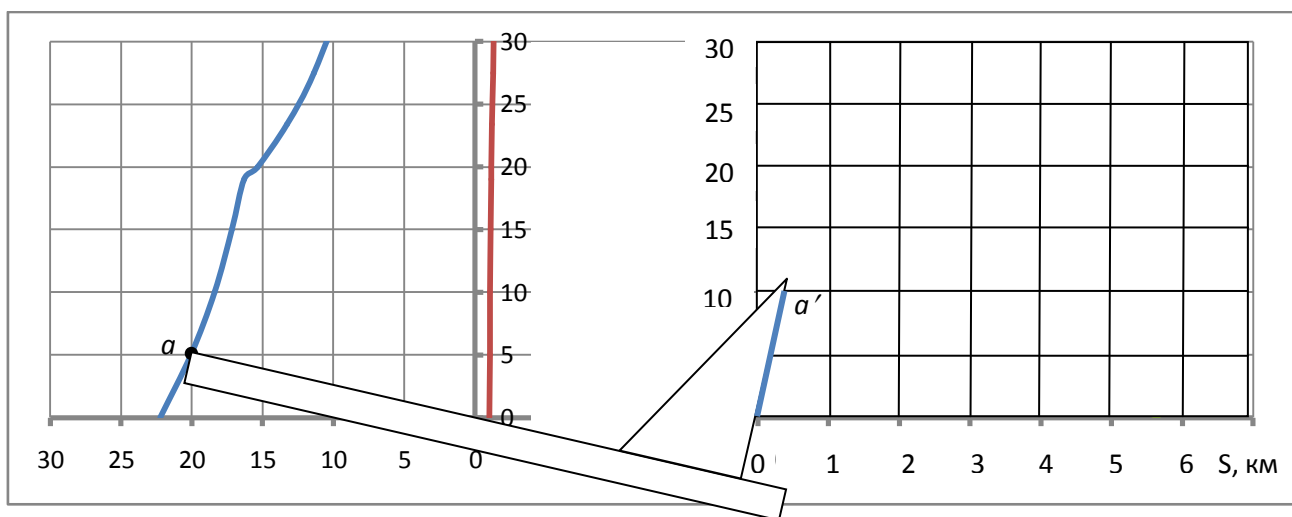


Рисунок 17 – Построение кривой скорости в функции пути при движении по горизонтальному прямолинейному пути при средней скорости $v=5$ км/ч

Рассматриваем интервал скоростей от 0 до 10 км/ч. Берём среднюю скорость 5 км/ч, отмечаем на диаграмме удельную ускоряющую силу при $v=5$ км/ч (точка a). Линейку прикладываем к точке a и к началу координат. К

линейке прикладывают угольник одной из его сторон прямого угла (рисунок 17). Угольник смещаем по линейке до оси при $v=0$ и через эту точку проводим отрезок $0a'$ в интервале скоростей от 0 до 10 км/ч.

Далее в интервале от 10 до 20 км/ч берут точку b при 15 км/ч, к ней и к началу координат приставляют линейку, а к линейке угольник (рисунок 18). Из точки a' проводят линию в интервале от 10 до 20 км/ч и т.д.

В дальнейшем интервал скоростей берут не более 5 км/ч.

3.2 Режим тяги при движении поезда на подъёме или на спуске:

Для построения кривой скорости на подъёме 5 ‰ или спуске -5‰ линейку нужно прикладывать не к началу координат, а к точке смещённой влево на 5 или вправо на -5 соответственно (рисунок 19).

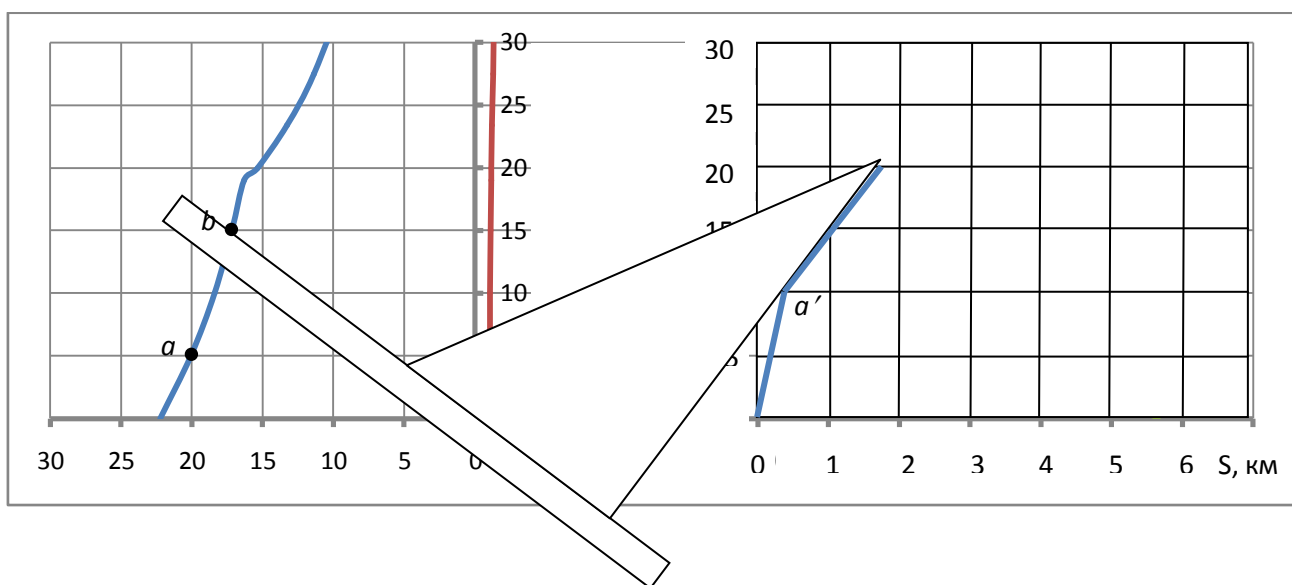


Рисунок 18 – Построение кривой скорости в функции пути при движении по горизонтальному прямолинейному пути при средней скорости $v=15$ км/ч

