

**Ташкентский Институт Инженеров
Железнодорожного Транспорта**

Конспект лекций по дисциплине

Основы тяги поездов

Составитель:

К.т.н., доцент Абляимов О.С.

Тошкент 2016

Лекция № 1:

Физическая модель тяги и движения поезда. Силы, действующие на поезд

План лекции

1. Общие сведения о теории локомотивной тяги.
2. Методологические основы теории тяги поездов.
3. Модели механики движения поезда.
4. Исходные положения для формирования модели поезда.
5. Силы, действующие на поезд при его движении.
6. Режимы и виды движения поезда.

Теория локомотивной тяги изучает управляемое движение поездов. При этом поезд рассматривают как управляемую систему, функционирующую в условиях переменных возмущающих воздействий внешней среды с учетом наложения внутренних и внешних удерживающих связей, а также допустимых ограничений ее управляющих воздействий.

Система – это совокупность объектов, имеющих между собой связи и функционирующих во времени как одно целое. В теории тяги поездов локомотив и вагоны, связанные между собой автосцепками, рассматривают перемещающимися в пространстве и во времени как единое целое, т.е. как система, не имеющая никаких других движений, кроме управляемого.

Отметим, что автосцепки являются внутренними, а рельсы – внешними удерживающими связями, которые определяют траекторию движения и направления сил, действующих на управляемое движение поезда. А переменные внешние воздействия обуславливаются неравномерностью профиля пути, изменением скорости движения и метеорологическими условиями.

Ограничения – есть допустимые состояния поезда в целом и локомотива в частности, в области которых может нормально (в штатном режиме) протекать процесс движения.

В свою очередь, ограничения обусловлены ресурсами управления и условиями эксплуатации. Первые ограничения определяются: ограничениями энергии, получаемый от источника мощности; номинальной мощностью тяговых электродвигателей; оснащённостью

поезда тормозными средствами; сцеплением движущих колёс с рельсами, определяющим устойчивость против боксования (юза); конструкционной скоростью локомотива; условиями надёжности по допускаемым токам и напряжениям электрических машин. Вторыми ограничениями являются: длина приёмо-отправочных путей станций; метеорологические условия; температура нагрева обмоток тяговых электрических машин локомотивов; предельно допускаемые скорости; унификация весовых норм поездов.

Состояние поезда – это есть его положение в пространстве и скорость в фиксированный момент времени, а также тяговые параметры в области допустимых состояний, определяющих управляемое движение поезда.

Поведение поезда – есть изменение в текущем времени всех координат состояния поезда, определяющих управляемое движение: пути, скорости, силы тока, напряжения, нагрева обмоток, тормозной силы.

Управлением поезда называется такая организация процесса движения, при которой обеспечивается достижение поставленной цели и соблюдение всех ограничительных условий его состояния.

При расчётах движения поездов стремятся обеспечить наибольшие провозную и пропускную способности железных дорог при минимальных затратах энергоресурсов. Для достижения этой цели исходят из принципа возможного максимума, т.е. вождения поездов наибольшей массы с наибольшей допустимой скоростью при наибольшем использовании кинетической энергии на каждом элементе неравномерного профиля пути. Этот принцип узаконен ПТР (правилами тяговых расчётов) и именно им следует руководствоваться в процессе выполнения тяговых расчётов.

При рассчитанном и заданном расписанием движении, цель управления состоит в том, чтобы диспетчер и машинист (автомашинист) привели поезд по месту назначения в заданное время прибытия.

Очевидно, для расчёта и практической реализации его машинистом требуется подобрать такие управляемые силы, которые будут в состоянии преодолеть силы сопротивления движению и силы инерции таким образом, чтобы обеспечить достижение заданных состояний поезда на каждом этапе управления.

Таковыми управляемыми силами являются сила тяги локомотива и тормозная сила поезда, которые относятся к категории управляющих воздействий систем, т.е. воздействия, сознательно изменяемые для достижения цели управления. Силы сопротивления движению поезда относятся к возмущающим воздействиям.

Для расчета движения используется **математическая модель поезда** — дифференциальное уравнение движения, описывающее его поведение с достаточной для целей практики точностью. Решение дифференциального уравнения позволяет определить закон движения на всех этапах управления и поэтому составляет центральную часть теории тяги и тяговых расчетов.

Решением этого уравнения с учетом ресурсов и ограничений определяют время, путь, скорость движения, нормы веса поездов, расход топливно-энергетических ресурсов на тягу при гарантированной безопасности движения поезда, устойчивости и надежности работы локомотивов.

Расчетную часть теории тяги поездов называют **тяговыми расчетами, которые** используются для разработки графика движения поездов, изыскания и проектирования железных дорог, а также расчетов в области экономической эффективности перевозок. Поэтому, тяговые расчеты являются основным расчетным инструментом в области рационального функционирования, планирования и развития железных дорог.

Таковы краткие сведения о предмете и методологических основах теории тяги поездов.

Для того чтобы обеспечить необходимое сходство в поведении оригинала и модели поезда, необходимо вначале сформировать **физическую модель**, т.е. некоторый аналог функционирования его как системы с допущениями, упрощающими расчет и не оказывающими существенного влияния на точность расчетов движения. После этого можно составить аналитическое описание поведения поезда — математическую модель.

Из теоретической механики известно, что для описания поведения системы требуется столько уравнений движения, сколько степеней

свободы имеет система. Поэтому вначале определим число степеней свободы поезда, перемещающегося в рельсовой колее. Как отмечено ранее, в тяге поездов изучают только управляемое движение и пренебрегают неуправляемыми движениями подвижного состава: поперечными в рельсовой колее, продольными в зазорах автосцепок, вертикальными при колебаниях обрессоренного веса и др.

Если в качестве допущения пренебречь этими движениями, то можно считать, что рельсовый путь представляет собой такую внешнюю удерживающую связь, наложение которой заставляет поезд двигаться только в одном направлении — вдоль рельсов.

На этом основании установлены два постулата — исходных положения для формирования модели поезда.

Постулат I: поезд имеет только одну степень свободы, а значит, для описания его поведения требуется лишь одно уравнение движения, что облегчает расчеты и: принято в теории тяги поездов.

На подвижной состав воздействует много сил, различных по природе образования, месту приложения и направлению действия.

Учесть все силы невозможно, и в этом нет необходимости, так как нас интересуют только те силы, которые влияют на управляемое движение.

Постулат II: для описания поведения поезда, имеющего одну степень свободы, необходимо и достаточно знать только те силы, которые совпадают с направлением движения или противоположны ему.

Далее, можно допустить, что автосцепка представляет собой такую внутреннюю связь, наложение которой удерживает вагоны и локомотив поезда на постоянном расстоянии друг от друга и заставляет проходить один и тот же путь с одинаковой скоростью.

Из механики известно, что такое движение является признаком поступательного движения так называемой неизменяемой системы. На этом основании установлены еще три постулата.

Постулат III: так как поступательное движение неизменяемой системы полностью определяется движением центра ее масс, то движение поезда можно описать как движение материальной точки, в которой сосредоточена вся масса поезда. Как известно, под материальной точкой

понимают тело, размерами которого можно пренебречь при описании его движения. Расположение центра масс принято в середине длины поезда.

Постулат IV: так как сумма работ внутренних сил неизменяемой системы равна нулю, то для описания движения поезда достаточно учитывать только внешние силы и не принимать во внимание внутренние. При этом надо учитывать только те внешние силы, которые совпадают с направлением движения по рельсам или противоположны ему.

Постулат V: если модель поезда представляет собой материальную точку, к которой приложены внешние силы, действующие в одном направлении, то для расчета движения может быть использован известный в механике принцип наложения (суперпозиции). Сущность его состоит в том, что результирующее движение системы равно сумме движений, возникающих под действием каждой силы в отдельности.

Исходя из принципа суперпозиции в теории тяги все силы, воздействующие на управляемое движение поезда, заменяют одной равнодействующей силой, равной по величине алгебраической сумме внешних сил и приложенной в середине поезда в направлении движения или против него.

Итак, в результате принятых допущений *физическую модель поезда* можно представить как управляемое движение материальной точки с одной степенью свободы, в которой сосредоточена вся масса поезда и к которой приложена равнодействующая сила, равная по величине алгебраической сумме внешних сил, действующих по направлению или против движения поезда.

Для удобства расчетов в механике принято приводить силы к определенному месту. В тяге поездов все силы, воздействующие на управляемое движение, считают приложенными к ободам колес локомотива и вагонов поезда.

На рис. 1.1 приведена принятая физическая модель поезда, где обозначены силы, которые необходимо учитывать в расчетах движения: F_k — касательная сила тяги локомотива; W_k — сопротивление движению поезда; B_t — тормозная сила поезда; Q — вес поезда; Q' — «реакция» рельсового пути (рельсов).

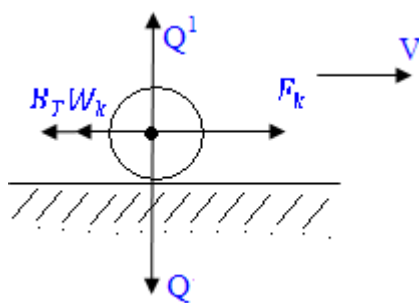


Рис 1.1 Силы, действующие на поезд.

Сила тяги — это управляемая движущая сила, создаваемая двигателями тяговой передачи локомотива во взаимодействии с рельсами и приложенная к ободам движущих колес в направлении движения поезда. Сила тяги, как управляющее воздействие, может изменяться машинистом либо в результате саморегулирования тяговых передач локомотивов, обладающих свойством адаптивности, либо автоматическим устройством — автомашинистом.

Силой сопротивления называют совокупность всех неуправляемых сил, возникающих в процессе движения, приведенных к ободам колес поезда и направленных против движения.

Тормозная сила — есть совокупность управляемых сил, создаваемых тормозными средствами поезда во взаимодействии с рельсами и приложенных к ободам колес в направлении, противоположном движению. Действие этой силы регулируется машинистом или автоматическим устройством.

При неравномерном движении поезда действуют также силы инерции

$$m \frac{dv}{dt} + m_a \frac{d\omega}{dt} = T \quad (1.1)$$

поступательно движущихся масс m и вращающихся масс m_a поезда, на преодоление которых затрачивается работа силы тяги или тормозной силы. Однако при определенных условиях кинетическая энергия этих сил может преобразовываться без потерь в работу по передвижению поезда.

В зависимости от сочетания рассмотренных сил различают режимы движения поезда: **режим тяги**, когда действуют силы $(F_k - W_k - T)$, **режим торможения**, когда действуют $(B_T \pm W_k - T)$, и **режим холостого хода**, когда действуют силы $(T - W_k)$.

Соотношения величин сил, составляющих равнодействующую поезда, определяет характер движения: при $(F_K - W_K - T) > 0$ — движение ускоренное; при $(F_K - W_K - T) < 0$ — движение замедленное; при $(F_K - W_K) = 0$ — движение равномерное ($T=0$).

В режиме холостого хода (режим выбега) поезд движется без участия силы тяги локомотива, т.е. по инерции или под уклон (спуск). Движение при этом, как правило, за исключением движения на крутых спусках, замедленное.

В режиме торможения равнодействующая сил всегда отрицательна и поэтому движение поезда – замедленное.

Приведем другую интерпретацию построения простейшей модели механики движения поезда, принятой в тяговых расчетах, которая основывается на следующих суждениях.

Общее представление о движущемся поезде дает его расчетная схема (рис. 1.2, а). На ней поезд показан как связка (совокупность) локомотива и группы (состава) вагонов, сцепленных вместе упругими связями. Длина поезда - $l_{п}$.

На поезд целиком и на его составные элементы по отдельности действуют упомянутые выше горизонтальные силы: движущая сила (или сила тяги) F и силы сопротивления движению составных частей поезда W' , W_1'' , ... W_n'' , а также и вертикальные силы тяжести его составных частей— вес поезда P и веса вагонов q_1, \dots, q_n . Поезд, как система связанных между собой элементов, движется поступательно с общей для всех элементов скоростью V .

На расчетной схеме 1.2 а отсутствуют несущественные для анализа параметры и показатели, например техническое состояние вагонов и локомотива (достаточно того, что они могут двигаться в составе), их вертикальные и поперечные колебания и т.д., которыми можно пренебречь.

Однако даже принятые во внимание на схеме рис. 1.2.а переменные величины делают их систему неудобной для анализа. Поэтому сделаем несколько последовательных упрощений.

Этап I. Объединим условно в одно тело общей массой $M_q = \sum m_i$ и весом $Q = \sum q_i$ все вагоны состава. Наличием связей между ними и возможностями относительных перемещений вагонов пренебрегаем.

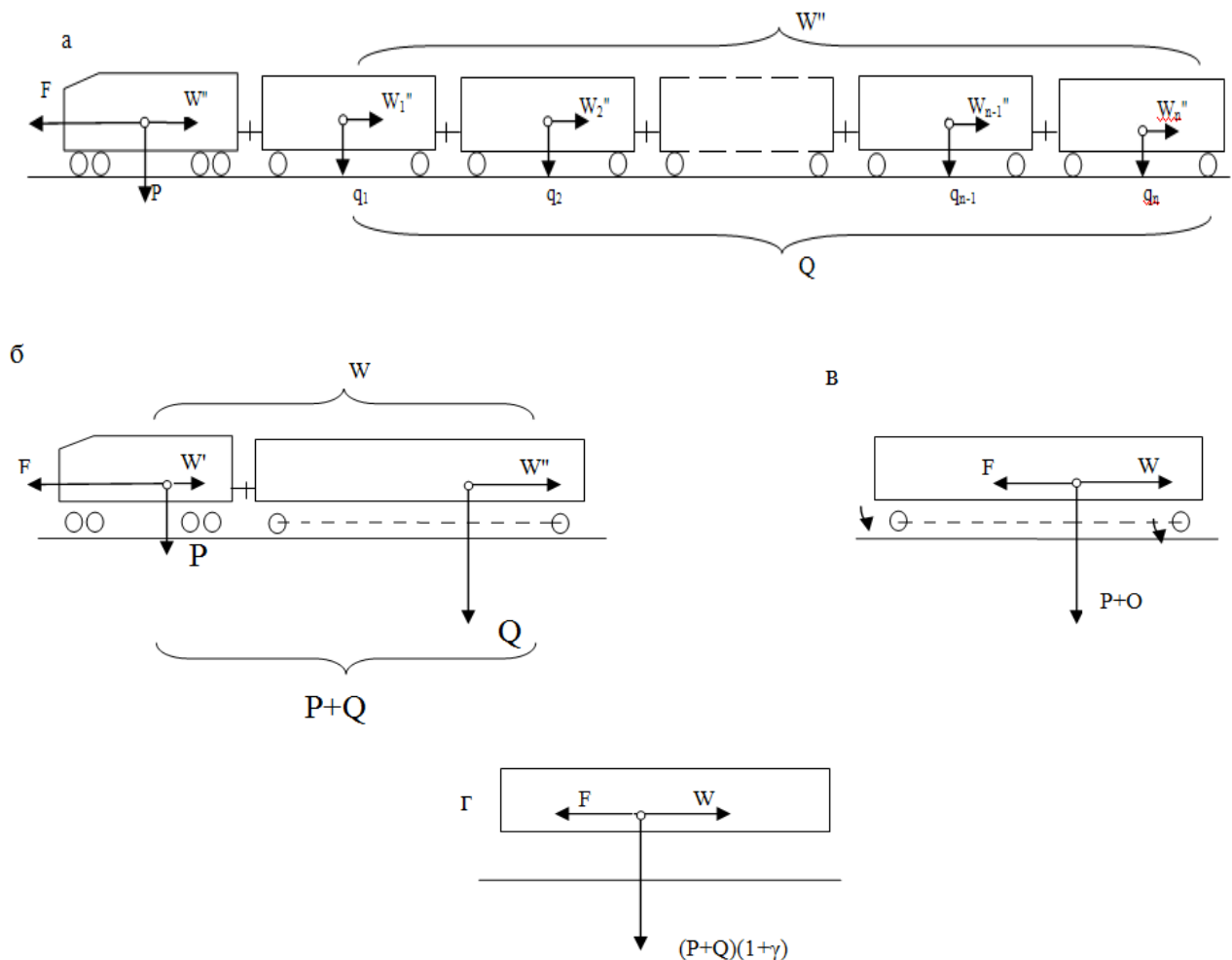


Рис 1.2 Расчетные схемы сил, действующих на поезд при его движении.

Это возможно сделать потому, НТР суммарная работа внутренних сил в поезде равна нулю, так как в любой сцепке при относительных перемещениях действуют взаимно противоположные силы.

Сила общего сопротивления движению состава будет $W'' = \sum W_i''$

Новая модель поезда теперь представляет собой два связанных тела (локомотив и состав вагонов), движущихся поступательно (рис. 1.2. б). Так как оба тела находятся в движении одно и то же время, проходят одно и то же расстояние (от одной станции до другой), то есть движутся с одной и той же средней скоростью, возможно дальнейшее упрощение.

Этап 2. Исходя из этих соображений, представим поезд теперь в виде одного тела общим весом $(P+Q)$, на которое действуют горизонтальные силы тяги F и сопротивления движению W (рис. 1.2. в).

На этом этапе составления модели обратим внимание на то, что часть массы поезда (колесные пары локомотива и вагонов, якоря тяговых электродвигателей локомотива), помимо поступательного движения в

составе поезда, совершает вращательное движение, на что затрачивается часть работы движущей силы F .

Этап 3. Исключим из рассмотрения вращающиеся массы, условно увеличивая вес (массу) движущегося поезда умножением его на $(1 + \gamma)$, где γ —коэффициент (доля) вращающихся масс в общей массе поезда. В результате получаем одно тело весом $P(1 + \gamma)$ и массой $M(1 + \gamma)$, движущееся поступательно (рис. 1.2. г).

Этап 4. Последним этапом моделирования поезда может быть отвлечение от его реальных размеров. Можно посчитать, что, так как все элементы поезда движутся поступательно, его реальные размеры (то есть, длина) не имеют существенного значения для анализа характера его движения. Это позволяет рассматривать движение поезда как движение центра его масс (центра тяжести), то есть как движение известной в механике модели—материальной точки, в которой сосредоточена масса поезда и к которой приложены все действующие на него силы.

Именно такая, внешне очень простая, модель поезда и положена в основу методов тяговых расчетов, предназначенных для использования в практике эксплуатации железных дорог стран СНГ. Это положение зафиксировано в п. 1.4.1 Правил тяговых расчетов: «При определении скорости движения и времени хода поезд принимать за материальную точку, в которой сосредоточена вся его масса. Положение этой точки условно считать в середине поезда».

Контрольные вопросы:

1. Что изучает теория локомотивной тяги?
2. Основные положения теории тяги поездов.
3. Математическая модель поезда.
4. Физическая модель поезда.
5. Какие силы действуют на движущийся поезд?
6. Режимы движения поезда.
7. Назначение и сущность тяговых расчётов.

Литература.

1. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. - М.: Маршрут, 2005, 448с.
2. Деев В.В. и др. Тяга поездов. – М.: Транспорт, 1987, 264с.
3. Подвижной состав и тяга поездов. Под ред. В.В.Деева и Н.А.Фуфрянского. - М.: Транспорт, 1979, 368с.
4. Бабичков А.М., Гурский П.А., Новиков А.П.. Тяга поездов и тяговые расчёты. – М.: Транспорт, 1971, 280с.

5. Правила тяговых расчётов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985, 288с.

Лекция № 2:

Основной закон локомотивной тяги

План лекции

1. Образование силы тяги локомотива.
2. Общие сведения об устойчивости движения.
3. Основной закон локомотивной тяги.
4. Расчёт силы тяги локомотива по сцеплению.
5. Коэффициент сцепления.

Сила тяги локомотива - это полезная, управляемая, внешняя, касательная сила, возникающая за счёт преобразования подведённой энергии в механическую работу. Упомянутые преобразования могут быть как внутренние, так и внешние.

Рассмотрим процесс возникновения внешней (касательной) силы тяги локомотива с учетом расчетной схемы, приведенной на рис. 2.1.

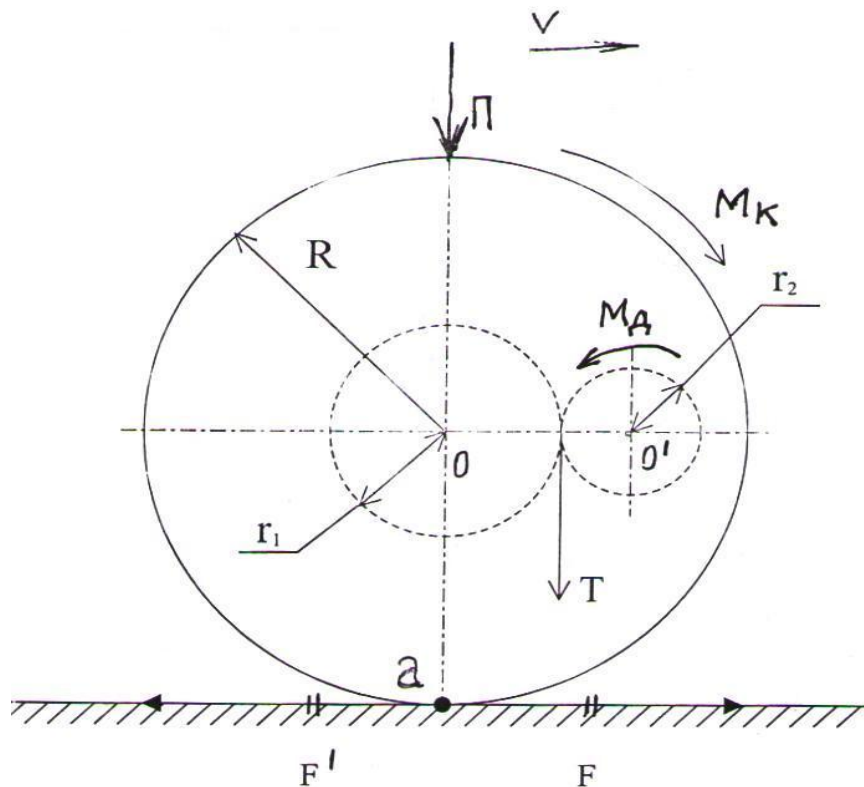


Рис. 2.1. Процесс образования касательной силы тяги локомотива.