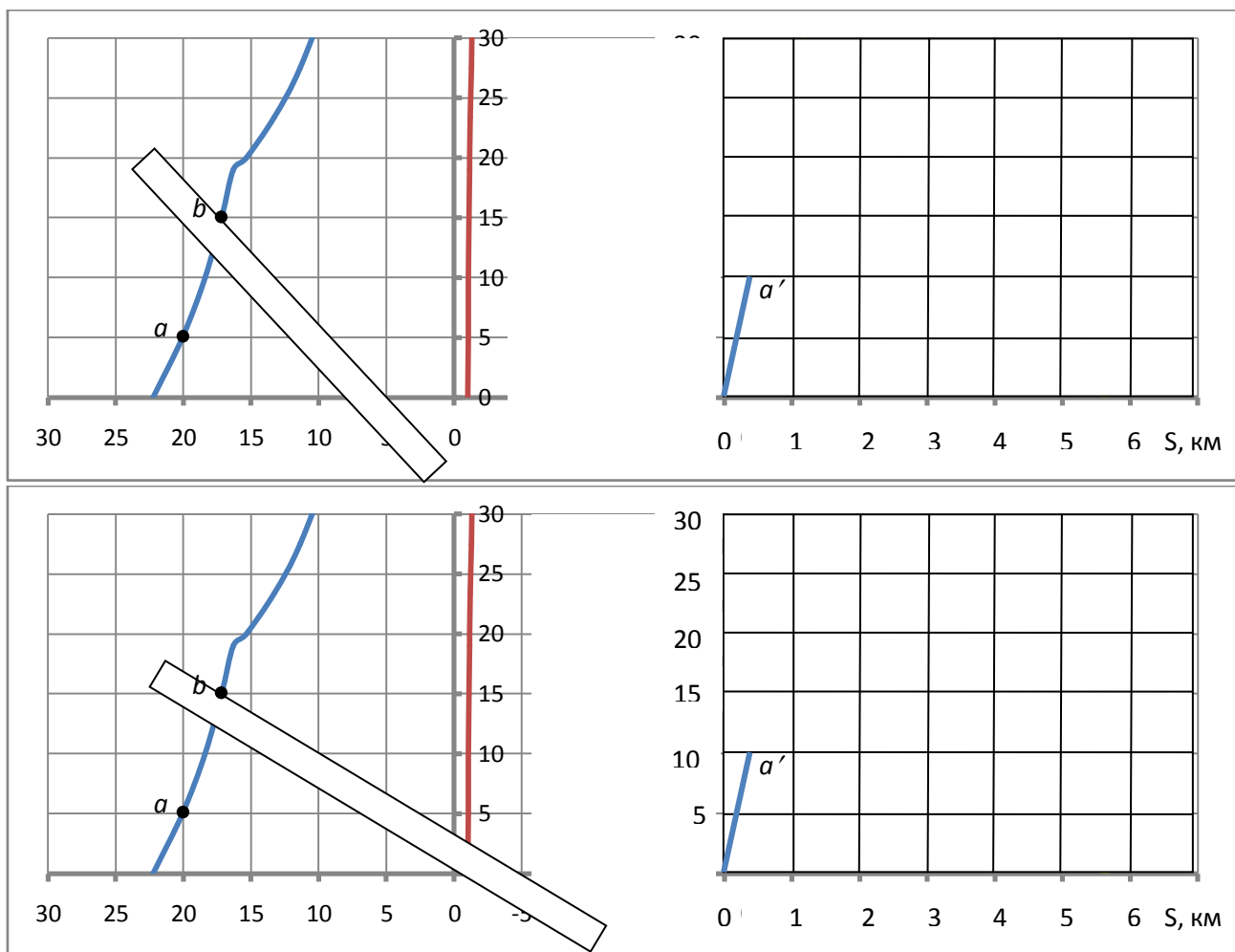


Рисунок 19 – Построение кривой скорости в функции пути при движении на подъёме или на спуске

3.3 В режимах холостого хода и торможения построение кривой скорости производится аналогично.

При построении кривой скорости необходимо руководствоваться следующим:

- Скорость всегда стремится к равновесной;
- В пределах элемента профиля пути скорость изменяется до тех пор, пока не достигнет равновесной, по достижении равновесного значения скорость остаётся постоянной до конца элемента профиля или до изменения режима движения.
- При достижении предельно допустимой скорости на подъёме, необходимо перейти на режим холостого хода.

- На затяжных спусках длиной более 10 км или крутизной более 18‰ кривую скорости строят, пользуясь диаграммой замедляющих сил, поочерёдно режимы торможения и выбега.
- При построении кривой скорости следует предусматривать проверку действия тормозов. При этом снижение скорости составляет 20 км/ч для грузовых и 10 км/ч для пассажирских поездов.
- При остановке поезда следует учитывать ограничение скорости движения.

Контрольные вопросы:

1. Чем ограничивается максимально допустимая скорость движения поезда?
2. Что принято называть кривой скорости?
3. Что необходимо иметь для построения кривой скорости?
4. Чем необходимо руководствоваться при построении кривой скорости?

Лекция 21

Практические приёмы построения кривой времени в функции пути

План лекции

21.1 Практические приёмы построения кривой времени в функции пути

21.1 Практические приёмы построения кривой времени в функции пути

Кривой времени называют графическую зависимость $t(S)$ времени движения поезда от пройденного пути.

Результаты построения кривой времени в дальнейшем используют для составления графика движения поездов, расчёта нагрева тяговых электрических машин и расхода энергоресурсов на поездку.

После построения кривой времени определяется время хода по перегонам.

Последовательность построения кривой времени:

1. Кривая времени строится на основании кривой скорости $v(S)$ на том же графике и в том же масштабе, где построен график скорости.