Π - нагрузка на ось колёсной пары;

R - радиус колеса колёсной пары;

r_1 - радиус зубчатого колеса;

r_2 - радиус шестерёнки;

T – окружное усилие зубчатой передачи, возникающее за счёт работы тягового электродвигателя (ТЭД).

При заданном токе нагрузки тяговый электродвигатель развивает на валу вращающий момент M_∂ , равный по величине

$$M_\partial = T \cdot r_2 \quad (2.1.)$$

Этот вращающий момент приводит во вращение якорь тягового электродвигателя локомотива (электровоза или тепловоза), например, против часовой стрелки.

А окружное усилие зубчатой передачи составляет

$$T = M_\partial / r_2 \quad (2.2)$$

Сила T , действуя на зубчатое колесо, создает вращающий момент M_κ , который без учёта потерь будет равен

$$M_\kappa = T \cdot r_1 \quad (2.3.)$$

Вращающий момент M_κ - это внутренний по отношению к локомотиву момент, который не может сообщить поступательное движение к колёсной паре (колесу), а приводит во вращение зубчатое колесо, а следовательно колёсную пару локомотива по часовой стрелке.

Под воздействием этого вращающего момента в точке “а” возникает сила F^1 по величине равная

$$F^1 = M_\kappa / R \quad (2.4.)$$

Точка “а” - точка опоры, в которой при наличии нагрузки П будет возникать сцепление колеса с рельсом ... (это очевидно).

При этом сила F^1 , приложенная в точку “а” – это внутренняя сила, как бы принадлежащая колесу и подталкивающая рельс в сторону обратную ходу движения колеса (качению) колеса. Сила F^1 не является силой тяги. Однако со стороны рельса возникает реакция, так как он не подвижен, то есть «пришит», которая направлена по ходу движения колеса и приложена в точке “а” $F^1 = F$. Это сила F реакция рельса, которая является внешней касательной силой (так как она принадлежит рельсу).

Докажем, что сила F является силой тяги локомотива с помощью схемы сил, приведенных на рис. 2.2. Перенесём силу F на ось колёсной пары, выразив её через пару сил. Используя зависимости, приведённые выше, имеем: $T \cdot r_1$ - момент внутренних сил, $F \cdot R$ - момент внешних сил. При этом $T \cdot r_1 = F \cdot R$.

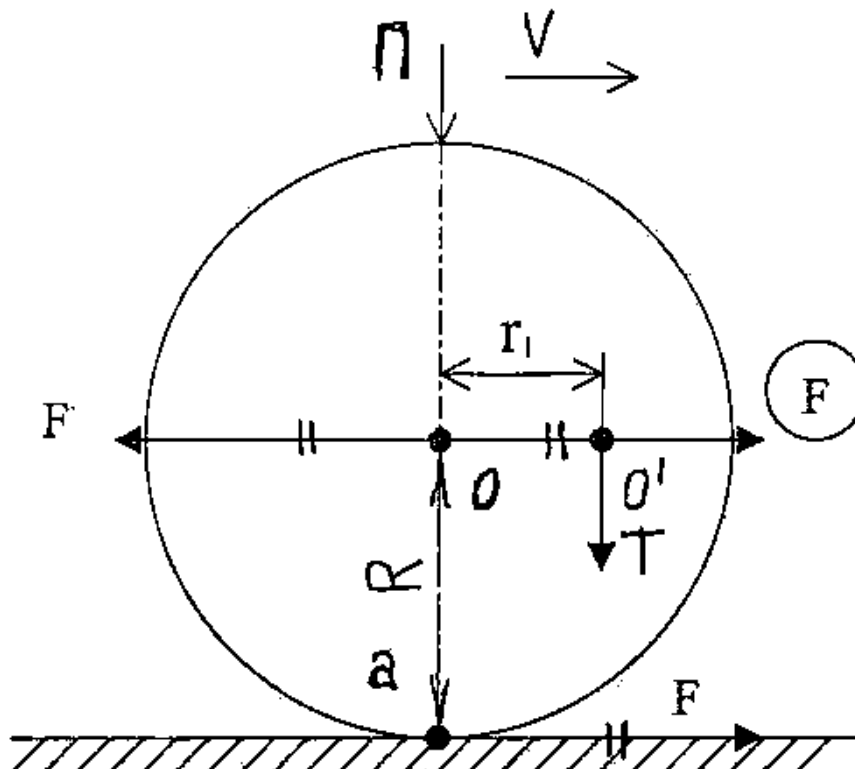


Рис.2.2. Схема сил, поясняющая образование касательной силы тяги локомотива.

Момент от пары сил уравнивается крутящим моментом внутренних сил и остаётся сила \textcircled{F} , приложенная к оси колёсной пары и направленная по ходу движения колеса. Следовательно: сила \textcircled{F} , перенесённая на ось колёсной пары и будет являться касательной силой тяги, которая возникает на каждой колёсной паре локомотива. Эта оставшаяся неуравновешенная сила \textcircled{F} , приложенная в центре колесной пары, передаётся через буксу на раму локомотива и создаёт поступательное движение.

Таким образом:

$$F_k = \sum \textcircled{F} \text{ - внешняя касательная сила тяги локомотива.}$$

Касательной силой тяги локомотива F_k называют сумму сил, развиваемых на ободу колёс каждой колёсной пары (сумма всех сил движущих колёс.)

Сила \textcircled{F} является внешней для локомотива, так как она действует на колесо, которое закреплено (благодаря сцеплению колёс с рельсами) на рельсе в точке мгновенного центра вращения “а” и составляет вместе с рельсами единую систему – внешнюю по отношению к локомотиву.

Поэтому сила \textcircled{F} является движущей силой локомотива, а так как для удобства расчётов условились относить все силы, определяющие движение поезда, к ободам движущих колёс, то касательной силой тяги считают силу F , равную по величине силе \textcircled{F} , т.е. $F = \textcircled{F}$. За счёт трения в зубьях сила T , воздействуя на зубчатое колесо, создает вращающий момент M_3 , несколько меньший, чем упомянутый выше момент M_k , т.е.

$$M_3 = T \cdot r_1 \cdot \eta_3 = \frac{M_\partial}{r_2} \cdot r_1 \cdot \eta_3 = \mu M_\partial \eta_3 \quad (2.5)$$

где η_3 - к.п.д. учитывающий потерю мощности в зубчатой передаче и моторно-

осевых подшипниках тягового электродвигателя;

μ - передаточное число.

В свою очередь вращающий момент $M_3 = F \cdot R$, откуда касательная сила тяги, создаваемая одним тяговым электродвигателем, составляет величину

$$F = \frac{\mu M_\partial}{R} \cdot \eta_3$$

(2.6.)

А касательная сила тяги всего локомотива F_k будет равна сумме сил всех движущих колёс, т.е. $F_k = \sum F$.

Качение колёс приводит к поступательному движению локомотива со скоростью

$$V = \frac{\pi D_k n_k \cdot 60}{1000} = 0,188 D_k \cdot n_k = 0,188 \frac{D_k n}{\mu} \quad (2.7)$$

где D_k - диаметр колеса, м2

n_k - частота вращения колеса, об/мин;

n - частота вращения вала тягового электродвигателя и шестерни, об/ми.

Кроме касательной силы тяги, различают так же силу тяги на авто сцепке F_n , которая приложена к сцепке локомотива.

Измерить касательную силу тяги F_k практически невозможно. Поэтому динамометром измеряют силу тяги на сцепке первого к локомотиву вагона F_∂ - динамометрическая сила тяги. Упомянутая сила F_∂ меньше силы тяги F_k на величину сил сопротивления движения $W_\Lambda (W^1)$ и сил инерции $m_\Lambda \frac{dv}{dt}$ - самого локомотива (где m_Λ - масса локомотива; а $\frac{dv}{dt}$ - ускорение локомотива).

По величинам фиксированных F_∂ и V определяют величину

$$F_k = F_\partial + W_\Lambda \pm m_\Lambda \frac{dv}{dt} \quad (2.8)$$

В случае равномерного движения $\frac{dv}{dt} = 0$ к составу от локомотива будет передаваться сила $F_n = F_k - W_\Lambda$, которую называют силой тяги на сцепке.

У тепловозов различают индикаторную силу тяги F_i , которая определяется из условия, что её работа за один оборот движущих колёс равна работе газа в цилиндрах дизеля. Так как действительным местом приложения индикаторной силы тяги являются поршни дизеля, а не обода колёс, поэтому перенос её без каких либо потерь условен. Другими словами, тепловоз развивал бы индикаторную силу F_i на ободу колёс только в том случае, когда при передаче работы газов от поршней дизеля к колёсам отсутствовали бы всякие потери.

Если все потери (механические потери в самом дизеле, расхода энергии на вспомогательные нужды тепловоза - холодильник, компрессор, зарядка аккумуляторной батареи и другие, а также потери в передаче)

учесть условным механическим коэффициентом полезного действия тепловоза η_M , то

$$F_k = F_i \cdot \eta_M \quad (2.9)$$

Отсюда имеем механический к.п.д. тепловоза $\eta_M = F_k / F_i$

Зависимость силы тяги локомотива от сцепления движущих колёс его с рельсами.

Вначале напомним о точке “а”, в которой при наличии нагрузки П возникает сцепление колеса с рельсом

Рассматривая процесс образования силы тяги локомотива в условиях устойчивого движения (“штатный режим” эксплуатации локомотива) предполагалось, что движущая сила, создаваемая двигателем на ободах колёсной пары, равна силе сцепления колёс с рельсами. Однако, величина силы сцепления имеет свои пределы (ограничения) и если сила, создаваемая двигателем, превысит силу сцепления, то колеса начнут боксовать. Явление боксования представляет собой процесс возмущенного движения локомотива, при котором качение колёс сопровождается избыточным скольжением в зоне контакта (точки “а”) с рельсами. Скорость скольжения $V_{ск}$ равна разности окружной скорости колеса V_k и скорости поступательного движения локомотива V , т.е. $V_{ск} = V_k - V$.

Увеличение $V_{ск}$ приводит к снижению коэффициента трения и силы сцепления колёс с рельсами. В этой связи уменьшается сила тяги, движущая поезд, а часть энергии тяговых электродвигателей расходуется на увеличения частоты вращения боксующих колёсных пар (осей). При большом сопротивлении движению поезда от подъёма возникает возможность остановки поезда на перегоне, а непрерывное возрастание скорости вращения движущих колёс локомотива при боксовании имеет опасные и необратимые последствия, а именно: излом зубчатой передачи, разрыв бандажей якоря тягового электродвигателя, круговой огонь на коллекторе и т.д. Кроме того, в процессе боксования происходит интенсивный износ рельсов и движущих колёс, а толчок силы тяги в

момент прекращения боксования может привести к повреждению автосцепки и вагонных рам.

С целью исключения опасных явлений, обуславливающих боксование, установлены технические условия устойчивого движения локомотива, которые описываются следующими неравенством

$$F_{к\max} \leq 1000\psi_0 P_{сц} \quad (2.10),$$

где ψ_0 - потенциальный коэффициент сцепления движущих колёс локомотива

с рельсами, который определяют как отношение наибольшей (на пределе сцепления – без боксования) касательной силы тяги

$F_{к\max}$ к

сцепному весу локомотива $P_{сц}$, т.е. $\psi_0 = F_{к\max} / P_{сц}$

Этот коэффициент характеризует наибольшую (максимальную) силу тяги, реализуемую движущими колёсными парами без боксования – его определяют, при статических условиях без учёта реальных условий движения колёсных пар, конструкции механической и электрической частей локомотива. В действительности сила сцепления движущих колёсных пар с рельсами изменяется из-за перераспределения нагрузок от осей на рельсы в процессе реализации тягового усилия. Сила тяги локомотива в этот момент ограничена боксованием оси, имеющей наименьшую силу сцепления колёс с рельсами.

Неравенство (2.10) выражает закон сцепления движущих колёс локомотива с рельсами или основной закон локомотивной тяги – для обеспечения устойчивого движения локомотива касательная сила тяги на ободах движущих (ведущих) колёс, создаваемая тяговыми электродвигателями, не должна превосходить (превышать) силу сцепления упомянутых колёс с рельсами.

Основной закон локомотивной тяги, характеризующий ограничительные условия устойчивого движения локомотива, имеет прикладное значение и представляет собой техническое приложение общей теории устойчивости движения академика А.М.Ляпунова.

Рассмотрим эти условия по Ляпунову. Из механики известно, что движение системы можно рассчитать, если заданы силы, действующие на систему и состояние системы, т.е. начальная скорость и координаты. В технических расчётах движения поезда нельзя принимать предельной силе сцепления движущих колёс с рельсами, соответствующей потенциальному коэффициенту сцепления ψ_0 , так как в этом случае движение будет неустойчивым. Действительно, в процессе движения возникают возмущающие воздействия, которые невозможно учесть в расчётах вследствие случайности их возникновения, а так же малости, по сравнению с основными силами. Очевидно, что характер воздействия может быть различным, а именно: либо при резком наборе позиций контроллера машиниста касательная сила тяги на ободах колёс превысит силу сцепления - $\psi_0 R_{сц}$, либо при постоянной позиции контроллера машиниста резко снизится сила сцепления движущих колёс с рельсами ввиду загрязнённости последних. Поэтому в том и другом случае может возникнуть боксование. На рис.2.3 показаны графические зависимости, характеризующие изменение скорости скольжения колёс локомотива с течением времени его движения, где обозначено: 1,2 – при устойчивом движении; 3- при разносном боксовании.

Если скорость скольжения колёс по рельсам получит малые приращения вследствие случайных малых возмущающих воздействий, то такое движение называется возмущенным. Если приращение скорости скольжения колёс при возмущённом движении незначительно, то такое движение является невозмущённым движением, которое называется устойчивым. Если же при сколь угодно малом возмущении величина скорости скольжения колёс все время отклоняется от значений при невозмущённом движении, то невозмущённое движение называется неустойчивым по Ляпунову. В эксплуатации тягового подвижного состава разносным боксованием называют возмущённое движение, при котором скорость скольжения движущих колёс локомотива непрерывно возрастает.

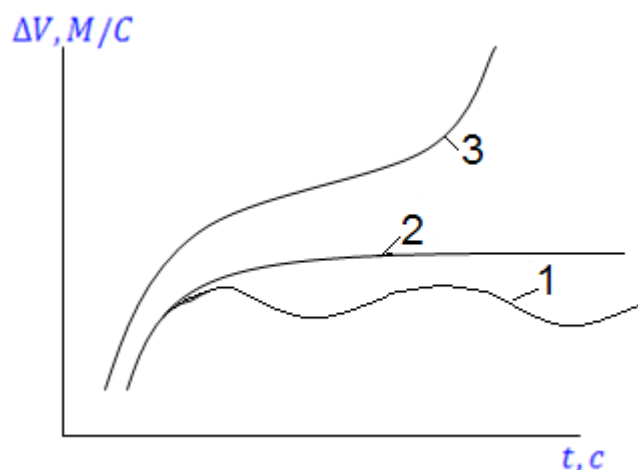


Рис. 2.3. Скорость скольжения колёс локомотива.

Расчёт силы тяги локомотива по сцеплению. Касательная или тяга локомотива, величина которой ограничивается сцеплением движущих колёс локомотива с рельсами, называется силой тяги локомотива по сцеплению или силой сцепления - $F_{к\text{сц}епл}$ ($F_{к\text{сц}}$).

Известно, что неустойчивые системы не могут обеспечивать реализацию заданных характеристик, опасны и вредны в работе, поэтому они являются практически неработоспособными. Для обеспечения устойчивости против боксования в тяговых расчётах принято пользоваться сцепным весом $P_{сц}$ локомотива и расчётным коэффициентом сцепления движущих колёс локомотива с рельсами ψ_k , величина которого меньше потенциального коэффициента сцепления ψ_0 .

При этом сила тяги локомотива по сцеплению определяется из выражения

$$F_{к\text{сц}} = 1000\psi_k P_{сц} \quad (2.11)$$

Расчётный коэффициент сцепления ψ_k определяется опытным путём и представляет собой отношение наибольшей, надёжно реализуемой в условиях эксплуатации (без явлений боксования), касательной силы тяги к сцепному весу локомотива, т.е. статической нагрузке движущих колёс на рельсы. Поэтому, если силу тяги по сцеплению определили по выражению (8.11) и движение поезда рассчитали с учётом этой силы, то движение,

которое должен совершать локомотив по этим расчётам, будет невозмущенным движением по Ляпунову. Если же в реальных условиях, эксплуатации поезд будет испытывать случайные воздействия, которые не были учтены в расчетах, то численное приращение скорости скольжения колёс локомотива по рельсам не должно быть большим и возрастающим по времени, что исключает возникновение явления боксования. Таким образом, невозмущенное движение поезда, полученное расчётом путём, будет устойчивым по отношению к скорости скольжения движущих колёс по рельсам.

Однако в реальных условиях эксплуатации локомотивы всё-таки боксуют. Это происходит в тех случаях, когда нарушается нормальный режим регулирования или допущены отступления от норм технического состояния устройств, например: резкое увеличение силы тяги при разгоне поезда машинистом, чрезмерно большой износ рельсов и колёс, резкие колебания тока и напряжения тяговых электродвигателей, резкое снижение коэффициента сцепления в результате загрязнения рельсов и другие. Поэтому в целях обеспечения устойчивого движения поезда необходимо определять силу тяги локомотива по величине расчетного коэффициента сцепления ψ_k , который учитывает все отклонения действительного коэффициента сцепления и изменения динамических сил и нагрузок от движущих осей на рельсы в процессе реализации силы тяги. Величина расчетного коэффициента сцепления определяется в зависимости от скорости и вида тяги на основании исследований, опытных поездок и достижений передовых машинистов.

Правила тяговых расчётов для поездной работы [5] рекомендуют предложенные ВНИИЖТ эмпирические формулы типа

$$\psi = a + \frac{b}{c + dv} \quad (2.12)$$

где a , b и c - постоянные, значения которых на основе экспериментальных

исследований дифференцированы для различных серий локомотивов в зависимости от скорости движения.

Величина расчётного коэффициента сцепления ψ_k с увеличением скорости движения V уменьшается и наоборот, увеличивается с уменьшением последней.

Опираясь на выражение (2.11), при $P_{сц} = \text{const}$, можно записать – $F_{кск} = f(v)$, т.е. сила тяги локомотива по сцеплению зависит от скорости движения поезда, характер зависимости которой для различных типов локомотивов на рис.2.4.

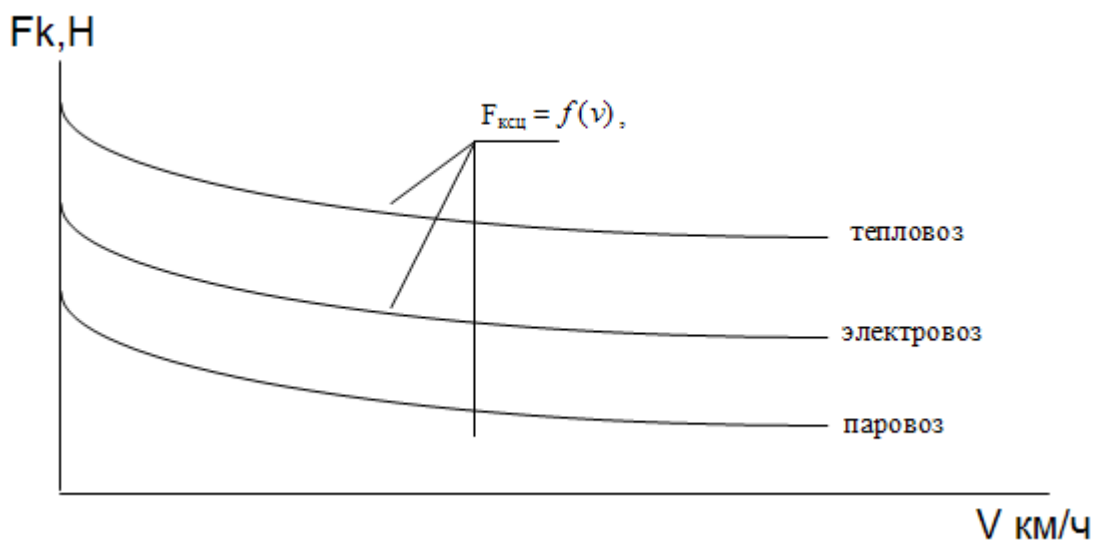


Рис. 2.4. Сила тяги по сцеплению для различных локомотивов.

Кроме того, Правила тяговых расчётов для поездной работы [5] устанавливают, что при наличии кривых малого радиуса на крутых подъёмах расчётные значения коэффициентов сцепления следует уменьшить пропорционально поправочному коэффициенту $K_{кр}$, зависящему от радиуса кривой $R - \psi_{кр} = \psi_k K_{кр}$. Значения поправочного коэффициента определяют по формулам:

- для электрической тяги на кривых радиусом менее 500 м

$$K_{кр} = \frac{250 + 1,55R}{500 + 1,1R} \quad (2.13)$$

- при тепловозной тяге на кривых радиусом менее 800 м

$$K_{кр} = \frac{3,5R}{400 + 3R} \quad (2.14)$$

Контрольные вопросы:

1. Сила тяги локомотива и её сущность.
2. Расчётная модель и процесс образования касательной силы тяги локомотива.
3. Как определить величину касательной силы тяги локомотива.
4. Приведите пояснения по силе тяги на автосцепке и индикаторной силе тяги тепловоза.
5. Что такое боксование колёсных пар локомотивов и к чему оно может привести.
6. Приведите технические условия устойчивого движения локомотива.
7. Основной закон локомотивной тяги и его сущность.
8. По какому критерию оценивается устойчивость движения.
9. Ограничительные условия устойчивого движения локомотива по А.М.Ляпунову.
10. Что представляет собой сила тяги локомотива по сцеплению и как её определяют.
11. Потенциальный (физический) и расчётный коэффициент сцепления движущих колёс локомотива с рельсами.
12. Как и чем оценивается сила тяги по сцеплению.
13. Как влияют кривые участки малого радиуса на расчётные значения коэффициентов сцепления.