2. Через точки перелома кривой скорости A, B, C и т.д. проводим перпендикуляры к оси пути S .

3. Влево от оси скорости v на расстояние Δ в соответствие с выбранным масштабом (приложение 3) проводим вертикальную ось времени t .

4. В пределах каждого отрезка скорости OA, AB, BC и т.д. определяем среднее значение скорости и проектируем её на ось времени t , получаем точки a', b', c' и т.д.

5. Соединяем линейкой точку a' с точкой O , восстанавливаем перпендикуляр из точки O на оси пути S до пересечения с отрезком $a'O$ и обозначаем конец этого отрезка точкой A' . Отрезок OA' является первой частью кривой времени $t(S)$. Ордината точки A' показывает время, необходимое для прохождения поездом отрезка пути ΔS_1 или интервала скорости OA .

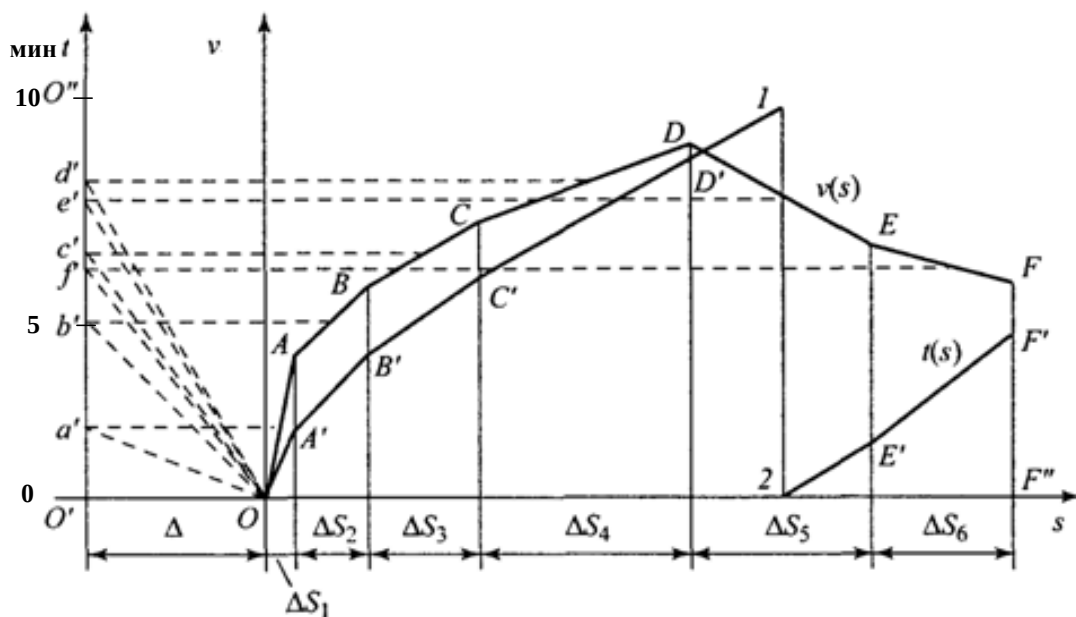


Рисунок 20 – Построение кривой времени в функции пути

6. Соединяем линейкой точку b' с точкой O , восстанавливаем перпендикуляр из точки A' до пересечения с отрезком b' и обозначаем конец этого отрезка точкой B' . Отрезок $A'B'$ является следующей частью кривой времени $t(S)$

7. Аналогичные построения проводим для следующих отрезков. Для того чтобы кривая времени уместилась при достижении ординаты, равной 10 мин. (точка 1), кривую времени следует оборвать, точку обрыва внести по вертикали вниз на ось абсцисс (точка 2) и продолжать построение кривой времени снова с нуля.

Контрольные вопросы:

1. Что называется кривой времени?
2. Для чего используют результаты построения кривой времени?

Лекция 22

Расход электрической энергии

План лекции

22.1 Расход электрической энергии

22.1 Расход электрической энергии

Локомотивы совершают механическую работу при передвижении поезда. Электроподвижной состав для этого использует электрическую энергию, получаемую от систем электроснабжения электрифицированной дороги.

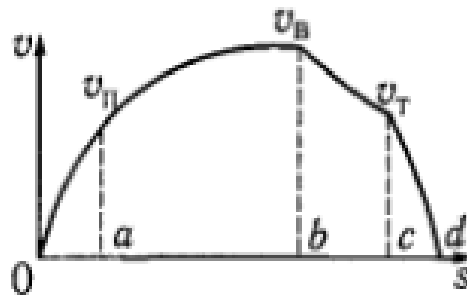


Рисунок 21 – Кривая движения поезда $v(s)$

На рисунке 21 показана простейшая кривая $v(s)$ при следовании поезда по прямолинейному горизонтальному пути перегона. Часть пути Ob поезд проходит в режиме тяги с потреблением электроэнергии, остальной путь в режиме выбега и торможения. На отрезке $0a$ идёт 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 электроэнергии на участках переменного тока теряется в тяговых электродвигателях, передаче и преобразовательной установке.

На отрезке ab механическая работа идёт 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 счёт запаса кинетической энергии, которая постоянно снижается. Если бы в точке c не были включены тормоза, то движение на выбеге продолжалось бы без затрат энергии за пределами отрезка cd .

После включения механических тормозов в точке c большая часть кинетической энергии теряется в тормозах, превращаясь в тепловую энергию, нагревающую тормозные колодки, колёса и окружающий воздух и только небольшая её часть используется для преодоления сил сопротивления движению на отрезке cd .

Контрольные вопросы:

1. От чего зависит величина расхода электроэнергии?

Лекция 23

Токовые характеристики электроподвижного состава

План лекции

23.1 Токовые характеристики электроподвижного состава переменного тока

23.1 Токовые характеристики электроподвижного состава переменного тока

Токовыми характеристиками называют зависимость тока тягового электродвигателя или тока, потребляемого электроподвижным составом от скорости движения.

Токовые характеристики используют для нахождения токов при движении поезда с различными скоростями, чтобы оценить использование мощности тяговых электродвигателей и генераторов, и для определения расхода энергии на тягу поезда и расчёта элементов системы электроснабжения.

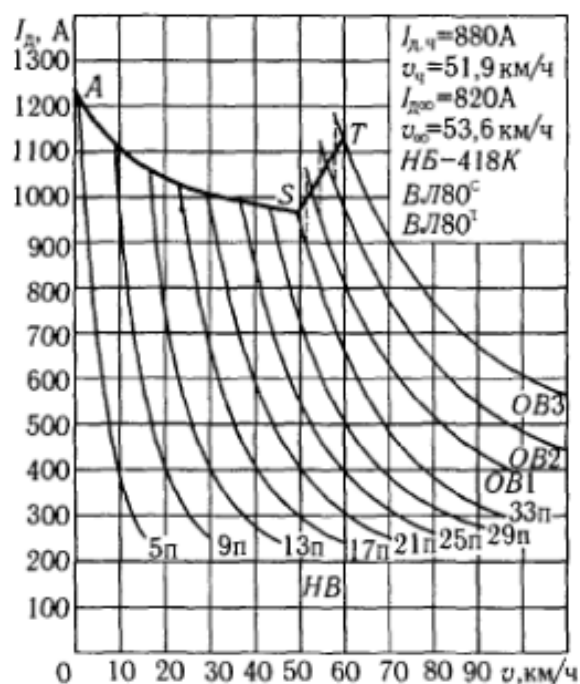


Рисунок 22 – Токовые характеристики $I_d(v)$ тягового электродвигателя НБ-418К электровазов ВЛ80^С

Токовые характеристики $I_d(v)$ тягового электродвигателя электроподвижного состава переменного тока (рисунок 22) строятся с учётом внешних характеристик преобразовательной установки для всех ходовых позиций и всех ступеней ослабления возбуждения. На эти характеристики наносят ограничивающие линии по сцеплению колёс с рельсами или по коммутации тяговых электродвигателей, из которых берут значения пусковых токов. Штриховыми линиями изображают переходы на позиции ослабленного возбуждения и средние токи при этих переходах.

В системе переменного тока расход электрической энергии определяют не по току, потребляемому электроподвижным составом, а по его активной составляющей. Следовательно, необходимо знать полный ток $I_d(v)$ – токовая характеристика, показывающая зависимость действующего значения тока, протекающего по первичным обмоткам трансформатора от скорости (рисунок 23); $I_{da}(v)$ – активная составляющая полного тока, потребляемого электроподвижным составом, от скорости (рисунок 24).

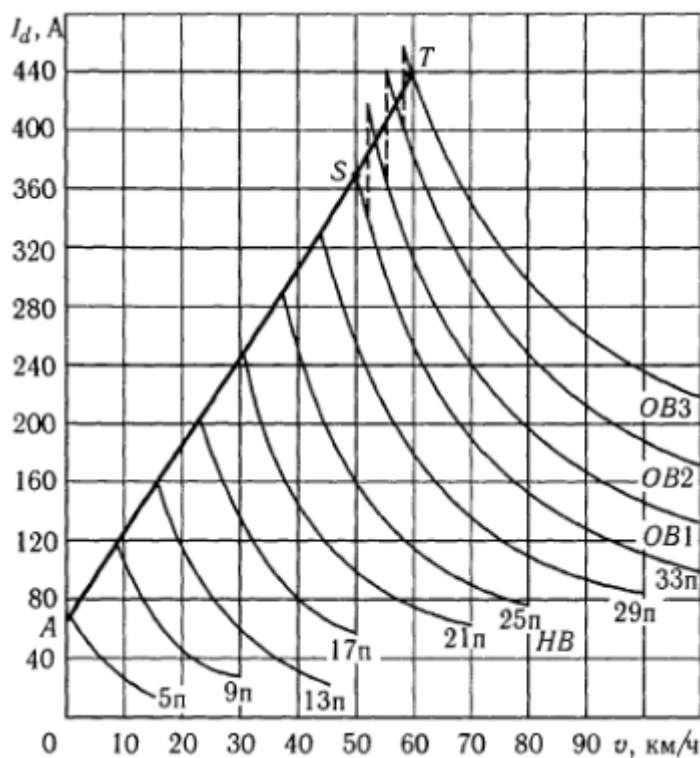


Рисунок 23 – Токовые характеристики $I_d(v)$ электровозов ВЛ80^С

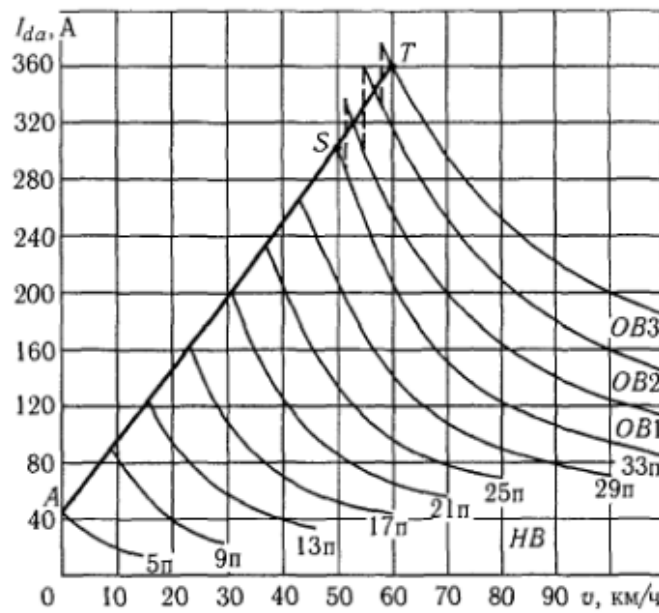


Рисунок 24 – Токовые характеристики $I_{da}(u)$ электровозов ВЛ80^С

Контрольные вопросы:

1. Что называют токовыми характеристиками электроподвижного состава?