Литература

1. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. - М.: Маршрут, 2005, 448с.
2. Деев В.В. и др. Тяга поездов. – М.: Транспорт, 1987, 264с.
3. Подвижной состав и тяга поездов. Под ред. В.В.Деева и Н.А.Фуфрянского. - М.: Транспорт, 1979, 368с.
4. Бабичков А.М., Гурский П.А., Новиков А.П.. Тяга поездов и тяговые расчёты. – М.: Транспорт, 1971, 280с.
5. Правила тяговых расчётов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985, 288с.

Лекция № 3:

Тяговая характеристика локомотива и ее идеальная форма. Сила тяги тепловоза

План лекции

1. Тяговая характеристика автономного локомотива.
2. Различные формы тяговых характеристик и их особенности.
3. Сила тяги тепловоза по дизелю.
4. Сила тяги тепловоза по электрической передаче.

Тяговой характеристикой локомотива называется графическая зависимость касательной силы тяги локомотива от скорости движения

$F_k = f(v)$ при различных режимах работы его энергосиловой установки в пределах допускаемых ограничений по надёжности, устойчивости и безопасности движения.

С точки зрения математических методов теории оптимального управления касательная сила тяги локомотива является управляющим воздействием поезда (входом), сопротивление движению поезда – возмущающим воздействием (входом), а скорость движения – есть регулируемая величина (выход).

Тяговые характеристики локомотивов являются статическими, так как получены экспериментальным путём при равновесном взаимодействии упомянутых выше воздействий и движении с равномерной скоростью. Поэтому расчёты скорости движения поездов, выполняемые с использованием тяговых характеристик, не учитывают переходные (динамические) процессы.

В условиях эксплуатации переменные состояния поезда и локомотива изменяются во времени, т.е. преобладают динамические процессы тяги, которые определяются реальными условиями перевозочной работы, а именно: профилем пути, массой и ходовыми свойствами поездов, их организацией движения и т.д. В этой связи динамические процессы нельзя изобразить графически на тяговой характеристике потому, что они являются переменными во времени и всецело зависят от конкретных условий движения. Таким образом, использование статических характеристик при выполнении тяговых расчётов является необходимым упрощающим допущением.

По своей сути упомянутая графическая зависимость может иметь линейные и нелинейные графики участков тяговых характеристик, несколько простейших возможных вариантов форм которых показаны на рис. 3.1, где обозначено: линейное постепенное возрастание силы тяги в

диапазоне скорости движения от v_1 до v_2 по уравнению $F = F_1 + Kv$ (отрезок 1-2); такое же линейное убывание силы тяги по уравнению $F = F_1 - Kv$ (отрезок 1-4) и промежуточный вариант – постоянство силы тяги $F = F_1 = \text{const}$ в том же диапазоне скоростей (линия 1-3).

Далее выясним какая форма графической зависимости наилучшим образом будет отвечать требованиям эффективного использования автономных локомотивов в реальных условиях эксплуатации.

Оценку степени пригодности той или другой формы осуществляем по величине необходимой мощности локомотивов с такими характеристиками.

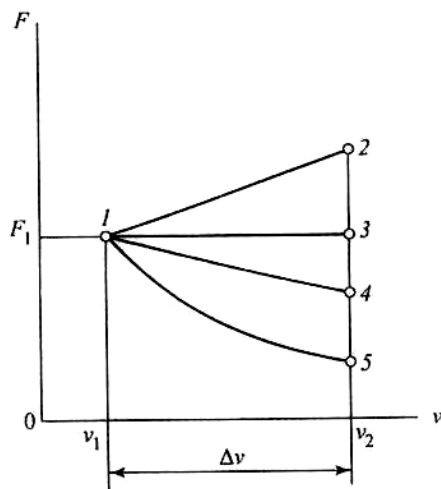


Рис. 3.1 Возможные варианты формы тяговых характеристик

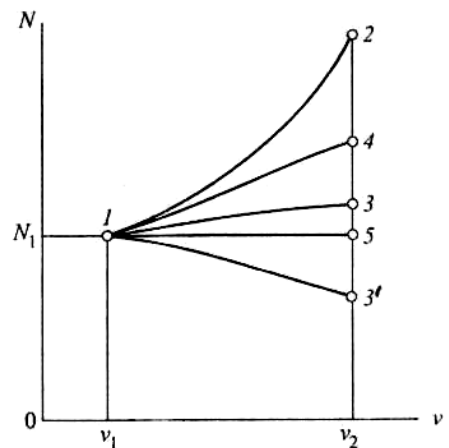


Рис. 3.2 Зависимости необходимой мощности локомотива от скорости движения при различных вариантах формы тяговой характеристики

Мощность N - это работа A в единицу времени t , то есть $N = A/t$ и при равномерном движении её можно представить как $N = FS/t = Fv$ - произведение силы на скорость.

Тогда, по первому варианту характеристики (линия 1-2 на рис. 3.1), если $k > 0$, мощность локомотива должна возрасти по мере увеличения скорости движения пропорционально квадрату её приращения:

$N = N_1 + k(v_2 + v_1)$, где $N_1 = F_1 v_1$ - мощность в исходной точке 1 (рис. 3.2, кривая 1-2).

По второму варианту ($k < 0$), если величина k невелика, то необходимая мощность может также даже несколько возрасть (за счёт роста скорости) – кривая 1-3 на рис 3.2. При относительно больших значениях коэффициента k требуемая мощность локомотива может и уменьшаться с ростом скорости движения – кривая 1 – 3¹.

Для обеспечения постоянной величины силы тяги в рассматриваемом диапазоне скоростей движения $F_1 = const$ необходимая касательная мощность локомотива N должна возрасть прямо пропорционально скорости движения V , то есть $N = F_1 v$ – прямая 1-4 на рис. 3.2 .

Известно, что касательная мощность на движущих колёсах тепловоза, равно как и любого другого типа автономного локомотива (паровоза, газотурбовоза), прямо пропорциональна мощности его энергосиловой установки

$$N_k = N_e (1 - \beta) \cdot \eta_{\text{пер}} \quad (3.1.)$$

где N_e – эффективная (на коленчатом вале дизеля) мощность, кВт;

β – коэффициент, учитывающий расход мощности на привод вспомогательного оборудования тепловоза, $\beta = 0,88 \dots 0,90$;

$\eta_{\text{пер}}$ – коэффициент полезного действия передачи тепловоза, $\eta_{\text{пер}} = 0,84 \dots 0,85$.

Величина номинальной (расчётной) мощности энергосиловой установки автономного локомотива ограничена её свойствами. Тепловозные дизели не допускают перегрузки и, следовательно, $N_{e_{\text{макс}}} = N_{e_{\text{ном}}} = const$. А раз наибольшая мощность источника энергии неизменна, то целесообразно к проектированию локомотива подходить так, чтобы эту величину мощности всегда (с соответствующими поправками) можно было бы реализовать на движущих колёсных парах. Поэтому необходимо стремиться к тому, чтобы наибольшая возможная величина касательной мощности тепловоза так же могла быть использована при любой величине скорости, то есть чтобы соблюдалось аналогичное равенство

$N_{к макс} = N_{к ном} = const$ – это можно обеспечить при полном использовании мощности дизеля (считая, что произведение $(1 - \beta) \eta$ пер мало зависит от скорости движения и может поэтому считаться неизменным) в рабочем диапазоне скоростей движения локомотива.

Тогда для автономного локомотива и для тепловоза, в частности, при выборе формы тяговой характеристики следует исходить из условия постоянства касательной мощности локомотива в рабочем диапазоне скоростей движения. Однако, если принять условия $N_k = F_k V = const$, то для касательной силы тяги получим выражение $N_k = F_k / V = const / V$.

Условие $F_k v = const$ представляет собой уравнение гиперболы в координатах F_k и V . Таким образом, если тяговая характеристика тепловоза $F = f(v)$ будет иметь форму гиперболы (то есть если сила тяги обратно пропорциональна скорости - кривая 1-5 на рис. 3.1), касательная мощность локомотива будет постоянной при изменении скорости движения (см.рис. 3.2 прямая линия 1-5).

Эта зависимость касательной силы тяги от скорости и является идеальной формой тяговой характеристики автономного локомотива, энергосиловая установка которого ограничена по мощности (рис. 3.3,а). Такая характеристика на тепловозе теоретически обеспечивает возможность полного использования мощности дизеля в рабочем диапазоне скоростей движения. При проектировании тепловозов с различными типами передач перед конструкторами стоит задача наиболее полного приближения тяговой характеристики к идеальной

гиперболической

форме.

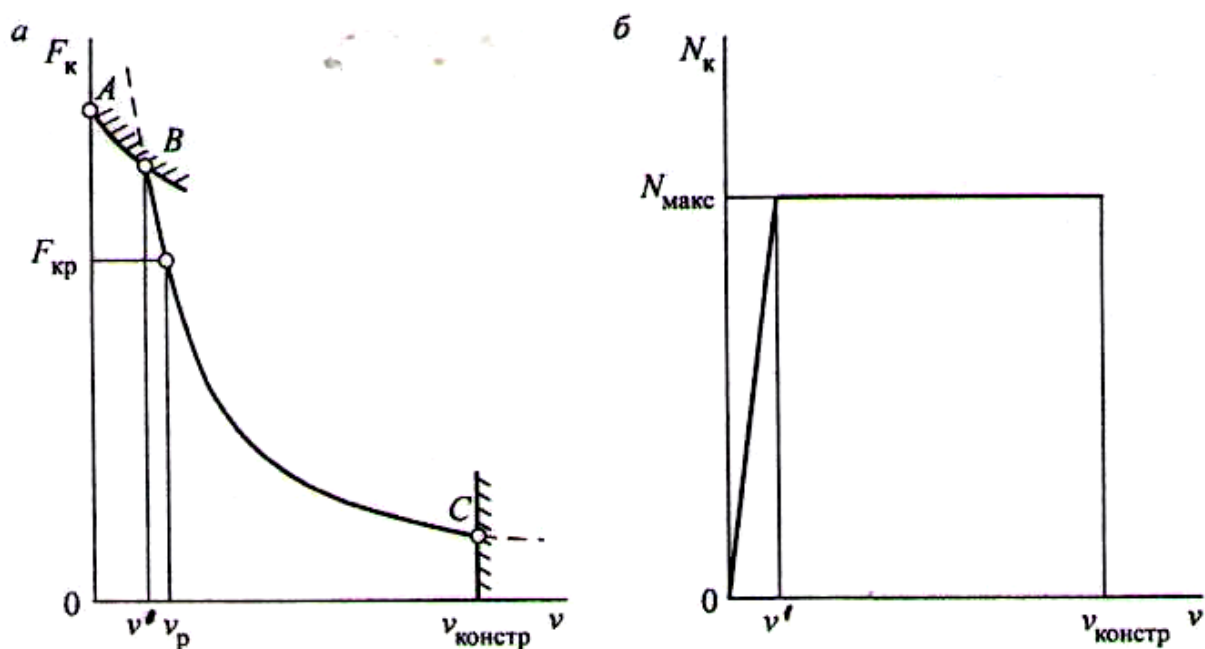


Рис. 3.3 Идеальная форма тяговой характеристики автономного локомотива: *а* — идеальная тяговая характеристика; *б* — зависимость тяговой (касательной) мощности локомотива от скорости движения при идеальной форме его тяговой характеристики

Максимальная величина скорости движения локомотива $V_{макс}$ ограничивается, прочностью его конструкции и называется конструкционной скоростью локомотива $V_{констр} = V_{макс}$. Это ограничение показано на характеристике вертикальной чертой.

Максимальная величина силы тяги ограничивается основным законом локомотивной тяги, опираясь на который, она определяется значениями расчётного коэффициента сцепления. Максимальное значение допускаемой силы тяги имеет место при трогании локомотива с места. Ограничение по величине силы тяги по условиям сцепления также показано на характеристике своего рода границей (линия АВ). Она не горизонтальна и снижается по мере роста скорости, так как уменьшается величина расчётного коэффициента сцепления.

Линия ограничения по сцеплению пересекается с гиперболической частью характеристики в точке В, которой соответствует величина скорости V^1 . Эту скорость, при которой происходит как бы перелом характеристики для паровозов, называли скоростью порога.

Таким образом, идеальная тяговая характеристика автономного локомотива состоит из двух частей: ограничение силы тяги по сцеплению АВ (диапазон скоростей от 0 до V^1) и участок гиперболы ВС – ограничение силы тяги по мощности энергосиловой установки (диапазон скоростей от V^1 до $V_{констр}$).

Так как гиперболической является только часть характеристики, то условие постоянства касательной мощности локомотива обеспечивается в диапазоне скоростей движения $V^1 - V_{констр}$ (рис.3.3.б). Этот диапазон можно назвать рабочим для локомотива.

В диапазоне скоростей движения от 0 до V^1 мощность энергосиловой установки локомотива из-за ограничения величины силы тяги по сцеплению полностью использована быть не может, а в самом начале координат (при $v=0$) она вообще равна нулю. Поэтому работа локомотива в этом диапазоне скоростей: является неэффективной и его можно считать нерабочим.

При проектировании локомотивов общепринятым является рабочий диапазон скоростей движения начинать со скорости V_p , которая несколько выше скорости V^1 , что вследствие случайности величины коэффициента сцепления предопределяет некоторую гарантию расчётной силы тяги $F_{кр}$ автономного локомотива. При этом скорость V_p , соответствующая расчётному значению силы тяги $F_{кр}$, называется скоростью движения на расчётном подъеме или, точнее, расчётной скоростью.

Чтобы говорить о графическом виде тяговой характеристики тепловозов следует рассмотреть ограничения силы тяги и мощности последних по дизелю, тяговой передаче, сцеплению движущих колёс с рельсами (изложено выше, лекция 2) и конструкционной скорости.

Сила тяги тепловоза по дизелю. В связи с тем, что энергетически неэффективно и экономически невыгодно конструировать дизели мощностью, соответствующей предельной тяговой характеристике по сцеплению и конструкционной скорости, необходимо знать ограничения по дизелю, на степень и характер которых при заданной мощности будут оказывать влияние параметры и режимы его работы.

Касательная мощность тепловоза N_k , приведенная к ободам движущих колёсных пар, может быть определена по формуле

$$N_k = m_D N_e \beta \eta_{пер} \quad (3.2)$$

где – M_D - число дизелей тепловоза, шт.

N_e - эффективная мощность дизеля , кВт

β - коэффициент, учитывающий затраты мощности на вспомогательные

агрегаты тепловоза;

$\eta_{пер}$ – коэффициент полезного действия передачи от дизеля до двигающих колёс тепловоза.

Также касательная мощность тепловоза N_k определяется при помощи параметров тяговой характеристики из следующего равенства

$$N_k = F_k V / 3,6 \quad (3.3)$$

где F_k - касательная сила тяги, кН; V - скорость движения, км/ч.

Приравняем выражения (9.2) и (9.3) и получим касательную силу тяги тепловоза по дизелю

$$F_k = 3,6 \frac{m_D \cdot N_e}{V} \beta \eta_{пер}. \quad (3.4)$$

Из анализа выражения (3.4) вытекает, что произведение касательной силы тяги F_k на скорость движения V - есть постоянная величина, т.е. $F_k V = \text{const}$ и в этом случае форма участка тяговой характеристики тепловоза,

как ограничение по дизелю, представляет собой кривую близкую к гиперболе.

Действительно коэффициенты $\beta = \text{const}$, $\eta_{\text{пер}} = \text{const}$ и эффективная мощность дизеля $N_e = f(\Pi_k) = \text{const}$, так как при фиксированной позиции Π_k контроллера машиниста рейки топливных насосов дизеля, находясь в одном и том же положении, обеспечивают постоянную подачу топлива (расход топлива на позиции $C_T = \text{const}$), а частота вращения коленчатого вала дизеля $n_c = \text{const}$, также не изменяется.

Основной характеристикой тепловозного дизеля является эффективная (на коленчатом вале дизеля) мощность N_e , которая может быть определена по следующей формуле

$$N_e = \frac{100}{3} \frac{P_e V_h Z n_c}{\tau} \quad (3.5)$$

где $100/3$ – коэффициент, зависящий от единиц измерения;

P_e – среднее эффективное давление, МПа;

τ – тактность дизеля;

Z – число цилиндров;

V_h – рабочий объём цилиндра тепловозного дизеля, M^3 .

После подстановки в выражение (9.4) получим формулу для определения касательной силы тяги по дизелю.

$$F_k = \frac{m_d V_h Z}{R} \cdot \frac{n_c}{V} P_e \beta \eta_{\text{пер}} \quad (3.6)$$

Здесь, $V_h = \frac{\Pi D}{4} S$ и $P_e = P_i \cdot \eta_m$

где D – диаметр цилиндра м;

S – ход поршня, м;

P_i – среднее индикаторное давление, МПа;

η_M - механический коэффициент полезного действия дизеля.

Так как перегрузочная способность дизеля в расчёт не принимается из-за её незначительной величины, поэтому в тяге поездов номинальная мощность дизеля соответствует его наибольшей мощности и которая задаётся родом службы и условиями эксплуатации тепловозов.

Кроме того, подача топлива на рабочий цикл дизеля и частота вращения его коленчатого вала определяют режим работы энергосиловой установки, а также силу тяги и скорость движения тепловозов.

Здесь уместно будет рассмотреть одно из основных свойств тепловозного дизеля, влияющее на тяговые свойства автономного локомотива.

Формула (3.5) показывает, что в реальных условиях эксплуатации возможно управлять работой дизеля, изменяя только два параметра – частоту вращения коленчатого вала дизеля n_c и среднее эффективное давление P_e . Таким образом, формула (9.5) можно представить как

$$N_e = C_1 p_e n_c$$

(3.8)

где - C_1 коэффициент, учитывающий влияние постоянных параметров на эффективную мощность дизеля, который определяется из выражения

$$C_1 = \frac{100V_h Z}{3\tau}$$

(3.9)

Однако, если допустить, что тепловозный дизель работает в неизменном режиме и расход топлива на позиции Π_k не изменяется ($G_T = const$), то, в этом случае, среднее эффективное давление имеет постоянное значение $P_e = const$.

Поэтому выражение (3.8) преобразуется в уравнение прямой, проходящей через начало координат, т.е.

$$N_e = C_2 n_c \quad (3.10)$$

где C_2 - постоянный коэффициент, равный $C_2 = C_1 P_e$.

Следовательно, при постоянной подачи топлива эффективная мощность дизеля прямо пропорциональна частоте вращения его коленчатого вала.

Тяговые характеристики тепловозов построены для стандартных (нормальных) атмосферных условий, отклонение температуры наружного воздуха и атмосферного давления от которых вызывает изменения весового заряда воздухом цилиндров среднего индикаторного давления и мощности дизеля. В таких случаях учитывают изменение касательной силы тяги тепловоза в зависимости от атмосферных условий и перестраивают тяговую характеристику по формуле

$$F_k = F_{ko} (1 - k_t - k_p) \quad (3.11)$$

где F_{ko} – сила тяги при стандартных (нормальных) атмосферных условиях;

k_t – коэффициент, учитывающий снижение мощности дизеля от изменения температуры наружного воздуха, $k_t = 0$ при $t_{\text{нв}} \leq 20^\circ\text{C}$;

k_p – коэффициент. Учитывающий снижение мощности дизеля от изменения атмосферного давления, $k_p = 0$ при $P_{бар} \geq 760$ мм. ртутного столба.

Температуру и давление атмосферного воздуха учитывают в расчетах исходя из статистических данных метеорологических станций прошедших лет (в среднем за последние пять лет). Вследствие суточных колебаний средняя температура определяется так

$$t_{нв} = (t_7 + 2t_{13} + t_{19})/4 \quad (3.12)$$

где t_7, t_{13}, t_{19} – соответственно, температуры атмосферного воздуха в 7, 13, 19 часов местного времени.

Сила тяги тепловоза по электрической передаче. При постоянстве мощности тепловозного дизеля N_e и частоте вращения его коленчатого вала N_e и частоте вращения его коленчатого вала n_c характер зависимости силы тяги тепловоза от скорости движения определяется типом тяговой передачи, т.е. специальными промежуточными устройствами, которые приспособливают упомянутый дизель к условиям работы на локомотиве.

Сила тяги по электрической передаче – это касательная сила тяги тепловоза, возникающая вследствие преобразования электрической энергии, которую вырабатывают тяговые генераторы, в механическую работу движущих колёсных пар.

Сила тяги тепловоза по электрической передаче определяется из условия равенства мощности тяговых генераторов $N_{Г}$ и касательной мощности тепловоза $N_{к}$ с учётом потерь в тяговых электродвигателях $\eta_{мэд}$ и редукторах $\eta_{ред}$.

У тепловозов с электрической передачей эффективная мощность дизеля N_e передаётся главному генератору, вырабатывающему электрическую энергию постоянного тока $I_{Г}$ напряжением $U_{Г}$. При расходе части эффективной мощности дизеля N_B , которая составляет (0,08...0,12) N_e , на привод вспомогательных устройств тепловоза

(компрессор, вентиляторы холодильника, охлаждение тяговых электродвигателей и др.) и коэффициенте полезного действия генератора η_{Γ} его мощность составляет

$$N_{\Gamma} = (N_e - N_B) \cdot \eta_{\Gamma} = U_{\Gamma} \cdot I_{\Gamma} \cdot 10^{-3} \quad (3.13)$$

Ток от главного генератора поступает к тяговым электродвигателям постоянного тока, которые при помощи зубчатой передачи связаны, с осями движущих колёсных пар. Мощность, развиваемая тяговыми электродвигателями на ободах движущих колёсных пар, равна

$$N_k = Z_{\Gamma} N_{\Gamma} \eta_{мэд} \eta_{ред} = Z_{\Gamma} U_{\Gamma} I_{\Gamma} 10^{-3} \quad (3.14)$$

Касательная мощность тепловоза

$$N_k = \frac{F_k V}{3600} \quad (3.15)$$

Из равенства выражения (8.14) и (8.15) получим силу тяги тепловоза по электрической передаче, т.е.

$$F_k = 3,6 Z_r \frac{U_{\Gamma} I_{\Gamma}}{V} \eta_{мэд} \eta_{ред} \quad (3.16)$$

где Z_{Γ} - число тяговых генераторов тепловоза, шт.

Касательная сила тяги, развиваемая одним из Z_D тяговых электродвигателей тепловоза, будет равна

$$F_k = 3,6 Z_{\Gamma} \frac{U_{\Gamma} I_{\Gamma}}{V Z_D} \eta_{мэд} \eta_{ред} \quad (3.17)$$

Таким образом, сила тяги тепловоза по электрической передаче зависит от напряжения и тока главного генератора, коэффициента полезного действия передачи и скорости движения тепловоза. При этом упомянутая

сила тяги будет изменяться обратно пропорционально скорости движения тепловоза - по гиперболе, так как произведение $F_k \cdot V = const$, что является очевидным и основывается на следующих суждениях.

Внешняя характеристика тягового генератора постоянного тока представляет собой зависимость напряжения U_Γ от силы тока нагрузки I_Γ при неизменной позиции контроллера машиниста, которая имеет гиперболический вид. Это необходимо для сохранения мощности тягового генератора постоянной в пределах всего диапазона рабочих скоростей движения тепловоза, т.е. $U_\Gamma I_\Gamma = const$, а также соответствия её, эффективной мощности на коленчатом валу дизеля. Реализацию этой цели осуществляют за счёт автоматического регулирования возбуждения тягового генератора путём получения им сигналов от специальной электрической аппаратуры – возбuditеля, благодаря чему достигается изменение напряжения U_Γ тягового генератора по гиперболической зависимости.

При движении поезда на различных элементах профиля пути постоянно происходит изменение скорости тепловоза, а в этой связи и тока I_d , потребляемого тяговыми электродвигателями, и также касательной силы тяги F_k на ободах движущих колёсных пар. Причём ток I_Γ тягового генератора также будет изменяться в зависимости от скорости тепловоза.

С уменьшением сопротивления движению поезда, сила тока I_d на тяговых электродвигателях будет уменьшаться, что приведёт, соответственно, к уменьшению тока I_Γ на тяговом генераторе, а последний, благодаря гиперболической зависимости $U_\Gamma = f(I_\Gamma)$, в свою очередь, вызовет увеличение напряжения U_Γ и тем самым сохранит мощность тягового генератора постоянной, т.е. $U_\Gamma I_\Gamma = const$. Поэтому отношение $F_k = const/V$ является гиперболой.

Кроме того, увеличение напряжения U_{Γ} приведёт, соответственно, к увеличению напряжения $U_{Д}$ тяговых электродвигателей и вследствие этого скорость тепловоза будет повышаться, а сила тока станет уменьшаться, препятствуя снижению скорости движения последнего.

Лекция № 4:

Тяговые и токовые характеристики тепловозов с электрической передачей. Тяговые характеристики тепловозов с гидравлической и механической передачей

План лекции

- 1. Типы тяговых передач локомотивов.**
2. Тяговые и токовые характеристики тепловозов с электрической передачей.
3. Построение тяговой характеристики тепловоза с электрической передачей.
4. Опытные тяговые характеристики тепловозов с электрической передачей.
5. Тяговые характеристики тепловозов с гидравлической и механической передачей.

В зависимости от способа преобразования и средств передачи энергии от дизеля к движущим колёсным парам и конструктивного исполнения на тепловозах можно применять следующие типы тяговых передач: непосредственные, газовые, механические, электрические и гидравлические.

Непосредственными называются передачи, позволяющие соединить кинематически вал дизеля и оси колёсных пар через зубчатые колёса и карданные валы т.е. непосредственно. У тепловозов с такой передачей сила тяги остаётся примерно постоянной во всём диапазоне изменения скоростей, так как крутящий момент на валу дизеля почти не зависит от частоты вращения его вала.

Газовые передачи – это системы устройств, предназначенные для передачи энергии от дизеля к движущим осям тепловоза при помощи газообразных тел (воздух, водяной пар или смеси, продукты сгорания топлива), позволяющие трансформировать вращающий момент и частоту вращения вала дизеля.

Механическими считают передачи, состоящие из отдельных механических звеньев – главной муфты и многоступенчатой коробки передач, позволяющие при переходе от ступени к ступени изменять передаточное отношение между валом дизеля и движущими колёсными парами, что ведёт к изменению крутящего момента и частоты вращения. Главная муфта (муфта сцепления) может быть фрикционной, электромагнитной и т.д.

Электрическими называют передачи, в которых тяговый генератор преобразует механическую энергию дизеля в электрическую, которая при помощи тяговых электродвигателей трансформируется опять в механическую и далее, через тяговый редуктор (пара зубчатых колёс различного диаметра) передаётся на движущие оси.

Гидравлическая передача – когда мощность дизеля передаётся движущим колёсным парам через жидкость (масло, вода), циркулирующую в замкнутом объеме (гидронасос → гидротурбина или гидромотор).

Характеристики тяговой передачи, во-первых, должны соответствовать по сцеплению колёс с рельсами и конструкционной скорости, роду службы локомотива, режимам наибольшей теплотехнической экономичности дизеля, устойчивой и надёжной работы при минимальном весе. А во-вторых, саморегулируемость передач должна обеспечить наиболее гибкую приспособляемость режима работы энергосиловой установки к переменному профилю пути с целью обеспечения наибольшей пропускной и провозной способности железных дорог при заданной мощности дизеля и наименьших затратах на единицу перевозок. Однако, в реальных условиях эксплуатации реализовать все требования невозможно, поэтому возникают ограничения касательной силы тяги по передаче.

Порядок построения расчетной тяговой характеристики тепловоза следующий. На внешней характеристике тягового генератора последова-

тельно задают значения напряжения, например $U_{Г}$ и соответствующее ему значение тока нагрузки $I_{Г}$. Зная схему соединения электродвигателей тепловоза, определяют величины $U_{тэд}$ и $I_{тэд}$. По электромеханической характеристике для значения тока двигателя $I_{тэд}$ с учетом степени ослабления магнитного потока определяют величины $M_{тэд}$, $\rho_{тэд}$, $\eta_{тэд}$, а затем рассчитывают значения силы тяги и скорости для данного режима работы тепловоза. На рис. 4.1, а представлена расчетная тяговая характеристика тепловоза с электрической передачей, построенная по электромеханическим характеристикам тяговых электродвигателей.

Расчетный режим работы тепловоза (точка «А» на тяговой характеристике) устанавливается из условий надежной работы силового оборудования вовремя движения с равновесной скоростью по самым трудным элементам профиля и полного использования мощности дизеля. Обычно расчетный режим тепловоза устанавливается по его тяговой характеристике для максимальной позиции контроллера машиниста на кривой и соответствует номинальному току, определяемому по внешней характеристике тягового генератора. Ограничение силы тяги тепловоза по сцеплению (кривая а—б на рис. 4.1, а) показано "штриховкой".

Зависимость касательной мощности $N_{К}$ от скорости движения V тепловоза с электрической передачей представлена на рис. 4.1,б. Заштрихованной площадью на рис 4.1, б отмечены потери касательной мощности $N_{К}$ тепловоза, вызванные несовершенством ступенчатой системы регулирования напряжения тяговых электродвигателей.

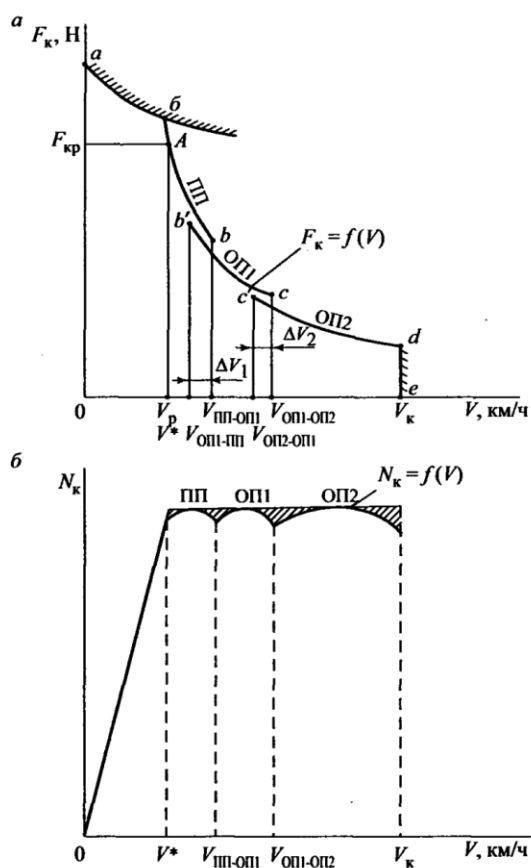


Рис. 4.1. Расчетные характеристики тепловоза с электрической передачей:

а — тяговая характеристика; б — кривая изменения касательной мощности

Как следует из рис. 4.1 электрическая передача постоянного тока по своим характеристикам почти идеально отвечает основным требованиям, предъявляемым к передаче тепловоза, так как позволяет достаточно в полном объеме реализовать мощность силовой установки в рабочем диапазоне скоростей локомотива.

При построении тяговой характеристики тепловоза с электрической передачей необходимо иметь в виду, что скорости прямых и обратных переходов с одной ступени ослабления магнитного потока на другую отличаются на 10—20 км/ч. Этим предотвращаются частые повторные включения и выключения контактов, предназначенных для переключения ступеней ослабления магнитного потока и тока возбуждения ТЭД при движении тепловоза в зоне переходов.

Тяговая характеристика тепловоза с электрической передачей на каждой позиции рукоятки контроллера машиниста состоит из трех кривых

$F_k = f(V)$, соответствующих полному полю возбуждения (ПП), первой ступени ослабления поля (ОП 1) и второй (ОП2).

На рис. 2.2 представлены опытные тяговые характеристики грузового тепловоза 2ТЭ 121. Эти характеристики представляют семейство кривых $F_k = f(V)$ для 15-ти позиций рукоятки контроллера машиниста. Каждому положению рукоятки контроллера машиниста (ПК) соответствует фиксированное значение частоты вращения коленчатого вала дизеля 2А-5Д49 от 350 об/мин на ПК1 до 1000 об/мин на ПК15, когда дизель каждой секции работает с номинальной мощностью 2200 кВт. Таким образом, прирост оборотов коленчатого вала дизеля 2А-5Д49 при перемещении рукоятки контроллера машиниста тепловозов 2ТЭ 121 на одно положение составляет примерно 43 об/мин.

На рис. 4.2 также показаны ограничения тяговых возможностей тепловоза 2ТЭ 121 (ПК1 5): по силе сцепления колес с рельсами — кривая а—б; по мощности дизеля — кривая б—с; максимальной (конструкционной) скорости движения — кривая с—d и характерные скорости этой серии тепловозов: — скорость выхода на автоматическое регулирование параметров движения; V_p —расчетная скорость движения (скорость длительного режима); точки 1,2,3,4 на тяговой характеристике соответствуют скоростям прямого и обратного переключений ступеней ослабления магнитного потока и тока возбуждения ТЭД.

При повышении скорости движения тепловоза включаются реле прямых переходов (переключений), при понижении — обратные.

Одним из важнейших показателей тяговой характеристики локомотива является его расчетная скорость движения V_p . Расчетная скорость — минимально допустимая по условиям обеспечения заданной надежности работы силового оборудования тепловоза с электрической передачей равномерная (равновесная) скорость движения, которая достигается при ведении поезда расчетного (критического) веса по наиболее трудному для преодоления элементу профиля. Такие элементы профиля для конкретных участков обращения локомотивов называют расчетные или руководящие подъемы.

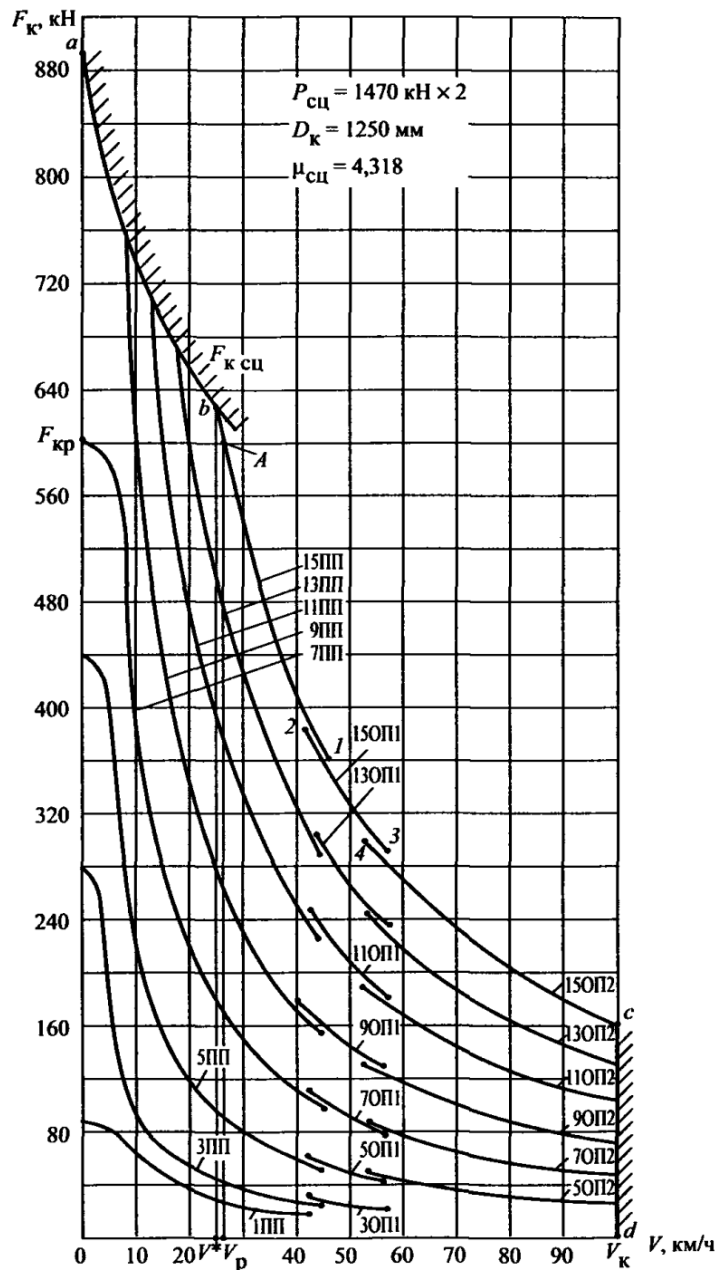


Рис. 4.2. Тяговые характеристики грузового тепловоза 2ТЭ 121

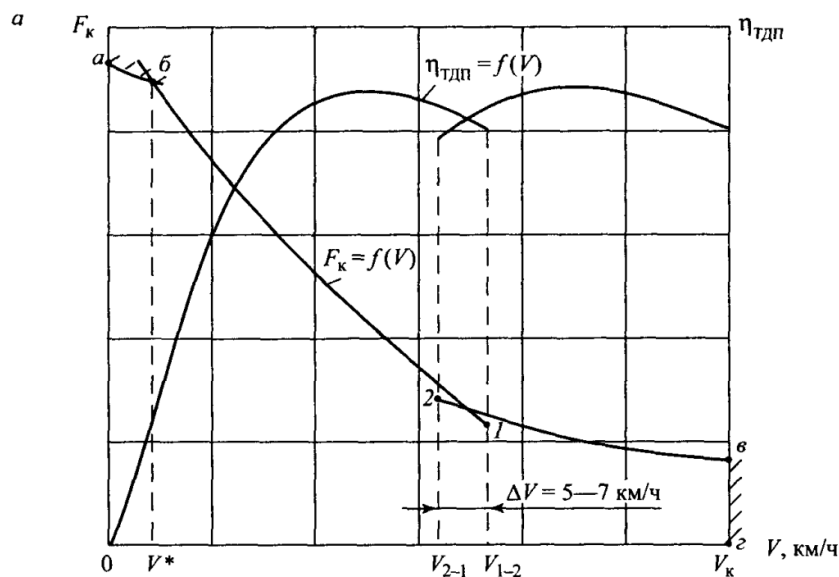
Режим работы тепловоза при расчетных значениях скорости V_p и силы тяги $F_{кр}$ (точка «А» на рис. 2.2) также называют расчетным. Величины $F_{кр}$ и V_p для конкретной серии тепловозов устанавливают опытным путем по результатам эксплуатационных испытаний локомотивов.

Снижение значения расчетной скорости V_p движения грузовых тепловозов - один из важных резервов повышения эксплуатационной эффективности тепловозной тяги. Так как тяговая характеристика тепловоза имеет вид гиперболической кривой, снижение величины V_p

локомотива позволит увеличить весовые нормы грузовых поездов при той же мощности силовой установки тепловоза. С другой стороны, выбор расчетной скорости в зоне ограничения силы тяги по условиям сцепления колес с рельсами (например, на кривой а—б рис. 4.2) приведет к снижению устойчивости работы тепловоза в зоне возможного боксования. Также при снижении величины V_p , возрастают токовые и температурные нагрузки на тяговые электрические машины тепловоза, что потребует применения в них более высоких классов изоляции (например, «Н») для обеспечения заданной эксплуатационной надежности.

Обычно расчетный режим работы тепловоза с электрической передачей находится на ограничении его тяговой характеристики по мощности дизеля при полном магнитном поле тяговых электродвигателей (кривая Б—в на рис. 4.2).

Расчетные характеристики тепловозов с гидравлической передачей приведены на рис. 4.3.



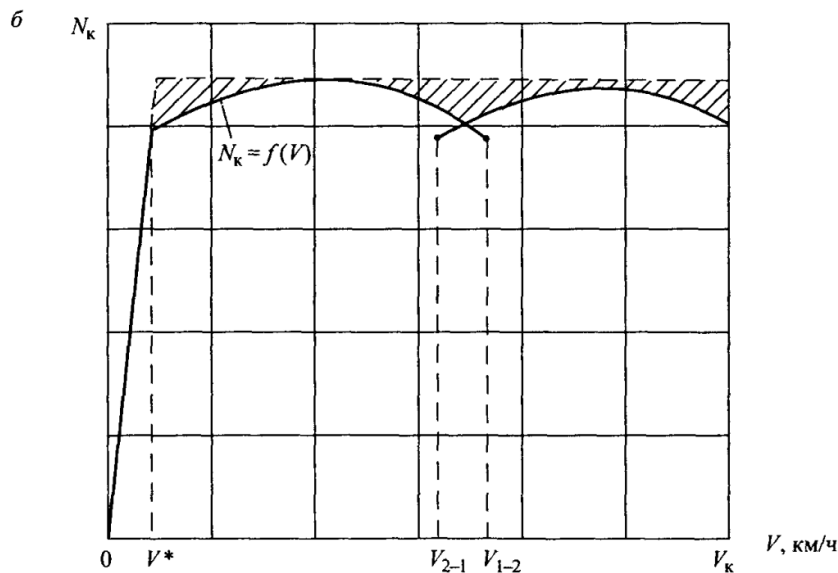


Рис. 4.3. Расчетные характеристики тепловоза с гидравлической передачей:

а — тяговая характеристика; б — кривая изменения касательной мощности

Механическая передача характеризуется жесткой кинематической связью между валом дизеля с колесными парами тепловоза. Принципиальная схема механической передачи показана на рис. 4.4., а на рис. 4.5 приведены расчетные характеристики тепловоза с механической передачей. Муфта сцепления 1 позволяет отсоединить вал дизеля от колесных пар в моменты пуска дизеля, реверсирования, при включении и переключении ступеней скорости. Многоступенчатый редуктор 2 является основным узлом механической передачи и предназначен для изменения величины касательной силы тяги и реверсирования тепловоза с механической передачей.

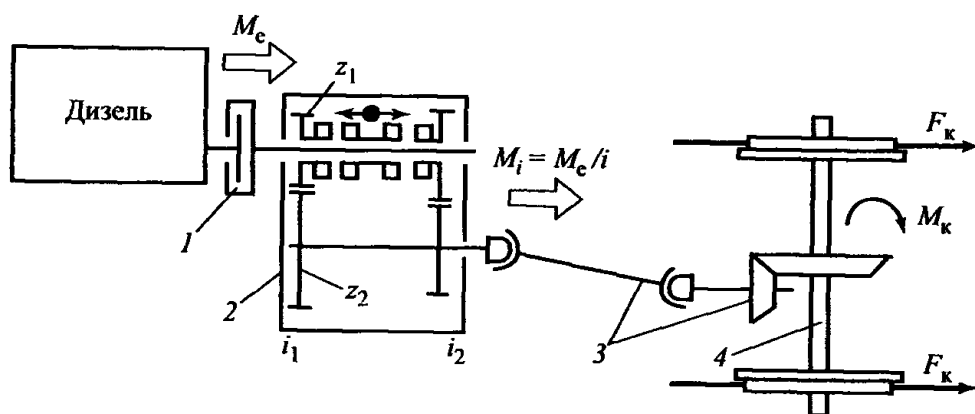


Рис. 4.4. Принципиальная схема механической передачи тепловоза

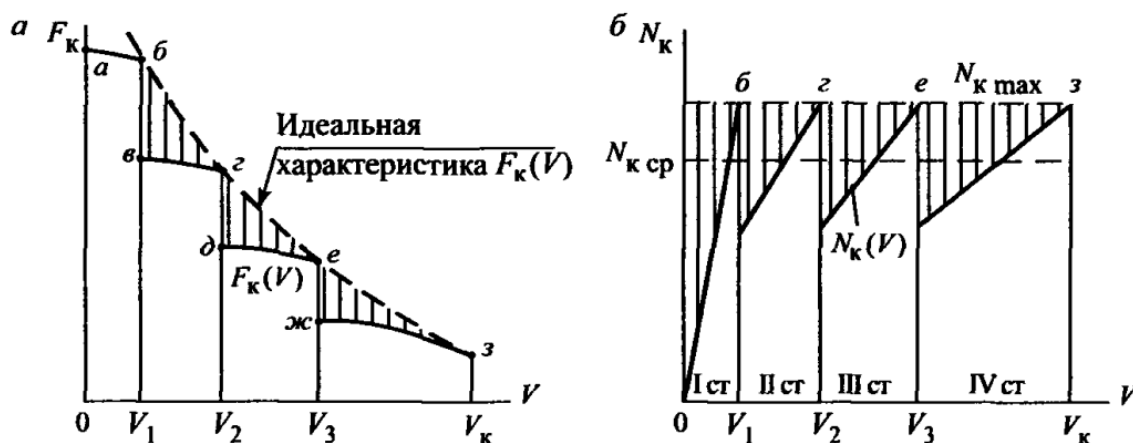


Рис. 4.5. Расчетные характеристики тепловоза с механической передачей:

а — тяговая характеристика; б—кривая изменения касательной мощности

К недостаткам этого типа передачи нужно также отнести то обстоятельство, что каждое переключение ступеней скорости передачи (при скоростях V_1, V_2, V_3, \dots , см. рис. 4.4, а) связано с полной потерей силы тяги в момент переключения. Это вызывает неизбежное замедление движения поезда, а также приводит к появлению значительных динамических нагрузок на элементы передачи, которые снижают надежность работы тепловозов в условиях эксплуатации.