Лекция 24

Построение кривых тока электроподвижного состава

План лекции

24.1 Построение кривой тока

24.1 Построение кривой тока

Для электроподвижного состава переменного тока строят кривые $I_d(S)$, $I_d(S)$ и $I_{da}(S)$ по кривой скорости $v(S)$, используя токовые характеристики $I_d(v)$, $I_d(v)$ и $I_{da}(v)$.

Последовательность построения кривой тока $I_d(S)$:

1. Кривая тока строится на основании кривой скорости $v(S)$ на том же графике и в том же варианте масштаба, добавив ось t .

2. На ранее построенной кривой времени $v(S)$ с пометками о режиме работы тяговых электродвигателей берут точки перелома О, А, В и т.д. и для каждой из них по кривой $I_d(v)$ определяют ток при данном режиме. Нанесённые на график точки соединяют прямыми линиями, показывающие изменение тока в зависимости от пути S . При изменении режима работы тяговых электродвигателей (переход с ПВ на ОВ1, с ОВ1 на ОВ2 и наоборот) появляются броски тока (рисунок 25).

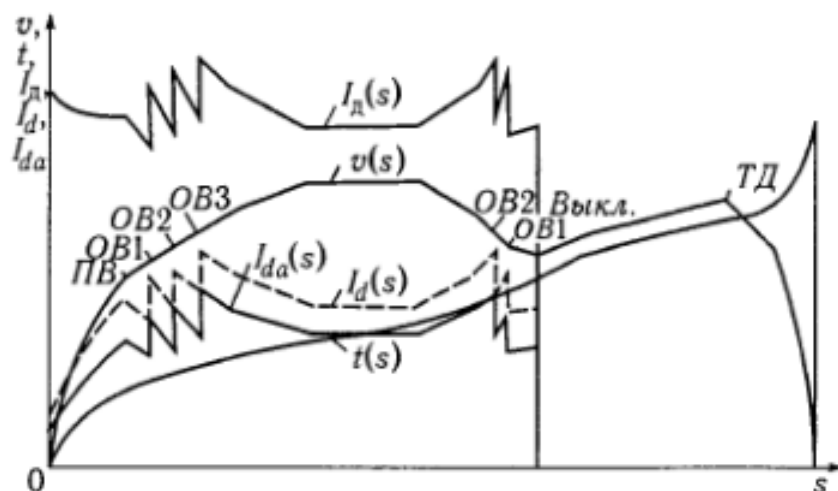


Рисунок 25 – Построение кривой тока генератора тепловоза

Порядок построения токовых характеристик $I_d(S)$ и $I_{da}(S)$ аналогичен построению $I_d(S)$.

Контрольные вопросы:

1. Как происходит построение кривых тока электроподвижного состава переменного тока?

Лекция 25

Факторы, влияющие на расход электрической энергии

План лекции

25.1 Факторы, влияющие на расход электрической энергии

25.1 Факторы, влияющие на расход электрической энергии

Полный расход электрической энергии, потребляемый подвижным составом, состоит из энергии, расходуемой на движение поезда, собственные нужды локомотива, отопление пассажирских и почтово-багажных вагонов, на маневровые передвижения по деповским и станционным путям.

Движение поезда сопровождается действием сил, направленных против его движения. Действие этих сил заменяется эквивалентной силой — силой сопротивления движению поезда, которую подразделяют на основное и дополнительное сопротивление движению поезда и которая определяется не только характеристиками локомотива и вагонов, но и состоянием пути и метеорологическими условиями.

Силы основного сопротивления движению обусловлены трением в подшипниках подвижного состава, взаимодействием колесных пар с рельсами и сопротивлением от воздействия воздушной среды при отсутствии ветра. Силы дополнительного сопротивления движению возникают от уклонов и кривизны пути, при трогании с места, от подвагонного генератора, при низких температурах наружного воздуха и действии встречного и бокового ветра.

Температура наружного воздуха определяет степень вязкости смазки. С понижением температуры возрастает воздушное сопротивление, а зимой возникают силы дополнительного сопротивления: это сопротивление гребней бандажей колесных пар при движении по снежному покрову, сопротивление самого снежного покрова, лежащего на рельсах, и т. д.

Ветер может оказывать прямое тормозящее сопротивление или попутное воздействие. При встречном ветре возрастают силы сопротивления движению

воздушной среды, в то время как попутный ветер уменьшает эти силы. Большое влияние оказывает боковой ветер, так как под его воздействием подвижной состав смещается в сторону и возникает трение гребней колесных пар о боковую поверхность рельса.

На сопротивление движению оказывает влияние участок пути, по которому проходит подвижной состав и который характеризуется своим профилем и планом. Существуют равнинные участки, участки, имеющие холмистый профиль, гористые участки. При движении поезда по уклонам и кривым расход электрической энергии будет зависеть от их крутизны и протяженности, длины и радиуса кривой. С увеличением крутизны подъема возрастает и расход энергии. Также он возрастает на кривой участка при уменьшении радиуса кривой.

Конструкция и состояние верхнего строения пути также влияют на сопротивление движению поезда. Большое влияние на расход электрической энергии оказывает неудовлетворительное состояние пути, повышенный износ которого приводит к ухудшению движения подвижного состава, а, следовательно, к увеличению расхода энергоресурсов.

Электрическая энергия, расходуемая подвижным составом, идет на запас кинетической и потенциальной энергии, которые в последующем используются для движения поезда без энергетических затрат. Запасенная потенциальная энергия может быть использована для совершения механической работы при дальнейшем движении поезда по спуску. Кинетическая энергия расходуется на преодоление сил сопротивления движению в том случае, когда поезд движется замедленно. При торможении большая часть ее теряется в тормозах, превращаясь в тепловую энергию, нагревающую тормозные колодки, колеса и окружающий воздух. Некоторая часть кинетической энергии движущегося поезда теряется в связи с ударами колес о концы рельсов при набегании на них в стыках и расходуется на упругие колебания верхнего строения пути, вызванные взаимодействием движущегося поезда с рельсами, шпалами и балластом.