Таким образом, механическая передача не позволяет полностью использовать мощность дизеля тепловоза, так как процесс переключения ступеней скорости связан с потерями (недоиспользованием) мощности дизеля и уменьшением касательной мощности на ведущих колесах локомотива (см. рис.4.5,б, заштрихованные площади).

Существенным недостатком механической передачи на тепловозе, особенно при больших мощностях и вращающих моментах, является жесткая непосредственная связь вала дизеля и ведущих осей локомотива, при которой все усилия и ускорения, возникающие между колесами и рельсами, воздействуют и на зубчатые колеса, валы и подшипники передачи, и на вал дизеля.

Механические передачи применяют на локомотивах малой мощности: автомотрисах, мотовозах, промышленных тепловозах, дизель- поездах.

Лекция № 5:

Тяговые и токовые характеристики электроподвижного состава

План лекции

1. Характеристики тяговых электродвигателей постоянного тока.
2. Тяговые характеристики электровозов постоянного тока.
3. Тяговые характеристики электровозов переменного тока

5.1. Характеристики тяговых электродвигателей постоянного тока

На электровозах и электропоездах постоянного и переменного тока применяют тяговые электродвигатели постоянного тока. Форма тяговых характеристик электроподвижного состава (э.п.с), в основном, определяется электромеханическими характеристиками тяговых электродвигателей (ТЭД), приведенных к валу двигателя, а именно:

$n_d=f(I_d)$ - частоты вращения якоря ТЭД от его тока при заданном напряжении питания от контактной сети $U_{кс}$;

$M_d=f(I_d)$ - вращающего момента на якоре ТЭД от тока;

$\eta_d=f(I_d)$ - к.п.д. тягового электродвигателя от тока якоря.

Электромеханические характеристики тяговых электродвигателей э.п.с. получают при стендовых испытаниях на заводе-изготовителе.

При тяговых расчетах электромеханические характеристики тягового электродвигателя обычно приводят к ободу колес колесной пары электровозов и электропоездов и получают электромеханические характеристики колесно-моторного блока [11]:

$V=f(I_d)$ - скорости движения колесной пары э.п.с. от тока якоря ТЭД;

$F_{кд}=f(I_d)$ - касательной силы тяги колесной пары э.п.с. от тока якоря ТЭД;

$\eta_э=f(I_d)$ - к.п.д. колесно-моторного блока э.п.с. от тока якоря ТЭД.

При пересчете электромеханических характеристик тяговых электродвигателей на характеристики колесно-моторных блоков используют следующие формулы:

- скорость движения колесной пары э.п.с, км/ч:

$$V = \frac{U_d - \sum r_{я}}{C\Phi} \quad (5.1)$$

где C - постоянный коэффициент для данной серии локомотива:

$C = C_8 \mu / (0,188 D_k)$, где C_8 — конструктивная постоянная тягового электродвигателя; μ — передаточное число тяговых редукторов колесной пары; D_k — диаметр колес колесной пары, м;

- касательная сила тяги на ободе колес колесной пары, Н:

$$F_{кд} = 3,6 C \Phi I_d - \Delta F, \quad (5.2)$$

где ΔF - потери силы тяги, вызванные магнитными и механическими потерями в колесно-моторном блоке, Н:

$$\Delta F = 3,6 (\Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{тр}}) / V,$$

где $\Delta P_{\text{магн}}$ - потери мощности в магнитной системе ТЭД, кВт; $\Delta P_{\text{мех}}$ - механические потери мощности в якорных подшипниках и щеточном аппарате ТЭД, кВт; $\Delta P_{\text{тр}}$ - потери мощности в тяговых редукторах колесной пары и моторно-осевых подшипниках ТЭД, кВт; V - скорость движения, км/ч;

- коэффициент полезного действия колесно-моторного блока э.п.с.

$$\eta_э = 1 - \Delta p_{п} / (100 \eta_d),$$

где $\Delta p_{п}$ - потери в тяговых редукторах и моторно-осевых подшипниках в процентах от подведенной мощности, %. Величина $\Delta p_{п}$ определяется по графикам $\Delta p_{п} = f(P_1)$ [12].

Необходимо отметить, что форма электромеханических характеристик тяговых электродвигателей и колесно-моторных блоков э.п.с. напрямую зависит от принятой системы возбуждения двигателей.

На рис. 5.1 представлены схемы основных систем возбуждения тяговых электродвигателей э.п.с: последовательного (рис. 9.4, а),

параллельного (рис. 5.1, б), смешанного возбуждения при согласном (рис. 9.4, в) и встречном (рис. 5.1, г) включении последовательной и параллельной обмоток и независимого возбуждения (рис. 9.4, д). Расчетные тяговые характеристики электровозов с тяговыми электродвигателями, имеющими вышеперечисленные системы возбуждения, приведены на рис. 5.5. Из кривых $F_K=f(V)$, представленных на рис. 9.2, следует, что тяговая характеристика электровоза с двигателями последовательного возбуждения (кривая 1) наиболее приближена к идеальной тяговой характеристике локомотива с электрическим приводом колесных пар (кривая 4) и позволяет наиболее полно использовать мощность тягового электродвигателя в эксплуатации. Тем не менее в зоне малых скоростей движения электровоза, когда тяговые электродвигатели работают при больших токах якоря I_d , наблюдается увеличение жесткости характеристик локомотива. Жесткость характеристик электродвигателей и электровоза в целом определяется темпом изменения силы тяги F_K от скорости V . Тяговые характеристики локомотивов называют жесткими при резком изменении функции $F_K=f(V)$ (например, кривая 2 на рис. 5.2) и мягкими при плавном изменении кривой $F_K=f(V)$.

В свою очередь, тяговые характеристики электровозов с электродвигателями параллельного, смешанного и независимого возбуждения имеют более высокую степень жесткости, чем при последовательном возбуждении.

Вышеперечисленные системы возбуждения тяговых электродвигателей обладают целым рядом достоинств, и недостатков и нашли практическое применение на различных сериях электровозов.

Так, для электровозов постоянного тока с контактно-реостатным управлением признано целесообразным [11] применение тяговых электродвигателей с системами последовательного или смешанного возбуждения с мягкими тяговыми характеристиками.

На электровозах переменного-постоянного тока и э.п.с. постоянного тока с импульсным регулированием предпочтительнее оказалось использование тяговых двигателей с независимым возбуждением и жесткими характеристиками.

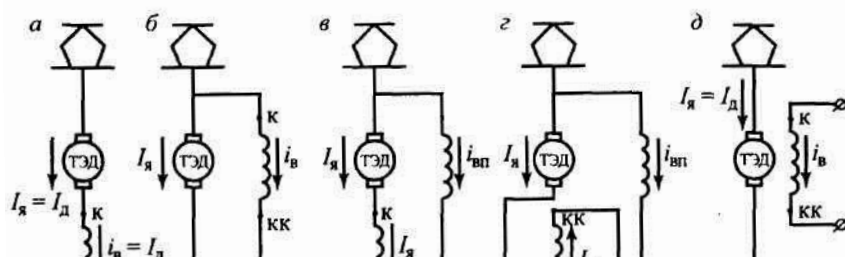


Рис. 5.1. Схемы систем возбуждения тяговых электродвигателей электроподвижного состава: а - последовательного; б - параллельного; в - смешанного при согласном включении обмоток; г - смешанного при встречном включении обмоток; д - независимого возбуждения

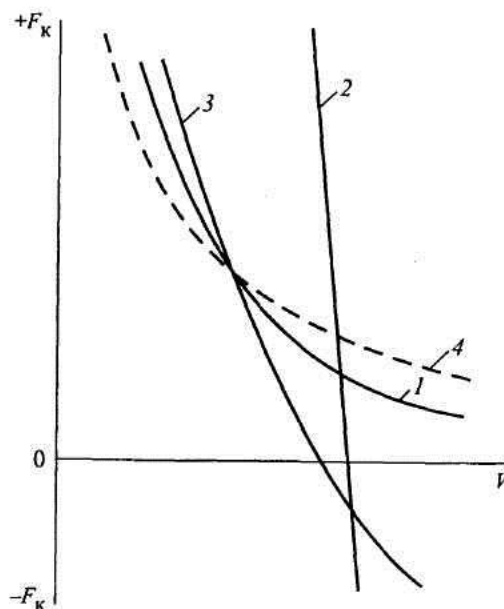


Рис.5.2. Расчетные тяговые характеристики электровозов с электродвигателями, имеющими разные системы возбуждения:

1 – при последовательном; 2 – при параллельном и независимом; 3 – при смешанном; 4 – идеальная характеристика с жесткими характеристиками.

Такие характеристики тяговых электродвигателей позволяют уменьшить интенсивность процессов боксования локомотива и, соответственно, увеличить критические веса водимых поездов. Широкое

применение силовых полупроводников на э.п.с. позволяет несколько сгладить серьезные недостатки независимого возбуждения ТЭД - сильный разброс токов нагрузки между параллельно работающими ТЭД локомотива и чувствительность к колебаниям напряжения в контактной сети.

Отметим, что эффективность тяги существенно зависит от следующих тягово-эксплуатационных свойств локомотивов:

- хорошее использования сцепного веса;
- устойчивость против боксования;
- высокая перегрузочная способность машин, обеспечивающая минимальный вес на единицу мощности;
- большая мощность в одной секции локомотива;
- широкий диапазон регулируемости, обеспечивающий наиболее полное использование мощности в разнообразных условиях эксплуатации при резкопеременных нагрузках и высоких скоростях;
- минимум ограничений использования мощности на всех режимах;
- простота управления;
- кроме этого, также широкий диапазон автоматического регулирования;
- наименьшие потери энергии в процессе регулирования и преобразования;
- отсутствие непроизводительных режимов работы оборудования.

Сравнительные испытания электровозов ВЛ80^Р с последовательным возбуждением тяговых электродвигателей и ВЛ80^{РН} с независимым возбуждением с поездами, проведенные ВНИИЖТом [13, 14], показали, что коэффициент тяги электровозов ВЛ80^{РН} на 8,4 % выше, чем ВЛ80^Р; во время разгона, т.е. в диапазоне высоких токовых нагрузок жесткость тяговых характеристик электровозов ВЛ80^{РН} и ВЛ80^Р сближается и их тяговые возможности почти не отличаются.

Тяговой характеристикой локомотива называется графическая зависимость касательной силы тяги локомотива от установившейся

скорости движения при различных режимах работы его энергосиловой установки с учетом ограничений по надежности, устойчивости и обеспечения безопасности движения.

5.2. Тяговые характеристики электровозов постоянного тока

На рис.5.3 приведены расчетные тяговые характеристики $F_k = f(V)$ (рис. 5.3, а) и кривая изменения касательной мощности восьмиосного грузового электровоза постоянного тока от скорости движения (рис. 5.3, б), из которых видно, что электровоз имеет три схемы соединения тяговых электродвигателей, на каждой из которых предусмотрено, кроме полного магнитного потока (ПП), четыре ступени ослабления магнитного потока двигателей (ОП1, ОП2, ОП3, ОП4).

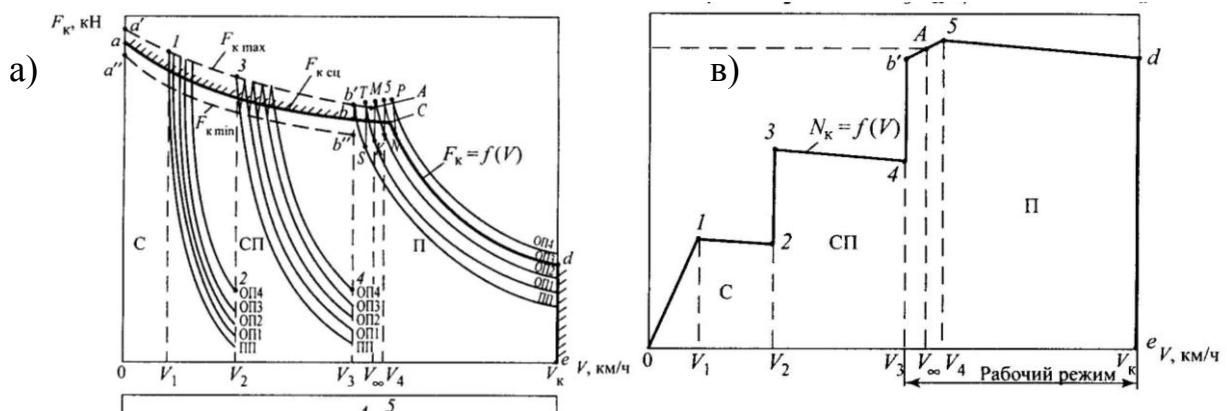


Рис. 5.3. Расчетные характеристики электровоза постоянного тока: а - тяговые характеристики; б - кривая изменения касательной мощности

На тяговой характеристике электровоза постоянного тока показаны ограничивающие линии тяговых возможностей локомотива: $a - b$ - по силе сцепления колес с рельсами; $a - c - d$ - по наибольшим значениям тока тяговых двигателей (по условиям нормальной коммутации); $d - e$ - наибольшим допустимым скоростям движения.

Разгон электровоза постоянного тока осуществляется с применением пусковых резисторов, при переходе с одной реостатной позиции на другую (их число достигает 37) возникают броски тока, а следовательно, резкое увеличение силы тяги в диапазоне от $F_{k \min}$ до $F_{k \max}$. Диапазон изменения силы тяги при работе электровоза на пусковых резисторах показан на рис. 9.6 штриховыми линиями $a'-b'$ и $a'' - b''$. Линия $a-b$ соответствует

расчетному значению силы тяги, ограниченной по сцеплению, которая определяется по эмпирическим формулам, приведенным в ПТР [15] для определенных серий локомотивов.

Бросками тока тяговых двигателей, а следовательно, касательной силы тяги, создаваемой колесами электровоза, сопровождаются также переключения ступеней ослабления магнитного потока двигателей ПП-ОП1-ОП2-ОП3-ОП4 (см. рис. 5.3, а).

В процессе выполнения тяговых расчетов не учитывают эти изменения силы тяги при переключении схем соединения тяговых электродвигателей и ступеней ослабления магнитного потока. Поэтому эти расчеты проводят используя параметры жирно выделенной линии *a-b-c-d-e* на тяговых характеристиках локомотива, соответствующей средним расчетным значениям изменения касательной силы тяги электровоза от скорости.

На тяговых характеристиках электроподвижного состава выделяют три основных режима работы локомотива: расчетный, часовой и длительный.

Расчетный режим и, соответственно, расчетная скорость V_p и касательная сила тяги $F_{кр}$ электровоза постоянного тока обычно соответствуют точке перехода с ограничения силы тяги по сцеплению на ограничение по току коммутации двигателей (точка «b» на рис. 5.3, а). По расчетному режиму работу электровоза определяют весовые нормы поездов и проводят основные тягово-энергетические расчеты по определению скорости движения и времени хода поезда по перегону и расходу электроэнергии на тягу поездов. При работе электровоза в часовом режиме ($V_p, F_{кр}$) обеспечивается эксплуатационная надежность его силового оборудования при движении локомотива по наиболее трудному элементу профиля с критическим (расчетным) весом состава в течение часа. Длительный режим работы электровоза (V_∞, F_∞) соответствует по значению расчетному режиму тепловоза с электрической передачей. Часовой и длительный режимы работы электровоза на его тяговой характеристике соответствуют параллельному соединению двигателей и ступени ослабления магнитного потока ОПЗ.

Касательная мощность P_k электровоза постоянного тока изменяется ступенчато (рис. 5.3, б). Разгон электровоза в диапазоне скоростей $0-V_2$

производится при серийном (последовательном) соединении тяговых двигателей и применении пусковых резисторов, в которых поглощается значительная часть мощности электрической энергии, поступающей из контактной сети. При скорости V_1 постепенно происходят автоматические переключения ступеней ослабления магнитного потока; из-за жесткости электромеханических характеристик тяговых электродвигателей происходит недоиспользование их мощности, поэтому касательная мощность N_k электровоза на участке V_1-V_2 несколько падает. При увеличении скорости электровоза производятся дальнейшие переключения схем соединения двигателей: вначале на серийно-параллельное «СП» ($V_2 - V_3$), затем на параллельное «П» (V_3-V_k). Падение касательной мощности в диапазонах скоростей $V_2 - V_3$ и V_4-V_k объясняется жесткостью характеристик двигателей. Практически все характерные скорости электровоза постоянного тока попадают на диапазон V_3-V_k , который считается рабочим (оптимальным) режимом их работы. Именно в рабочем диапазоне устанавливаются расчетная мощность и мощности часового и длительного режимов работы электровоза и реализуется установленная мощность тяговых электродвигателей.

Опытные тяговые характеристики электроподвижного состава постоянного тока получают в результате тягово-энергетических и тягово-эксплуатационных испытаний.

На рис. 5.4 приведены опытные тяговые характеристики двенадцатисекционного двухсекционного грузового электровоза ВЛ 15 с электродвигателями ТЛ-3 мощностью в длительном режиме работы 700 кВт каждый. На электровозе ВЛ 15 применяют три схемы соединения двигателей (С-СП-П) и четыре ступени ослабления магнитного потока (ОП1-ОП2-ОП3-ОП4), а также полное возбуждение (ПП) на каждой из схем соединения двигателей ТЛ-3. Каждой из ступеней ослабления магнитного потока соответствует своя тяговая характеристика электровоза. Сила тяги часового режима электровоза ВЛ15, соответствующая параллельному соединению двигателей и ступени ОП3, равна $F_{кч} = 675$ кН, скорость - $V_ч=46,0$ км/ч; сила тяги длительного режима $F_{к∞} = 620$ кН, скорость- $V_∞ = 47,0$ км/ч. Мощность на валах тяговых электродвигателей ВЛ 15 часового режима 9000 кВт, длительного – 8400 кВт.

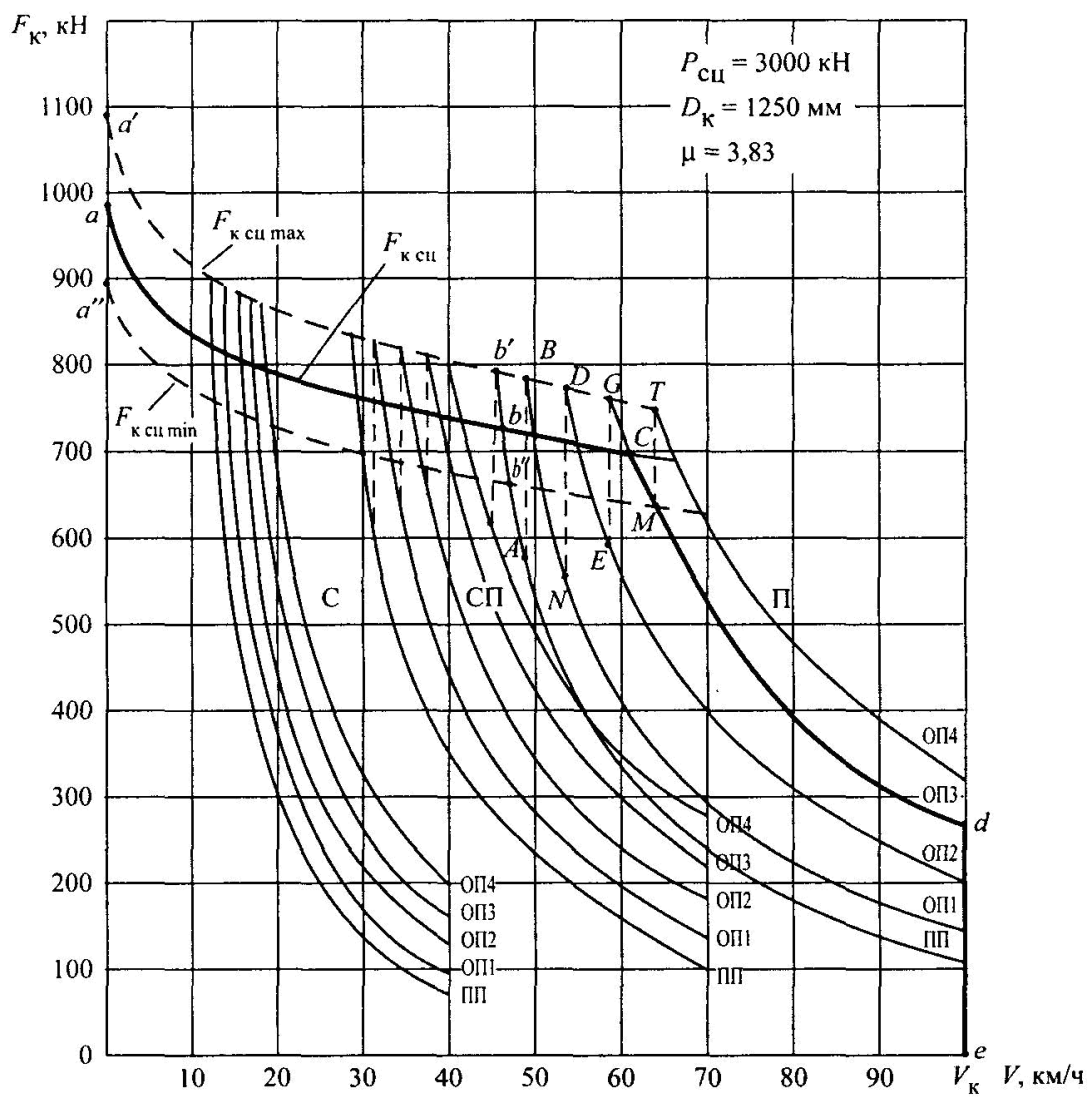


Рис. 5.4. Тяговые характеристики грузового электровоза ВЛ15 с электродвигателями ТЛ-3

На графиках $F_k = f(V)$ электровоза ВЛ15, представленных на рис. 5.4, отмечены следующие ограничения тяговых характеристик локомотива: кривая $a-b$ - по сцеплению колес с рельсами (расчетная зависимость); кривая $b-c-d$ - по току коммутации тяговых электродвигателей; $d-e$ - по максимальной скорости движения. На кривой $b-c-d$ также (рис. 5.4) отмечены точки, соответствующие часовому и длительному режимам работы электровоза ВЛ15.

Разгон электровоза ВЛ15 осуществляется с применением пусковых резисторов. Переходы с одной реостатной позиции на другую сопровождаются бросками тока двигателей, а следовательно, силы тяги электровоза от $F_{k\text{ сц min}}$ до $F_{k\text{ сц max}}$ (рис. 5.4). На тяговых характеристиках электровоза ВЛ15 диапазон этих колебаний величины $F_{k\text{ сц}}$ ограничен штриховыми линиями $a'-в'$ и $a''-в''$.

Переключения схем соединения тяговых электродвигателей ВЛ 15 (С-СП-П) и ступеней ослабления (ПП-ОП1-ОП2-ОП3-ОП4) также сопровождаются бросками тока и силы тяги локомотива. В качестве примера на рис. 9.7 изменения силы тяги при переключениях ступеней на параллельном соединении двигателей показаны штриховыми линиями $A-B$, $E-C$, $M-T$.

При выполнении тяговых расчетов принято не учитывать изменения силы тяги при переключениях схем соединения двигателей и ступеней, а использовать средние значения силы тяги ВЛ 15, выделенные на рис. 9.7 жирной линией $a-b-c-d-e$.

5.3. Тяговые характеристики электровозов переменного тока

На железнодорожных участках ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари» используется электрическая тяга переменного однофазного тока напряжением в контактной сети $U_{kc} = 25$ кВ и промышленной частотой 50 Гц. На электроподвижной состав переменного тока, работающий на переменном однофазном токе, устанавливают специальное оборудование для преобразования и регулирования напряжения и тока. В результате электроподвижной состав переменного тока имеет более сложную конструкцию по сравнению с э.п.с. постоянного тока. Наибольшее распространение получили локомотивы со статическими преобразователями и тяговыми электродвигателями постоянного (пульсирующего) тока.

На рис. 5.5 представлены расчетные характеристики электровоза переменного-постоянного тока. Тяговые характеристики электровоза со статическим преобразователем представляют семейство кривых $F_k = f(V)$, пропорциональное числу ступеней регулирования величины $U_{\text{тэд}}$, т.е. позиций рукоятки контроллера машиниста (ПК1...ПК33). На высшей (ПК33) позиции рукоятки контроллера машиниста каждой ступени ослабления магнитного потока НП-ОП1-ОП2-ОП3 также соответствует своя характеристика $F_k = f(V)$.

Поле возможных тяговых характеристик электровоза переменного-постоянного тока ограничивается следующими предельными кривыми (рис. 5.5, а: $a-b$ - ограничение по условиям сцепления колес с рельсами; $b-c$ - ограничение по допустимому току (току коммутации) тяговых электродвигателей; $d-e$ - ограничение по максимальной скорости движения).

Силовое оборудование электроподвижного состава переменного-постоянного тока рассчитывают из условий надежной работы на следующих основных режимах: расчетный (V_p), часовой (V_4) и длительный (V_∞). Эти режимы соответствуют тяговой характеристике $F_k = f(V)$ локомотива на высшей (ПК33) позиции рукоятки контроллера машиниста и ступени нормального магнитного потока НП (рис. 5.5, а).

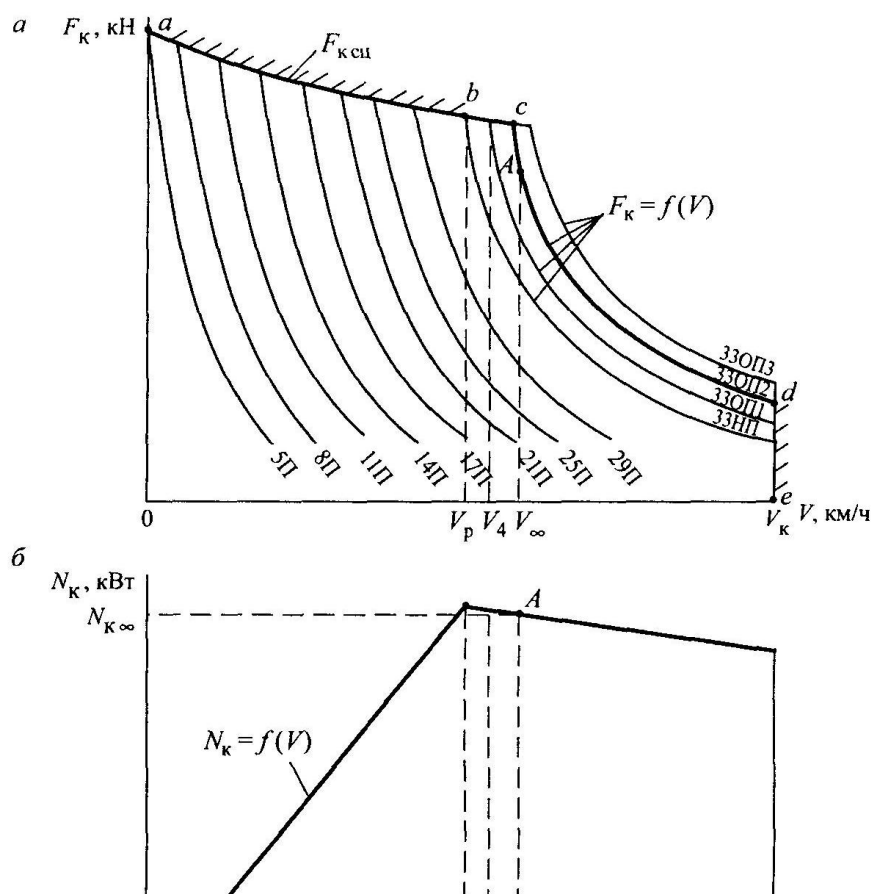


Рис. 5.5. Расчетные характеристики электровоза переменного-постоянного тока:

а - тяговая характеристика; б - кривая изменения касательной мощности

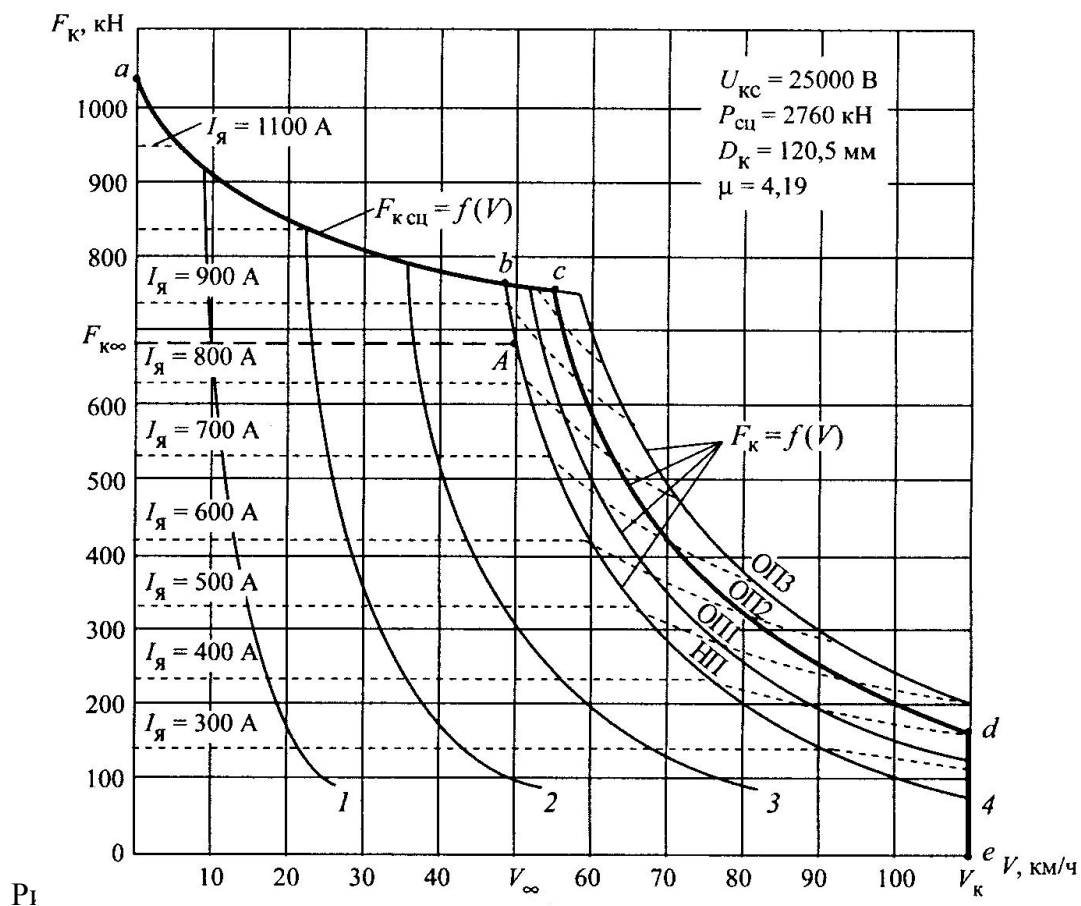
По расчетному режиму работы электровоза переменного-постоянного тока (точка «в» на кривой $F_k = f(V)$ - см. рис. 5.5, а) устанавливают весовые нормы поездов для конкретных участков обращения локомотивов и проводят тяговые расчеты по определению скорости движения и времени хода поезда по перегону.

Касательная мощность N_k электровоза переменного-постоянного тока изменяется (см. рис. 5.5, б) пропорционально росту напряжения $U_{тэд}$ на тяговых электродвигателях и, соответственно, увеличению коэффициента трансформации тягового трансформатора. При наборе позиций контроллера машиниста с ПК1 до ПК32 касательная мощность N_k электровоза возрастает ступенчато, однако на рис. 5.5, б это изменение касательной мощности N_k в функции скорости показано в виде линейной зависимости $N_k = f(V)$, построенной для удобства по средним значениям касательной мощности. Максимальная мощность $N_{k \max}$ электровозом переменного-постоянного тока может быть реализована лишь при расчетной скорости V_p , т.е. при наборе наибольшей позиции рукоятки контроллера машиниста ПК33. В диапазоне $V_p - V_k$ касательная мощность N_k электровоза несколько уменьшается, что объясняется потерями мощности при переходах НП-ОП1-ОП2-ОП3 и жесткостью характеристик тяговых электродвигателей с последовательным возбуждением. Часовой ($V_ч$) и длительный (V_∞) режимы работы электровоза переменного-постоянного тока соответствуют рабочему диапазону. При сравнении тяговых качеств электровозов переменного-постоянного тока с тепловозной тягой целесообразно использовать скорость V_∞ и силу тяги $F_{k\infty}$ длительного режима электровоза и расчетные параметры тепловоза.

На рис. 5.6. представлены тяговые характеристики $F_k = f(V)$ грузового электровоза ВЛ85 на 1,2,3 и 4-й зонах регулирования (при полностью открытых тиристорах) и трех ступенях ослабления магнитного

потока НП-ОП1-ОП2-ОП3. На электровозе применено параллельное соединение тяговых электродвигателей. В случае боксования колесной пары уменьшается сила тока I_d связанного с ней тягового электродвигателя и ток нагрузки преобразователя, а это приводит к увеличению напряжения на «боксующем» колесно-моторном блоке, что в итоге препятствует развитию процесса боксования локомотива.

Поэтому у электровоза ВЛ85 использование силы сцепления при трогании с места и разгоне существенно выше, чем на э.п.с. постоянного тока при последовательном соединении тяговых электродвигателей. На электровозе ВЛ85 применена система управления по двум параметрам: току и скорости. Одной рукояткой управления машинист может задать значения пускового тока от 300 до 1100 А (на рис. 5.6 значения пускового тока отмечены штриховыми линиями), другой – скорость, при достижении которой ускорение поезда прекращается. На графиках $F_k = f(V)$ электровоза ВЛ85 отмечены следующие ограничения силы тяги: кривая $a-b$ - по сцеплению колес с рельсами; $b-c-d$ - по току коммутации тяговых электродвигателей; $d-e$ - по максимальной скорости движения. На кривой $F_k = f(V)$, соответствующей четвертой зоне регулирования и нормальному магнитному потоку НП, отмечены точки расчетного (V_p), часового ($V_ч$) и длительного (V_∞) режимов работы электровоза. Как отмечалось ранее, длительный режим работы электровоза ВЛ85 ($V_\infty = 50$ км/ч; $F_{k_\infty} = 675$ кН) соответствует расчетному режиму магистрального тепловоза.



Контрольные вопросы

1. Тяговые и токовые характеристики электровозов и их сущность.
2. Что такое переходный режим работы локомотивов.
3. Перечислите основные тягово – эксплуатационные свойства электроподвижного состава.
4. Приведите тяговую характеристику электровозов постоянного тока и дайте необходимые пояснения к ней.
5. Приведите тяговую характеристику электровозов переменного тока и дайте необходимые пояснения к ней.
6. Приведите опытные тяговые характеристики электроподвижного состава.

Литература

1. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. – М.: Маршрут, 2005, 448с.
2. Деев В.В. и др. Тяга поездов. - М.: Транспорт, 1987, 264с.
3. Подвижной состав и тяга поездов. Под. ред. В.В. Деева и Н.А. Фуфрянского. – М.: Транспорт, 1979, 368с.

Лекция № 6:

Силы сопротивления движению поезда

План лекции

1. Классификация сил сопротивления движению.
2. Основное сопротивление движению.
3. Дополнительное сопротивление движению поезда.
4. Пути снижения сопротивления движению поездов.

6.1. Классификация сил сопротивления движению

Работа касательной силы тяги, создаваемой при взаимодействии движущихся колес локомотива с рельсами, преимущественно затрачивается на преодоление внешних сил, препятствующих движению поезда. Природа и причины возникновения, а также величина этих внешних сил различны. Многие внешние силы случайны, многие взаимосвязаны по физике явления. Неуправляемые внешние силы, направленные в сторону противоположную направлению движения поезда и, следовательно, препятствующие его движению, называются действительными силами сопротивления движению.

В теории локомотивной тяги принято оценивать результирующую всех неуправляемых внешних сил сопротивления движению поезда. В соответствии с этим сопротивлением движению поезда называют эквивалентную силу, приложенную в зонах (точках) касания колес с рельсами, на преодоление которой затрачивается такая же работа, как на преодоление всех неуправляемых действительных сил, препятствующих движению.

Силы сопротивления движению подвижного состава обозначают буквой W .

Классификация сил сопротивления основана на их разделении по следующим признакам с соответствующими обозначениями.

Классификация сил сопротивления по отношению к весу подвижного состава:

- полное сопротивление - W , Н;
- удельное сопротивление - w , Н/кН.

Полное сопротивление W представляет собой сопротивление движению поезда или единицы подвижного состава в целом.

Удельное сопротивление w - сила сопротивления, в Н, движению каждой единицы веса поезда, в кН. Удельные силы сопротивления движению широко используются при выполнении тяговых расчетов.

Классификация сил сопротивления по условиям эксплуатации:

- основное сопротивление – W_0 , w_0 ;
- дополнительные сопротивления - $W_{\text{доп}}$, $w_{\text{доп}}$;
- добавочное сопротивление при трогании с места - $W_{\text{тр}}$, $w_{\text{тр}}$;
- общее сопротивление – W_k , w_k .

За основное сопротивление принимают те силы, которые препятствуют движению подвижного состава по прямому горизонтальному пути на открытой местности при нормальных метеоусловиях с любой допустимой по безопасности движению скоростью.

Необходимо отметить, что в теории локомотивной тяги движение всех единиц подвижного состава, в том числе локомотивов, описывается одним и тем же уравнением движения повозки. Наличие на локомотивах тяговых электродвигателей и зубчатых тяговых передач, а также механических трансмиссий на тепловозах с гидropередачами делает основное сопротивление движению локомотивов отличным от вагонов. На величину основного сопротивления движению также существенное влияние оказывает режим работы локомотива в эксплуатации.

В этой связи дополнительно различают силы основного сопротивления в зависимости от режима работы локомотива (тягового режима или холостого хода):

- основное сопротивление движению поезда с локомотивом, работающим в режиме тяги, - W_0, w_0 ;

- основное сопротивление движению поезда с локомотивом, работающим в режиме холостого хода, - $W_{ох}, w_{ох}$.

Основная физическая природа основного сопротивления – силы механического трения.

Основное сопротивление всегда сопутствует движению подвижного состава; при любых условиях его эксплуатации величина W_0 не может быть равна нулю.

Дополнительные сопротивления - временно действующие силы, возникающие в конкретных условиях эксплуатации подвижного состава, например при движении по уклону профиля пути, в кривой, в тоннелях и прочее.

Добавочное сопротивление возникает при трогании с места единиц подвижного состава. Это сопротивление ограничено по времени действия, его физическая природа и причины возникновения заметно отличаются от сил основного сопротивления. По этим и ряду других причин добавочное сопротивление при выполнении тяговых расчетов учитывается отдельно.

Общее сопротивление движению подвижного состава представляет собой алгебраическую сумму основного, дополнительных и добавочного сопротивлений.

Классификация сил сопротивления по типу подвижного состава:

- сопротивление движению локомотива - вводится один штрих вверху W', w' ;

- сопротивление движению состава (вагонов) - вводятся два штриха вверху - W'', w'' ;

- сопротивление движению поезда - штрихи не применяются - W, w ;

6.2. Основное сопротивление движению

Основное сопротивление движению представляет собой сумму всех сил, препятствующих движению на прямых горизонтальных участках

пути, и возникает в результате взаимного трения деталей подвижного состава, сопротивления от взаимодействия пути и подвижного состава, а также сопротивления воздушной среды при отсутствии ветра и диссипации энергии в окружающую среду.

Сопротивление от взаимного трения деталей подвижного состава прежде всего зависит от силы трения в буксовых подшипниках колесных пар и определяется типом и состоянием подшипников, качеством и количеством смазки, температурой наружного воздуха (влияет на вязкость смазки), скоростью движения поезда и нажатием подшипника на шейку оси. В роликовых буксовых подшипниках вместо трения скольжения действует трение качения, что обеспечивает значительное уменьшение сил трения; следует учитывать, что сила нажатия на буксовую шейку оси колесной пары электровоза превышает 10 кН, а у полностью груженых вагонов достигает 9 кН. (В тяговых расчетах используются единицы физических величин, принятые в ПТР; следует учитывать, что 1 тс = 9,81 кН; 1 кгс = 9,81 Н).

Внутреннее сопротивление движению электровоза обусловлено также трением зубчатой передаче, якорных и моторно-осевых подшипниках, между щетками и коллекторами тяговых двигателей и т.п. Внутреннее сопротивление уменьшается при правильном уходе и исправном состоянии этих узлов.

Сопротивление от взаимодействия пути и подвижного состава возникает в результате трения качения и трения скольжения между колесами и рельсами. При большой твердости материала колес и рельсов они меньше вдавливаются друг в друга и трение качения уменьшается; применений бесстыкового пути и рельсов более тяжелого типа также уменьшает это трение. Трение скольжения между колесом и рельсом возникает при неравенстве диаметров колес одной колесной пары, соприкосновении гребней бандажей с боковыми гранями головок рельсов и поперечном скольжении во время виляния тележек. Чем выше скорость, тем больше препятствуют движению эти явления.

Необходимо учитывать также толчки от набегания колес на торцы рельсов на стыках, крестовинах стрелочных переводов. Это сопротивление может быть снижено улучшением содержания полотна железной дороги и рельсов, а также увеличением длины рельсов. Неровности рельсов или

бандажей колес (выбоины, овальность) также увеличивают сопротивление движению, так как при вертикальном перемещении ходовых частей часть энергии локомотива поглощается деталями рессорного подвешивания как самого электровоза, так и вагонов; кроме того, имеются потери энергии в обрешиненных деталях поводков букс.

Сопротивление воздушной среды вызывается давлением воздуха на лобовую поверхность подвижного состава, разрежением воздуха за задней торцевой стенкой каждого вагона и трением поверхности подвижного состава о воздух. На значение этого сопротивления наибольшее влияние оказывают скорость движения поездов, форма вагонов и локомотива.

Кинетическая энергия движущегося поезда частично поглощается упругими элементами конструкции подвижного состава и рассеивается в окружающую среду, на восполнение потерь которых затрачивается работа силы тяги локомотива.

Движение поезда сопровождается как вертикальными колебаниями подрессоренной части и подвижного состава, так и рывками по длине поезда.

Вертикальные колебания движущегося подвижного состава обусловлены двумя основными источниками кинематического возмущения: геометрическими неровностями рельсового пути, круга катания колес и неравноупругостью пути.