Значительное влияние на расход энергии оказывает тип и техническое состояние локомотива. Локомотивы подразделяют по типам энергетических установок, по виду выполняемой работы, по назначению. Тип локомотива характеризуется такими параметрами, как номинальная мощность, сила тяги, коэффициент полезного действия, сцепная масса, часовой расход энергии и др.

Важной характеристикой подвижного состава является его масса и степень использования грузоподъемности вагонов. Перевозка грузов в неполновесных составах или в не полностью загруженных вагонах приводит к увеличению удельного сопротивления движению, а значит и к перерасходу энергоресурсов на тягу поездов. С увеличением массы состава и загрузки вагонов уменьшается расход энергии на единицу выполненной работы.

Влияет на общий расход энергии и характер груза. Сыпучие и жидкие грузы раскачивают вагон во время движения, создавая тем самым дополнительное сопротивление.

Для снижения расхода электрической энергии большое значение имеет исправное техническое состояние локомотива и вагонов. Износ деталей приводят к ухудшению динамики, плавности движения поезда и повышенному расходу электроэнергии.

На расход энергии влияет род тока и напряжение в контактной сети. Недостатком системы электроснабжения постоянного тока является то, что такой ток очень трудно трансформировать, т. е. повышать или понижать напряжение без значительных потерь. Чем выше мощность электровоза, тем больше потери. Значительные потери электроэнергии создаются большими величинами потребляемых токов. На переменном токе также существуют недостатки: чем больше объемы движения на участке, тем больше убытки от использования переменного тока в части размера затрат электроэнергии на перемещение единицы груза.

Кроме того, в контактной сети имеют место определенные потери части электрической энергии, затрачиваемой на преодоление сопротивления цепей электроснабжения. При анализе электропотребления следует учитывать

сечение контактных проводов, форму и тип контактной подвески, критическую скорость, балльную оценку состояния контактной сети и коэффициент трения скольжения токоприемника по контактному проводу.

Расход электрической энергии на собственные нужды локомотива складывается из энергии, необходимой для работы вспомогательных машин, питания цепей управления, освещения электроподвижного состава.

Необходимо также учитывать расход электрической энергии на отопление пассажирских и почтово-багажных вагонов и кондиционирование воздуха в вагонах повышенной комфортности.

На расход энергии за поездку также влияют все факторы, связанные с отклонением скорости от расчетной при движении состава по пути следования. Непредусмотренные графиком движения торможения и разгоны, простой на остановках приводят к потерям электрической энергии.

При использовании локомотивной бригадой рациональных режимов управления электровозом можно добиться значительного снижения энергопотребления.

Объективная, технически обоснованная норма позволяет планировать расход электрической энергии, улучшить организацию эксплуатации, побудить работников железнодорожного транспорта за счет определенных стимулов снизить расход электроэнергии.

Расход электрической энергии зависит от множества факторов различной природы, каждый из которых влияет на расход энергии по-разному. Все эти факторы необходимо учитывать при анализе и нормировании энергопотребления на тягу поездов.

Контрольные вопросы:

1. От чего зависит расход электрической энергии?

Лекция 26

Методы определения расхода электроэнергии. Полный и удельный расход электрической энергии

План лекции

26.1 Методы определения расхода электроэнергии

26.2 Расчёт полного и удельного расхода электрической энергии

26.1 Методы определения расхода электроэнергии

Расход электроэнергии на тягу поезда можно установить несколькими способами.

Наиболее точно его определяют по кривым тока и времени в функции пути графоаналитическим методом.

Графический метод позволяет определить расход электроэнергии без построения кривой тока в зависимости от пути, используя только кривую скорости $v(S)$ и токовую характеристику $I_{da}(v)$.

Аналитический метод позволяет определить энергию, расходуемую на преодоление сил сопротивления движению, потери энергии в тормозах, потери в ТЭД и преобразователю, потери энергии при пуске.

26.2 Расчёт полного и удельного расхода электрической энергии

Для электроподвижного состава переменного тока расход электрической энергии на тягу поезда определяют по активной составляющей полного тока I_{da} , которые берут из кривых $I_{da}(s)$. С учётом фактического напряжения на токоприёмнике U_c расход энергии A_T , кВт·ч:

$$A_T = \frac{\sum (U_c k_U I_{da} \Delta t)}{60 \cdot 1000}, \quad (94)$$

где I_{dacr} – активная составляющая тока, средняя за время Δt ;

U_c – среднее напряжение на токоприёмнике за время Δt ;

k_U – коэффициент формы кривой напряжения при данном U_c ,

($U_{cкU}=25000В$).

Средний ток $I_{даср}$ при изменении его от одной точки до соседней определяют как среднее арифметическое между начальным $I_{да н}$ и конечным $I_{да к}$ значениями. Из кривой $t(s)$ берут время, в течение которого электровоз потребляет ток $I_{даср}$.

Расход электрической энергии на собственные нужды $A_{сн}$, кВт·ч рассчитывается по формуле:

$$A_{сн} = U_{вм} \cdot t, \quad (95)$$

где $U_{вм}$ – потребляемая вспомогательными электрическими машинами энергия за 1 мин, кВт·ч/мин;

t – время хода поезда, мин.

Полный расход электрической энергии электровозом с учётом собственных нужд A , кВт·ч:

$$A = A_{т} + A_{сн}. \quad (96)$$

Удельным расходом электроэнергии на движение поезда называют расход электроэнергии, отнесённый к единице перевозочной работы – к 1 т массы состава и пройденному пути в 1 км, определяют по формуле, Вт·ч/(т·км):

$$a_{т} = \frac{1000 A_{т}}{m_{с} L}, \quad (97)$$

где $m_{с}$ – масса состава, т;

L – длина участка, км.

С учётом собственных нужд удельный расход электрической энергии, Вт·ч/(т·км):

$$a_{т} = \frac{1000}{m_{с} L} (A_{т} + A_{сн}). \quad (98)$$

Контрольные вопросы:

1. Какие методы используют для расчёта расхода электроэнергии?
2. Что называется полным и удельным расходом электроэнергии?

Лекция 27

Нагревание ТЭД. Методы расчёта нагревания электрических машин

План лекции

27.1 Нагревание тяговых электродвигателей и генераторов

27.2. Аналитический метод расчёта нагревания тяговых электродвигателей

27.1 Нагревание тяговых электродвигателей и генераторов

Наибольшую силу тяги при расчёте поезда принимают с учётом ограничения по коммутации тяговых электродвигателей или по сцеплению колёс с рельсами.

Однако, кроме этих ограничений, на электроподвижном составе учитывают ещё и ограничение по использованию мощности и нагреванию электродвигателей.

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 её 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 её 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 – В, 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 таблице 10 приведены предельно допустимые превышения температуры обмоток тяговых электрических машин, а также их коллекторов $t_{\text{доп}}$ над температурой наружного воздуха $t_{\text{нв}}$, равной не более 40°C для различных классов изоляции.

Таблица 10 – Предельно допустимые превышения температур обмоток тяговых электрических машин над температурой окружающего воздуха

Класс изоляции	Компоненты изоляции	Обмотки вращающихся частей	Обмотки неподвижных частей	Коллектора
В	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

Расчетная температура наружного воздуха $t_{\text{нв}}$ определяется по данным метеорологических станций как средняя многолетняя (не менее чем за 5 лет).

В том случае, когда температура оказывается летом менее $+15^{\circ}\text{C}$, а зимой ниже нуля, за расчетную температуру берется соответственно $+15^{\circ}\text{C}$ и нуль.

Для тяговых электродвигателей ГОСТ 2582-81 устанавливает

продолжительный и часовой режимы работы. Продолжительный режим определяется наибольшим током, при котором работа в течение неограниченного времени при номинальном напряжении не вызывает превышения предельно допустимых температур. Часовой режим определяется наибольшим током, при котором работа электродвигателя от холодного состояния в течение 1 ч при номинальном напряжении не вызывает предельно допустимых температур.

Для тяговых генераторов устанавливаются продолжительные режимы при наименьшем и наибольшем напряжении.

Нагревание тяговых электродвигателей электровозов проверяют в летних и зимних условиях.

Если расчетное превышение температуры окажется выше допустимого, необходимо принять следующие меры к снижению температуры:

- изменить режим ведения поезда;
- ввести остановку на промежуточной станции для охлаждения тяговых электрических машин;
- уменьшить массу состава.

27.2 Аналитический метод расчёта нагревания тяговых электродвигателей

Проверка на нагревание выполняется на основании кривых тока $I_d(S)$ и кривой времени $t(v)$. Проверка производится по формуле:

$$\tau = \tau_{\infty} \frac{\Delta t}{T} + \tau_0 \left(1 - \frac{\Delta t}{T} \right), \quad (99)$$

где τ – температура нагрева (остывания) обмоток, °C;

τ_0 – начальное превышение температуры для расчетного промежутка времени, °C;

τ_{∞} – установившаяся температура, °C;

Δt – интервал времени, в течение которого по обмоткам протекает неизменный средний ток, при условии что $\Delta t / T \leq 0,1$ мин;

T – тепловая постоянная времени, мин.

T и τ_{∞} определяются в зависимости от тока тягового электродвигателя по тепловым характеристикам.

Превышение температуры тягового электродвигателя над температурой наружного воздуха при аналитическом методе рассчитывают по следующим образом. Необходимые токи I_d определяют при работе тепловоза из графика $I_d(S)$. Для каждого расчёта 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 $I_{d\text{ ср}}$ или $I_{г\text{ ср}}$, которые определяют по формуле:

средний ток электродвигателя –

$$I_{d\text{ ср}} = (I_{d1} + I_{d2})/2 \quad (100)$$

или средний ток генератора –

$$I_{г\text{ ср}} = (I_{г1} + I_{г2})/2 \quad (101)$$

Затем по тепловым характеристикам или кривым $\tau_{\infty}(I_d)$ находят значения тепловых параметров τ_{∞} и T , а по кривым $t(S)$ определяют время, в течение которого проходил ток $I_{d\text{ ср}}$ или $I_{г\text{ ср}}$. Подставляя указанные величины в формулу (98) 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_0 принимают превышение температуры τ в конце первого отрезка. Расчёт превышений температур тягового электродвигателя или генератора на последующих участках выполняют таким же образом.

Из полученных превышений температур тягового электродвигателя или генератора выбирают наибольшую и затем приводят её к расчётной температуре наружного воздуха по формуле:

$$\tau_p = \tau k_{сз} k_{нв}, \quad (102)$$

где $k_{сз}$ – коэффициент сезона, принимаемый летом равным 1,0, а зимой – 1,1;

$k_{нв}$ – коэффициент наружного воздуха, принимаемый из таблицы 11.

Таблица 11 – Значения коэффициента наружного воздуха

Обмотки ТЭД	Расчётная температура наружного воздуха $t_{\text{нв}}$, °C							
	0	5	10	15	20	25	30	35
полюсов	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	1	1,02	1,04
якоря	0,94	0,95	0,96	0,98	0,99	1	1,01	1,02

Расчётную температуру наружного воздуха $t_{\text{нв}}$ определяют по данным метеорологической станции как среднюю многолетнюю (не менее 5 лет) по замерам в 7, 13 и 19 ч по местному времени:

$$t_{\text{нв}} = \frac{t_7 + 2t_{13} + t_{19}}{4}, \quad (103)$$

где t_7 , t_{13} , t_{19} – средняя температура наружного воздуха 7, 13 и 19 ч.