Продольные динамические силы, действующие в составе и приводящие к рывкам по длине поезда, возникают из-за большой разницы в весе вагонов состава, смены режима ведения поезда, изменения профиля пути железнодорожных участков и ряда других причин. Наличие зазоров в автосцепках приводит к разному мгновенному ускорению вагонов одного состава: выравнивание скорости всех вагонов происходит за счет работы поглощающих аппаратов автосцепок, в которых энергия поезда безвозвратно теряется.

Выделим основные причины возникновения диссипации энергии в окружающую среду:

- движение вагонов сопровождается вертикальными колебаниями их подрессоренной части, энергия которых гасится в элементах рессорного подвешивания (гасителях колебаний, рессорах и т.д.);

- различия в мгновенных ускорениях и замедлениях вагонов со-става приводит к появлению в поезде продольных динамических сил, энергия которых гасится поглощающими аппаратами автосцепок и амортизаторами упругой площадки пассажирских вагонов;

- упругие связи букс с тележками подвижного состава также поглощают энергию движущегося поезда.

Мероприятия по уменьшению основного сопротивления движения: полная загрузка вагонов; правильное формирование составов (сосредоточение однотипных вагонов по группам – полувагонов, платформ и т.п.); закрытие дверей и люков, улучшающее обтекание вагонов воздухом; устранение трения тормозных колодок о колеса; улучшение состояния верхнего строения пути; сокращение времени стоянок, облегчающее трогание составов с места, особенно в зимнее время.

Перевод половины парка грузовых вагонов на роликовые буксовые подшипники только на электрифицированных участках железных дорог дает экономию электроэнергии до 1,5 млрд. кВт · ч в год.

Полное основное сопротивление движению поезда W_o складывается из основных сопротивлений движению локомотива W_o' , и состава W_o'' т.е.

$$W = W_o' + W_o'' .$$

6.3. Дополнительное сопротивление движению поезда

Это сопротивление возникает при движении в кривых, по уклонам, при низкой температуре наружного воздуха и сильном встречном и боковом ветре.

Для уменьшения дополнительного сопротивления движению смягчают профиль пути, увеличивают радиусы кривых, смазывают боковые поверхности головок наружных рельсов в кривых или; гребни бандажей специальной смазкой, закрывают двери грузовых вагонов, пассажирские вагоны скоростного движения выполняют более обтекаемой формы. Сопротивление от крутизны уклона i определяют как отношение разности высот (от горизонтальной линии) начала и конца уклона (МН) к длине участка (М0), на котором расположен уклон (рис. 3.1), т.е. $i = МН/М0$. Разность высот принято выражать в метрах, а длину - в кило

метрах; тогда уклон i будет выражен в тысячных долях (условный знак ‰). Например, на участке протяженностью 5 км путь поднимается на 50 м; при этом $i = 50/5 = 10‰$. Сила тяжести вагона P по правилам механики может быть разложена на две составляющие: силу P_2 , прижимающую вагон к рельсам и силу P_1 , направленную против силы тяги F ; учитывая, что при малом угле $\angle HMO$ длины HO и MO почти равны, то по правилам геометрии можно записать: $\frac{P_1}{P} = \frac{MH}{MO}$.

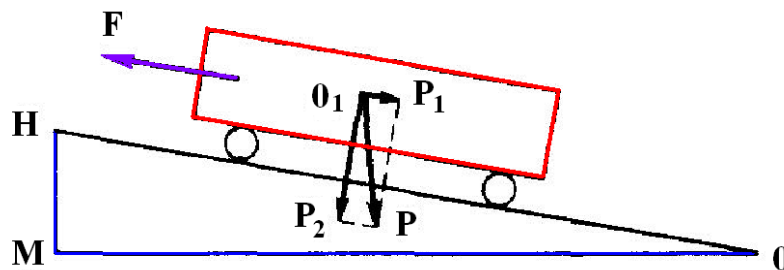


Рис. 6.1. - Схема сил, действующих на вагон на уклоне

Отрезок P_1 - это сила сопротивления движению W_i вызванная притяжением Земли, поэтому отношение $P_1/P = W_i/P$ представляет собой удельное сопротивление движению от уклона w_i ; отношение MH/MO есть уклон i ; следовательно, $w_i = i$, т.е. этим доказано, что дополнительное сопротивление от уклона (H/kH) численно равно крутизне уклона в тысячных.

При движении по кривым участкам пути под действием силы инерции гребни бандажей колесных пар прижимаются к боковой поверхности головки наружного рельса, что приводит к возникновению трения между ними. При большой кривизне пути, малом поперечном разбеге колесных пар в трехосных тележках не только концевые колесные пары прижимаются к наружному рельсу, но и средние (2-я и 5-я) к внутреннему рельсу. Кроме того, возникают дополнительные усилия в опорах кузовов и ударно-тяговых приборах как у локомотивов, так и у вагонов. Все это вызывает дополнительное сопротивление движению в кривой. Удельное сопротивление движению по кривой рассчитывают по опытной формуле $w_r = 700/R$, где R - радиус кривой, м. Для подсчета сопротивления w_r , поезда, длина которого превышает длину кривой, используют более сложную формулу.

Встречный или боковой ветер вызывает дополнительное сопротивление движению, особенно возрастающее при высоких скоростях; попутный ветер способствует повышению скорости движения. Боковой ветер, прижимая гребни колес к рельсам, приводит к значительному увеличению сопротивления движению, особенно вагонов, следующих с открытыми дверями и люками.

На участках с постоянными ветрами сопротивление, создаваемое ими, учитывают при тяговых расчетах. Сопротивление в этом случае задается в процентах от основного удельного сопротивления движению. Например, при скорости ветра 8 м/с и скорости движения 80 км/ч удельное сопротивление от ветра следует принять равным 10% основного сопротивления. Перечень участков, на которых учитывается действие ветра, утверждается ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари».

Сопротивление движению от низкой температуры наружного воздуха возрастает в основном за счет повышения вязкости смазки в узлах трения. Его учет рекомендуется производить при температурах ниже - 25°C в процентах от основного сопротивления движению; например, для грузовых вагонов при скорости 80 км/ч и температуре воздуха - 30 °C это повышение сопротивления принимается равным 7%.

Кроме рассмотренных разновидностей дополнительных сопротивлений движению, в расчетах иногда приходится учитывать сопротивление движению при трогании поездов с места, а у пассажирских поездов и сопротивление от действия подвагонных генераторов.

Повышение сопротивления при трогании поезда с места объясняется тем, что за время стоянки смазка в буксах между прижатыми деталями вытесняется в свободное пространство в буксах, остывает, что приводит к повышению ее вязкости, особенно при низких температурах атмосферы, а также тем, что коэффициент трения покоя всегда больше коэффициента скольжения. Длительная стоянка поезда зимой значительно повышает сопротивление движению при трогании.

Дополнительное сопротивление движению от подвагонных генераторов в пассажирских поездах учитывается при скоростях свыше 20 км/ч, когда к ним подключаются электрические потребители вагонов.

При тяговых расчетах вводят понятие «фиктивный подъем», т.е. считают, что удельное сопротивление от кривой w_r можно сложить с сопротивлением от уклона w_i , а именно: $w_d = w_i + w_r$.

6.4. Пути снижения сопротивления движению поездов

Железнодорожный транспорт является одним из крупнейших потребителей топливно-энергетических ресурсов. Уменьшение сопротивления движению снижает расход энергии на тягу поездов и поэтому существенно влияет на повышение эффективности работы железных дорог.

Все мероприятия по уменьшению сопротивления движению поездов можно разделить на три группы [10].

I. Организационно-технические.

II. Технические (конструктивные).

III. Организационные.

К первой группе относятся:

1. Повышение статической нагрузки грузовых вагонов q_o .

Из расчетных эмпирических формул по определению удельного основного сопротивления движению четырехосных грузовых вагонов следует, что величина w_o'' уменьшается при увеличении статической нагрузки q_o .

Следовательно, перевозить порожние вагоны по железным дорогам с позиции энергетики тяги невыгодно.

Достичь полной загрузки вагонов удастся при перевозке насыпных грузов (руда, уголь, песок и т.д.) в полувагонах.

Тем не менее, по железным дорогам перевозятся в вагонах и грузы с небольшой плотностью, например хлопок, бытовая техника и др.

2. Уменьшения порожнего пробега вагонов.

Универсальным показателем качества работы железных дороги использования подвижного состава является оборот вагона. Оборот вагона - время от одной погрузки до следующей погрузки в тот же вагон.

Многие годы этот качественный показатель почти не меняется и составляет 6 суток. Сократив оборот, можно ту же работу выполнить числом вагонов и, главное, уменьшить продолжительность перевозки самих грузов, что чрезвычайно Выгодно для клиентов железных дорог.

Ко второй группе можно отнести:

1. Снижение тары вагонов за счет применения в их конструкции более легких материалов и сварных соединений. При уменьшении тары повышается грузоподъемность вагона и сокращаются затраты на тягу поездов.

2. Замена в четырехосных грузовых вагонах буксовых подшипников скольжения на подшипники качения дает значительный экономический эффект за счет снижения энергозатрат и расходов на текущее содержание и ремонт вагонов. Наибольший эффект от такой замены получают при трогании с места и разгоне грузового поезда.

3. Смягчение плана и профиля пути, т.е. увеличение радиуса кривых участков пути и уменьшение крутизны расчетных подъемов, а также «вредных» спусков, на которых машинисту приходится применять регулировочное торможение и тем самым терять ранее накопленную кинетическую энергию поезда.

4. Модернизация и усиление конструкции пути, в том числе:

- укладка бесстыкового пути, что уменьшает сопротивление движению, особенно по расчетному подъему и при высоких скоростях движения;

- применение рельсов тяжелых типов Р65 (64,72 кг/пог.м) и типа Р75 (74,4 кг/пог.м) с соответствующим увеличением числа шпал на 1 км;

- укладка более качественного балласта, например щебня;

- применение железобетонных шпал на участках с тепловозной тягой;

- удлинение станционных путей на участках, где их длина ограничивает вес грузовых поездов;

- рациональная расстановка путевых сигналов, исключая необходимость дополнительных торможений и остановки поездов.

5. Уменьшение аэродинамического сопротивления движению подвижного состава, в том числе:

- применение обтекаемых форм подвижного состава и специальных обтекателей-хвостовиков на последнем вагоне существенно уменьшает основное сопротивление. Очень эффективно применение декоративных отбойных щитов на вагонах типа хопер-дозатор и установка гофров, закрывающих межвагонное пространство;

- правильно формировать составы, состоящие из разнотипных вагонов. Однотипные вагоны целесообразно сосредоточить в отдельные группы. Наименьшее сопротивление имеет состав, в котором группы вагонов расположены в следующей последовательности: крытые вагоны, полувагоны, цистерны, а в хвосте поезда размещаются платформы;

- закрывать двери и люки вагонов, что снижает сопротивление воздушной среды.

6. Увеличение диаметра колес вагонов с 950 мм до 1050 мм, что, правда, в свою очередь приведет к увеличению их тары.

7. Смазывание гребней колес локомотива при прохождении кривых участков.

8. Смазывание внутренней боковой грани наружного рельса в кривых небольшого радиуса.

9. Посадка лесных ветрозащитных насаждений (полос) и установка снегозащитных устройств позволяют снизить дополнительное сопротивление от бокового ветра и уменьшают количество снега, попадающего на путь.

Третья группа мероприятий:

1. Поддержание хорошего технического состояния и надлежащего содержания подвижного состава и пути, способствующих снижению основного сопротивления.

2. Обеспечение соответствия сорта смазки буксовых подшипников подвижного состава сезону эксплуатации.

3. Содержание тормозной системы поезда в исправном состоянии, исключаящее касание тормозных колодок колёс в нетормозных режимах.

4. Сокращение числа и продолжительности стоянок грузовых поездов, особенно в зимнее время при низких температурах окружающего воздуха, поскольку скорость остывания смазки букс во время стоянок составляет $0,5 \dots 1,2$ °С в минуту при отрицательных температурах воздуха.

Контрольные вопросы

1. Сопротивление движению поезда – это...?

2. Приведите классификацию сил сопротивления движению подвижного состава.

3. Что называют общим сопротивлением движению поезда.

4. Основное сопротивление движению подвижного состава – есть...?

5. Перечислите виды основного сопротивления движению поезда.

6. Дополнительное сопротивление движению подвижного состава – есть...?

7. Назовите виды дополнительного сопротивления движению поезда.

8. Приведите расчетные формулы по определению сил (полных и удельных) сопротивления движению подвижного состава.

9. Дайте пояснения силам сопротивления при трогании поезда с места.

10. Приведите примеры организационно-технических мероприятий снижения сопротивления движению.

11. Приведите примеры технических (конструктивных) мероприятий

снижения сопротивления движению.

12. Приведите примеры организационных мероприятий снижения сопротивления движению.

Литература

1. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. – М.: Маршрут, 2005, 448с.
2. Деев В.В. и др. Тяга поездов. - М.: Транспорт, 1987, 264с.
3. Подвижной состав и тяга поездов. Под. ред. В.В. Деева и Н.А. Фуфрянского. – М.: Транспорт, 1979, 368с.
4. Абялимов О.С., Ушаков Э.С. Основы управления локомотивов. Учебник для профессиональных колледжей железнодорожного транспорта. – Т.: Издательство «Davt», 2012. - 392 с.

Лекция № 7:

Образование тормозной силы поезда и закон сцепления при торможении

План лекции

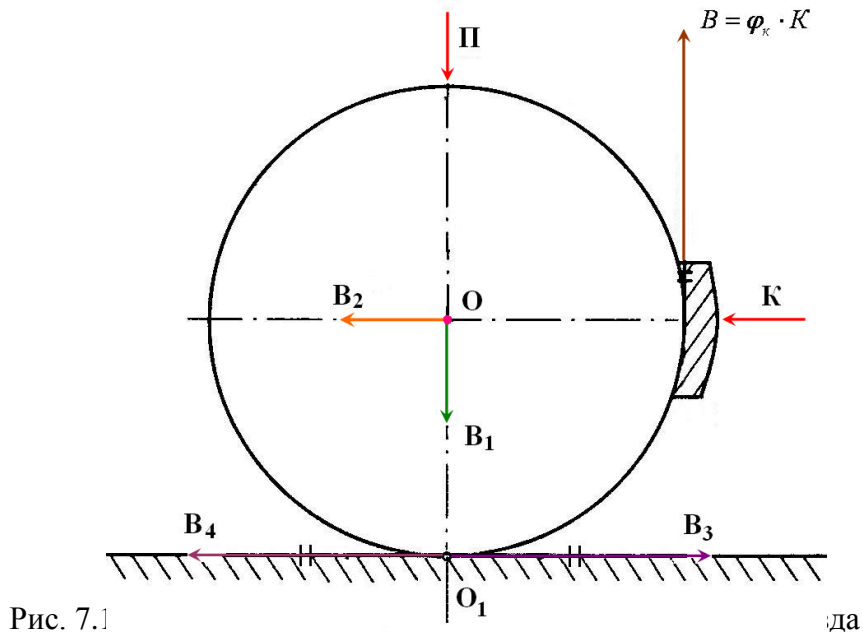
1. Краткая классификация внешних сил, действующих на поезд.
2. Тормозная сила поезда – основа безопасности движения.
3. Модель образования тормозной силы поезда.
4. Методика расчета тормозной силы поезда.
5. Тормозной коэффициент поезда и его физический смысл.
6. Режимы торможения и тормозной путь поезда.
7. Закон сцепления колесных пар с рельсами при торможении.

Торможение производится для остановки поезда или регулирования его скорости уменьшения кинетической энергии движения.

Тормозная сила поезда – внешняя управляемая машинистом сила, создаваемая тормозными средствами поезда во взаимодействии с рельсами и приложенная к ободам колес в направлении, противоположном движению.

Тормозная сила, как и сила тяги локомотива, является управляемой, но противоположна ей по направлению и поэтому имеет отрицательный знак.

Рассмотрим образование тормозной силы поезда согласно, приведенной расчетной схемы (рис.7.1), где V - тормозная сила колесной пары, равная силе трения, приведенной к ободам колес. Тормозная сила возникает при трении тормозных колодок и сцепления тормозных колес с рельсами.



Сила V вызывает реакцию V_1 в буксе и таким образом возникает внутренний момент сопротивления, создаваемый парой сил V, V_1 . Заменяем пару сил V, V_1 равновеликой V_2, V_3 . В результате сцепления колеса с рельсом в очке O_1 под действием нагрузки от колесной пары на рельсы Π и силы V_3 возникает по закону противодействия сила V_4 , равная силе V_3 . Сила V_2 стремится вращать колесо вокруг мгновенного центра вращения O_1 в противоположном направлении. Эта сила является внешней потому, что в каждый момент контакта колеса с рельсом колесо закрепляется благодаря силе сцепления в системе пути. Следовательно, эта сила V_2 является тормозной силой. А так как условились относить силы поезда к ободам колес, тогда в расчетах принимают равную ей силу V_4 .

Таким образом, тормозная сила одной тормозной колодкой

$$V = \varphi_{\kappa} K \quad (7.1)$$

где φ_K – коэффициент трения колодки о колесо;

K - сила нажатия колодки на колесо, кН.

Очевидно, значения φ_K и K определяют тормозной эффект. Коэффициент трения тормозной колодки зависит от материала тормозной колодки, скорости движения и силы нажатия K .

Применительно к тормозной оси

$$B_O = \varphi_K K_O \quad (7.2)$$

где K_O - сила нажатия колодок на колеса одной тормозной оси колесной пары, кН.

Для поезда с числом тормозных осей n при K_O , кН, тормозная сила, Н:

$$B_T = 1000 \sum \varphi_K K_O \quad (7.3)$$

где 1000 – коэффициент, зависящий от единиц измерения, переводит «кН» в «Н».

Принимая среднее значение коэффициента трения

φ_K , одинаковое для всех колодок поезда, будем иметь, Н

$$B_T = 1000 \varphi_K \sum K_O \quad (7.4)$$

Удельная тормозная сила b_T , Н/кН, при весе поезда $P+Q$

$$b_T = 1000 \varphi_K \frac{\sum K_O}{P + Q} \quad (7.5)$$

Отношение суммы сил нажатия тормозных колодок к весу поезда ($P+Q$) называется действительным тормозным коэффициентом

$$v = \frac{\sum K_O}{P + Q} \quad (7.6)$$

Тогда, имеем

$$b_T = 1000 \varphi_K v$$

Действительный тормозной коэффициент ν показывает какая сила нажатия тормозных колодок приходится на единицу веса поезда. Следует отметить, что величина ν всегда меньше единицы и не зависит от скорости движения.

При известных расчетных значениях силы нажатия K_p колодок на тормозную ось подвижного состава и расчетных значениях коэффициента трения $\varphi_{кр}$ колодок о колеса, полную и удельную тормозные силы поезда представляют в виде

$$B_T = 1000 \varphi_{кр} \sum K_p \quad (7.8)$$

и

$$v_T = 1000 \varphi_{кр} \nu_p \quad (7.9)$$

Для обеспечения безопасности движения поездов ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари» установлены минимальные значения расчетных тормозных коэффициентов:

- для составов грузовых поездов при скорости движения до 90 км/ч - 0,33;
- для рефрижераторных поездов при скорости движения до 120 км/ч - 0,6.

Для пассажирских поездов:

- при скорости движения до 120 км/ч - 0,6;
- при скорости движения до 140 км/ч - 0,78;
- при скорости движения до 160 км/ч - 0,8.

Полное значение расчетного тормозного коэффициента и соответствующая ему удельная тормозная сила реализуются только при экстренном торможении. При полном служебном торможении, когда с помощью тормозных расчетов определяют минимальное расстояние между постоянными сигналами, значение расчетного тормозного коэффициента уменьшают на 20 % и принимают равным $0,8 \nu_p$.

Для торможения поезда применяют следующие режимы торможения: экстренное, полное служебное, служебное и регулировочное.

Экстренное торможение предназначено для остановки поезда в случаях внезапного возникновения опасности. При этом применяются только тормоза механического действия.

Полное служебное торможение применяется для расстановки постоянных сигналов, при этом расчетный тормозной коэффициент поезда принимается $0,8 v_p$.

Служебное торможение (применяется тормоза механического действия) производится для остановки поезда на станциях и отдельных пунктах согласно расписанию - тормозной коэффициент установлен $0,5 v_p$, а для пассажирских, дизель - и электропоездов $0,8 v_p$.

Регулировочное торможение производится для поддержания заданной скорости движения на участке (применяются тормоза механического и электрического действия), а также прямодействующий тормоз локомотива на спусках крутизной не более 5‰ .

Каждый режим торможения характеризуется вполне определенной длиной тормозного пути.

Тормозной путь – это расстояние, проходимое поездом от момента поворота ручки крана машиниста в тормозное положение до полной остановки. Он складывается из подготовительного $S_{п}$ и действительного тормозного пути $S_{д}$, т.е.

$$S_{т} = S_{п} + S_{д}, \text{ м.} \quad (7.10)$$

Нормативы ГАЖК "Ўзбекистон темир йўллари" устанавливают полный тормозной путь на площадке не более: 1000 м – для пассажирских поездов, движущихся со скоростями до 140 км/ч, и грузовых – до 100 км/ч, 1200 м – для пассажирских поездов, движущихся со скоростями до 160 км/ч, и грузовых до 120 км/ч.

Опираясь на эти нормативы производят расстановку сигналов и ограждение мест препятствия, обеспечивающее безопасность движения поездов.

Подготовительный тормозной путь – это расстояние, проходимое поездом от момента перевода ручки крана машиниста в тормозное положение до момента нажатия тормозных колодок с полной силой.

Величину $S_{п}$ рассчитывают по формуле:

$$S_{п} = 0,278 V_{н} \cdot t_{п}, \text{ м.} \quad (7.11)$$

где V_n – скорость движения поезда в начале торможения, км/ч;
 t_n – время подготовки тормозов к действию, с.

Время подготовки тормозов зависит от длины поезда, типа тормозов и типа воздухораспределителя, тормозной силы поезда и уклона на пути подготовки тормозов. Оно определяется по формуле:

$$t_n = a - c \cdot i/v_T, \text{ с.} \quad (7.12)$$

где a, c – постоянные коэффициенты, зависящие от категории поезда, типа тормозов, длины состава и числа осей;
 v_T – удельная тормозная сила поезда, Н/кН.