Когда расчётное превышение температуры окажется выше допустимого, необходимо принять меры к снижению температуры. Такими мерами являются:
обслуживание участка более мощным локомотивом;
подталкивание поезда на лимитирующем перегоне или участке.

Контрольные вопросы:

1. От чего зависит нагревание электрических машин?
2. Что применяется для уменьшения нагрева тяговых электрических машин?
3. Какая степень нагрева влияет на изоляцию электрической машины?
4. Что нужно предпринять, если расчётное превышение температуры нагрева электрических машин окажется выше допустимого?
5. Как аналитически производится расчёт нагрева ТЭД?

Лекция 28

Способы экономии электрической энергии

План лекции

28.1. Способы уменьшения расхода электрической энергии

28.1. Способы уменьшения расхода электрической энергии

Железнодорожный транспорт – крупный потребитель электрической энергии, поэтому её экономному расходованию уделяется большое внимание.

Чтобы уменьшить расход электроэнергии необходимо снизить основное сопротивление движению. Расход электроэнергии при увеличении скорости движения возрастает в большей степени, чем скорость. Поэтому при одной и той же скорости движения расход электроэнергии меньше в том случае, когда фактическая скорость близка к средней.

Большое значение для снижения расхода электроэнергии имеет техническое содержание подвижного состава. Повышенные износы в ходовых частях приводят к ухудшению плавности движения локомотива, появлению повышенных колебаний их частей и более высокому расходу электроэнергии.

Чтобы уменьшить время хода по перегону, необходимо при движении по спуску развивать наибольшую допустимую скорость для последующего прохода подъёма за счёт накопленной кинетической энергии. Правильное использование кинетической энергии поезда позволяет значительно снизить расход электроэнергии.

Перевозка грузов в неполновесных составах или в не полностью загруженных вагонах увеличивает удельное сопротивление движению, а следовательно, перерасход электроэнергии на тягу поездов. С увеличением массы поезда и загрузки вагонов снижается расход электроэнергии на единицу перевезённого груза. Однако масса состава не должна превышать критической нормы, так как при этом увеличивается боксование колёсных пар локомотива или будут перегреваться обмотки тяговых электрических машин.

Расход электроэнергии при движении поезда по уклонам и кривым зависит от их крутизны и протяжённости, радиуса и длины кривой, режима ведения и степени использования рекуперативного торможения на вредных спусках. Расход электроэнергии возрастает с увеличением крутизны подъёма и времен движения поезда по нему, а на кривых участках пути увеличивается с уменьшением радиуса кривой. Следовательно, на участках, имеющих большое число кривых малого радиуса, электроэнергия при прочих равных условиях будет израсходовано больше.

Часть запасённой кинетической и потенциальной энергии поезда теряется в тормозах при торможении. Её 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 протяжённости. Для уменьшения расхода электроэнергии 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. Одна такая остановка при интенсивном движении поездов выбивает из графика до 10..15 поездов. при этом перерасходуется до 2.5 тыс. кВт·ч электроэнергии. Поэтому чёткая 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 счёт использования возможно больших сил тяги и ускорений. Повышение ускорения при сохранении одинакового перегонного времени даёт возможность дольше следовать на выбеге и начать торможение при меньшей скорости движения. Для снижения расхода электроэнергии необходимо, что локомотив работал в зоне высоких значений КПД.

В некоторой степени электроэнергию можно сэкономить за счёт снижения её расхода на собственные нужды локомотивов и на работу

вспомогательных механизмов и машин. Например, уменьшение утечек воздуха на локомотиве и особенно в составе приведёт к меньшему времени работы компрессора, а, следовательно, к снижению затрат энергии.

Контрольные вопросы:

1. Какие факторы влияют на расход электроэнергии?

Список использованных источников

- 1 **Брагин, А.Г.** Конструкция электровозов и электропоездов / А.Г. Брагин, Ю.Н. Ветров, А.А.Дайлидко— Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2018. – 348 с.- ISBN 978-5-89035-710-6 –Текст: непосредственный
- 2 **Елистратов, А.В.** Тормозные системы подвижного состава железных дорог / А.В. Елистратов. – Москва : ФГУП ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2021.-304 с. - ISBN978-5-907206-76-2. – Текст : непосредственный
- 3 **Осинцев, И.А.** Теория работы электрооборудования электроподвижного состава: учеб. пособие: в 2 ч. / И.А.Осинцев.- М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2020.-324 с.- ISBN 978-5-907206-06-9 – Текст : непосредственный
- 4 **Осинцев, И.А.** Механическое оборудование для электровозов: учебное пособие / И. А. Осинцев. – Москва : ФГУП ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте»,2023. - 352 с.ISBN 978-5-907695-16-0 – Текст : непосредственный
- 5 **Соломатин, А.В.** Электрическое оборудование тягового подвижного состава железных дорог / А.В. Соломатин. – Москва : ФГУП ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2021.- 216 с.- ISBN 978-5-907206-76-2.- Текст : непосредственный
- 6 Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : официальное издание : утверждены приказом Минтранса России № 250 от 23.06.2022 : введены в действие 01.08.2022. - Москва : 2022. – Текст : непосредственный.
- 7 Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : официальное издание : утверждены Советом по железнодорожному транспорту государств –

участников Содружества от 6-7 мая 2014 : введены в действие 01.01.2015. - Москва : 2015. – Текст : непосредственный.

8 **Бахолдин, В.И.** Основы локомотивной тяги : учебное пособие / В. И. Бахолдин, Г. С. Афонин, Д. Н. Курилкин. — Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. — 308 с. — 978-5-89035-725-0. — Текст : электронный // УМЦ ЖДТ : электронная библиотека. — URL: <https://umczdt.ru/books/1200/2443/> (дата обращения 13.10.2023). — Режим доступа: по подписке.