При срабатывании автостопа $t_n + 14$ с, а $t_n = 60$ с. – ручные тормоза;

Для пассажирских поездов:

при пневматическом торможении $-t_n = 4 - 5 i_{cn}/bt$;

при электропневматическом торможении $-t_n = 2 - 3 i_{cn}/bt$.

При определении времени подготовки тормозов к действию принимается замена реальной диаграммы наполнения среднего в поезде тормозного цилиндра условно скачкообразной.

При этом t_v – время прохождения тормозной волны до среднего вагона поезда; $t_{ц}$ – время наполнения тормозного цилиндра среднего вагона поезда; t_n – время подготовки тормозов поезда к действию.

На приведенном рис.5.7 показано условное (4) и действительное возрастание давления воздуха в начале торможения в тормозных цилиндрах головного (1), среднего (2) и хвостового (3) вагонов.

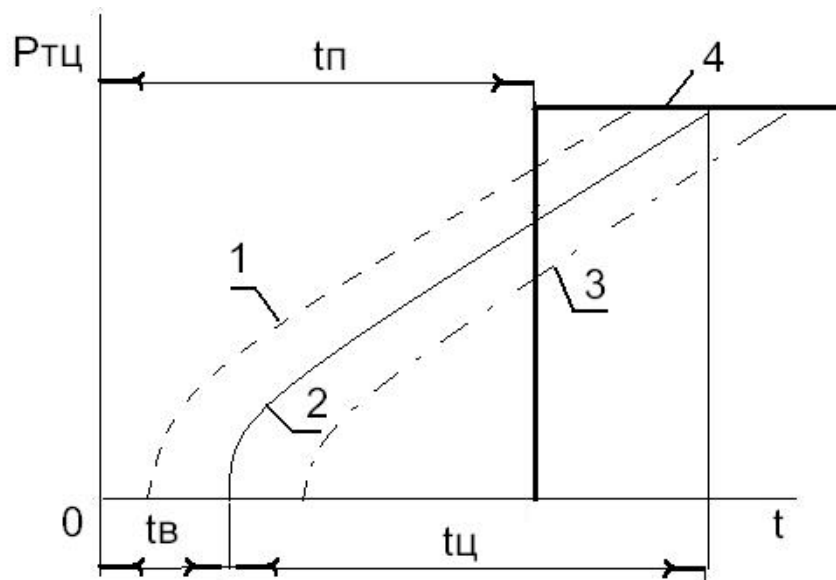


Рис7.2. Диаграмма возрастания давления воздуха в тормозных цилиндрах вагонов

Действительный тормозной путь – это расстояние, проходимое поездом с прижатыми тормозными колодками (с полной силой) к колесным парам до полной остановки.

Действительный тормозной путь определяется по формуле:

$$S_{д} = \frac{40,85(V_K^2 - V_H^2)}{b_t + w_{ox} + g \cdot i}, м \quad S_{д} = \frac{4,17(V_H^2 - V_K^2)}{(b_t + w_{ox}) + i}, м \quad (7.13)$$

где V_H , V_K – начальная и конечная скорости движения поезда в расчетном интервале, км/ч;

b_t - удельная тормозная сила, действующая на поезд при средней для данного интервала скорости, Н/т;

i – уклон на пути торможения в соответствующем интервале скорости, ‰;

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

Нормативами задаются единые наименьшие тормозные нажатия в зависимости от категории поезда, максимальной скорости движения и спуска, а также установлены расчетные значения нажатий тормозных колодок для различных типов вагонов, локомотивов и моторовагонного подвижного состава.

На спусках круче 20 ‰ для грузовых и пассажирских поездов учитываются тормозные средства локомотива.

Безопасность движения подвижного состава зависит от величины тормозной силы поезда. Если тормозная сила B_T превысит силу сцепления колесной пары с рельсами, то колеса колесной пары, заклиненные колодкой, начнут скользить по рельсам и их вращение прекратится – наступит явление юза. Сила трения скольжения $\mu_{2П}$ колесной пары при юзе меньше силы сцепления колес при качении $\psi_k 2П$ (рис. 11.8) вследствие того, что коэффициент трения скольжения меньше коэффициента трения покоя.

Опасность и вредные последствия юза с позиций безопасности движения состоят в увеличении тормозного пути, так как уменьшаются значения тормозной силы и сил основного сопротивления (т.к. $w_{6п}=0$; $w_{тк}=0$). Заклинивание колес также приводит к сильному износу рельсов и кругов катания колес колесной пары с образованием на их поверхности ползунов. В дальнейшем такая колесная пара при качении создает удары по рельсам, что отрицательно сказывается на надежности многих элементов экипажа подвижного состава и верхнего строения пути.

Во избежание явления юза необходимо соблюдать основное условие при торможении поезда – закон сцепления при торможении, которое можно представить в следующем виде

$$\varphi_k \sum K_o \leq \psi_k 2П \quad (7.14)$$

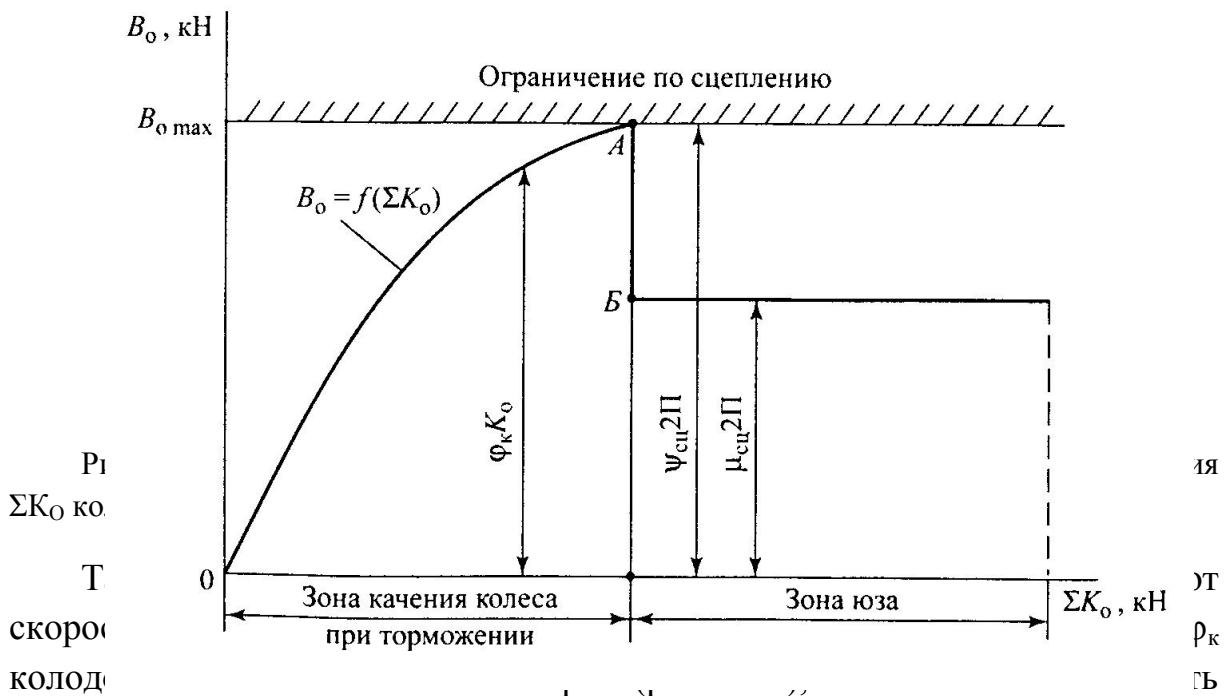
Закон сцепления при торможении также можно сформулировать следующим образом: для обеспечения безопасности движения поездов и предотвращения юза (заклинивание колес, т.е. скольжение колес по рельсам) реактивная сила, создаваемая тормозными средствами на ободах колес, не должна превосходить силу сцепления колес колесной пары с рельсами.

Наибольшая допустимая величина $\sum K_{max}$ определяется из равенства

$$\frac{\sum K_o}{2П} = \frac{\Psi_k}{\varphi_k}. \quad (7.15)$$

Отношение наибольшей силы нажатия тормозных колодок $\sum K_o$ на колесную пару к статической нагрузке на рельсы $2П$ называют коэффициентом нажатия тормозных колодок и обозначают $\delta = \sum K_o / 2П$. Из приведенного равенства следует, что коэффициент нажатия δ зависит от

отношения ψ_k к ϕ_k , которые в свою очередь зависят от скорости движения, материала колодок и погодных условий.



заклинивания колес (юза) возникает при низких скоростях, особенно при трогании с места и разгоне заторможенного вагона, т.е. при $V \leq V_A$. а при сравнительно высоких скоростях, наоборот, опасность юза исключается. Восстановление качения колес колесной пары по рельсам осуществляют с помощью специальных противоюзных устройств, предназначенных для автоматического прекращения юза в момент его возникновения.

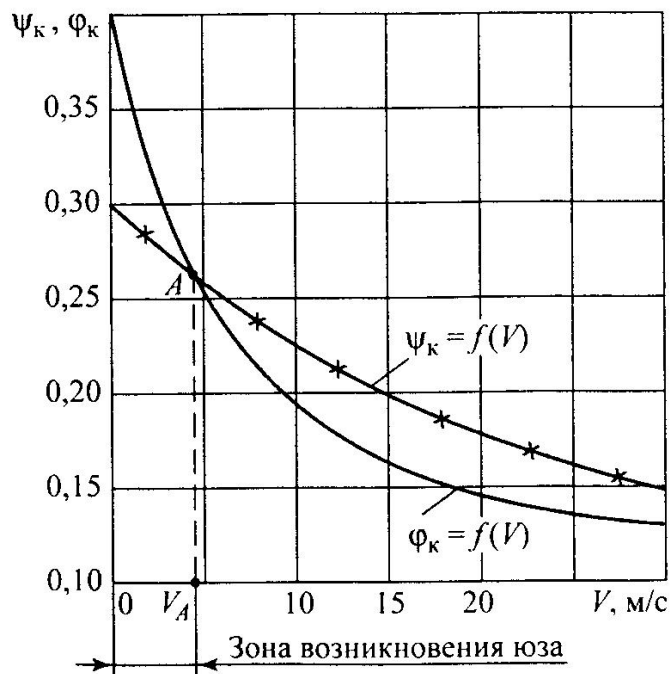


Рис. 7.4. Зависимости коэффициентов сцепления ψ_k и трения тормозных колодок φ_k от скорости движения

Так как заклинивание колес вероятнее всего у порожних вагонов, при расчетах принимают: коэффициент нажатия $\delta=0,6$ от тары порожних грузовых вагонов; для пассажирских вагонов, дизель - и электропоездов $0,7...0,75$; для локомотивов $0,5...0,6$. При применении на пассажирских вагонах композиционных колодок - $\delta=0,3[10]$.

Контрольные вопросы

1. Тормозная сила поезда – это...?
2. Перечислите режимы торможения и дайте необходимые пояснения к ним.
3. Приведите формулы для расчета тормозной силы поезда.
4. Поясните образование тормозной силы поезда.
5. Тормозной коэффициент поезда и его сущность.
6. Приведите нормативы тормозного коэффициента поезда для различных видов движения.
7. Поясните сущность закона сцепления колес с рельсами при торможении.
8. Явление юз колесных пар и его особенности.
9. Тормозной путь поезда и его нормативы.

Литература

1. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. – М.: Маршрут, 2005, 448с.
2. Деев В.В. и др. Тяга поездов. - М.: Транспорт, 1987, 264с.
3. Подвижной состав и тяга поездов. Под. ред. В.В. Деева и Н.А. Фурьянского. – М.: Транспорт, 1979, 368с.

4.Абляимов О.С., Ушаков Э.С. Основы управления локомотивов. Учебник для профессиональных колледжей железнодорожного транспорта. – Т.: Издательство «Давг», 2012. - 392с.

Лекция № 8:

Уравнение движения поезда и методы его решения

План лекции

1. Дифференциальное уравнение движения поезда.

2. Теоретическое и действительное ускорения поезда в поступательном движении.

Уравнением движения поезда называют математическое выражение, связывающее кинематические параметры движения поезда (скорость, время хода) с величинами действующих на него сил.

Движение материальной точки, за которую принимают железнодорожный поезд в его модели, подчиняется второму закону Ньютона в его простейшем виде: $R = ma$, где R - равнодействующая сил, действующих на материальную точку, Н; m - масса материальной точки, кг, и a - ее ускорение в прямолинейном поступательном движении, $м/с^2$.

Следовательно, и для поезда ускорение (или замедление) его движения прямо пропорционально величине равнодействующей силы, соответствует ее знаку (« + » или « - ») по отношению к направлению движения и обратно пропорционально его массе: $a=R/m$.

С другой стороны, как известно, с точки зрения математики ускорение - это производная скорости движения по времени:

$$a = dv/dt.$$

Таким образом, можно написать, что

$$dv/dt = R/m.$$

Последнее выражение и представляет искомую связь кинематических параметров (v и t) с равнодействующей горизонтальных сил R .

Масса поезда M , кг:

$$M = 1000 (P + Q) / g$$

Величина равнодействующей зависит от режима движения поезда и работы локомотива:

- в режиме тяги $R = F_k - W_k$;
- в режиме холостого хода (выбега) $R = -W_k$;
- в режиме торможения (например, служебного) $R = -(0,5B_T + W_k)$.

Рассмотрим уравнение применительно к движению в режиме тяги.

В этом случае (то есть в режиме тяги) для поступательного движения поезда, как материальной точки, выражение второго закона Ньютона можно представить так:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_k - W_k}{M} \quad (8.1)$$

Это уравнение справедливо именно для поступательного движения. Однако при поступательном движении железнодорожного поезда отдельные узлы подвижного состава (колесные пары, якоря тяговых электродвигателей и зубчатые колеса тяговых редукторов локомотивов, подвагонные генераторы пассажирских вагонов и т.п.), двигаясь поступательно, одновременно вращаются. На их вращение затрачивается часть полезной работы энергетической установки локомотива. Это следует принять во внимание при составлении уравнения движения поезда.

Работа движущей силы при движении поезда в режиме тяги, например, затрачивается на преодоление сил сопротивления движению подвижного состава и увеличение (точнее, изменение) его кинетической энергии.

Кинетическая энергия тела $A_{кин}$, совершающего сложное (поступательное и вращательное) движение, как известно из механики, складывается из его энергии в обоих видах этого движения:

$$A_{кин} = \frac{mv^2}{2} + \sum \frac{I\omega^2}{2}$$

где $\frac{mv^2}{2}$ кинетическая энергия поступательного движения тела (m - его масса, v - скорость поступательного движения), а под знаком суммы (Σ) складываются величины кинетической энергии всех вращающихся частей; I - их моменты инерции, а ω - угловые скорости их вращения.

Применяя это выражение к поезду, мы можем выразить угловые скорости вращающихся частей ω через скорость поступательного движения поезда v , приведя их одновременно (через передаточные отношения) к радиусу ведущего колеса локомотива: $\omega = v/r$. Тогда получим:

$$A_{кин} = \frac{mv^2}{2} + \frac{v^2}{2} \Sigma \frac{I}{R^2}$$

Величины типа (I/R^2) имеют размерность массы, поэтому обозначим их сумму как $m_э$ - эквивалентную массу вращающихся частей поезда - и вынесем за скобки величину кинетической энергии поступательного движения. Тогда

$$A_{кин} = \frac{mv^2}{2} \left[1 + \frac{m_э}{m} \right]$$

Отношение $m_э/m$ называют коэффициентом инерции вращающихся масс и обозначают его греческой буквой γ («гамма»).

Следовательно, произведение $M(1+\gamma)$ можно назвать приведенной массой поезда. Тело с такой массой по затратам энергии в поступательном движении эквивалентно реальному поезду массой M , движущемуся поступательно и имеющему вращающиеся массы. Это позволяет выразить уравнение поступательного движения поезда с действительной массой M как

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_K - W_K}{M(1+\gamma)} = \frac{F_K - W_K}{P+Q} \cdot \frac{g}{1000(1+\gamma)} \quad (8.2)$$

Дробь $g/1000(1 + \gamma)$ в выражении (8.2) является как бы удельным ускорением, то есть ускорением под действием единицы силы на единицу веса поезда. Ее обозначают греческой буквой ζ , («дзета»).

Отношение $(F_k - W_k), H/(P+Q)$, кН, представляет собой удельную равнодействующую, то есть разность соответствующих удельных сил тяги и сопротивления $(f_k - w_k)$, Н/кН, при движении поезда в режиме тяги.

В результате подстановок получаем очень простой вид дифференциального уравнения движения поезда (в режиме тяги):

$$\frac{dv}{dt} = \zeta(f_k - w_k) \quad (8.3)$$

Полученное общее уравнение (8.3) справедливо и в математическом, и в физическом планах.

Так как удельные силы тяги и сопротивления движению (разность в скобках) с точки зрения физики величины безразмерные, то величина постоянной ζ имеет размерность ускорения. Она и представляет собой величину удельного ускорения - ускорения, с которым движется тело под действием единичной удельной силы, 1 Н/кН, то есть под действием силы в 1 ньютон (Н) на единицу веса тела, за которую принят 1 килоньютон (кН).

Аналогичные выражения уравнения движения поезда для других режимов движения поезда будут, очевидно, выглядеть так:

- для движения в режиме выбега (холостого хода)

$$\frac{dv}{dt} = \zeta(-w_k) \quad (8.4)$$

- для режима торможения (служебного)

$$\frac{dv}{dt} = -\zeta(0,5b_m + w_k) \quad (8.5)$$

Уравнение движения поезда, по существу, является вторым законом локомотивной тяги (первый, или основной закон - закон сцепления).

Необходимо отметить, что при выводе этого уравнения, так же как и при выводе закона сцепления, не было ни слова сказано как о типе локомотива, о виде его энергетической установки, автономный он или

неавтономный и т.п., так и о характеристиках и особенностях всего поезда (грузовой или пассажирский, тип вагонов и т.п.).

Уравнение имеет общий характер, оно не зависит от перечисленных особенностей и одинаково определяет характер движения локомотива с поездом в зависимости от действующих на него сил при любом виде тяги, при любой мощности локомотива и при любой составности и массе поезда и т.д.

Численное значение постоянной ζ , в дифференциальном уравнении движения поезда подлежит уточнению, так как оно зависит от выбранных единиц измерения сил, скорости и времени:

$$\zeta = \frac{g}{1000(1 + \gamma)},$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение силы тяжести.

Но, так как нами принята другая единица измерения скорости (не м/с, как в физике, а км/ч), численное значение величины g следует уточнить, а именно:

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2 = 9,81 \cdot \frac{60^2 \cdot 60^2}{1000} = 127138 \text{ км/ч}^2 = 127000 \text{ км/ч}^2.$$

Тогда

$$\zeta = 127 / (1 + \gamma)$$

Величина коэффициента инерции вращающихся масс g имеет различные значения для разных типов подвижного состава. Естественно, что для локомотивов, у которых с ведущими колесными парами связаны якоря тяговых электродвигателей и зубчатые колеса тяговых редукторов, величина этого коэффициента имеет большие значения, чем у других типов подвижного состава (у электровозов до 0,24 - 0,28, у грузовых тепловозов - 0,11 - 0,12). Для грузовых вагонов в груженом состоянии $\gamma = 0,03 - 0,04$, в порожнем состоянии - 0,08 - 0,09; для пассажирских вагонов $\gamma = 0,04 - 0,05$.

Величина коэффициента инерции вращающихся масс для конкретного поезда зависит от его состава: типов локомотива и вагонов, загрузки последних и т.п. Она может быть подсчитана, если эти данные известны.

Но эти величины могут сильно различаться даже для однотипных поездов. Тем более они не могут быть известны при общих и проектных расчетах.

Поэтому, как и всегда в тяговых расчетах, может быть использован обобщенный расчетный прием.

Если принять в качестве условного средневзвешенного значения коэффициента инерции вращающихся масс всего поезда величину $\gamma = 0,06$ (точнее, $0,058$), то получим для поезда расчетную среднюю численную величину удельного ускорения $\zeta = 127 / (1 + 0,058) = 120 \text{ км/ч}^2$.

Это позволяет нам, в зависимости от выбора удобной единицы измерения ускорения, получить три различные вида дифференциального уравнения движения поезда в режиме тяги:

$$\frac{dv}{dt} = 120(f_K - w_K), \text{ км/ч}^2 \quad (8.6)$$

$$\frac{dv}{dt} = 2(f_K - w_K), \text{ км/ч} \cdot \text{мин}; \quad (8.7)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{30}(f_K - w_K), \text{ км/ч} \cdot \text{с} \quad (8.8)$$

Величина и знак ускорения в уравнении движения поезда

$$\frac{dv}{dt} = \zeta(f_K - w_K)$$

зависят от величины и знака разности удельных сил в скобках. Поэтому возможны три варианта соотношения этих сил в режиме тяги:

а) $f_K > w_K; \frac{dv}{dt} > 0$ - движение ускоренное;

б) $f_K < w_K; \frac{dv}{dt} < 0$ - движение замедленное;

в) промежуточный вариант:

$f_K = w_K; \frac{dv}{dt} = 0$, следовательно, $v = \text{const}$ — движение равномерное.

Основной целью тяговых расчетов, опирающихся на решение дифференциального уравнения движения поезда, является выявление

зависимости возможной скорости движения v поезда (заданы: тип и серия локомотива, масса состава, тип вагонов) по участку железнодорожного пути, основные характеристики (длина, план и продольный профиль, тип верхнего строения рельсового пути) которого известны и определение на этой основе времени t движения поезда по этому заданному участку.

С учетом принятых допущений [10] выполняем приближенное (численное) интегрирование уравнения движения поезда на основе дальнейшего упрощения задачи путем замены дифференциального уравнения движения (8.3) алгебраическим, предполагая, что отрезки времени Δt и изменения скорости Δv малы, но конечны и уклон продольного профиля пути неизменен ($i = \text{const}$).

Тогда приближенная форма уравнения движения поезда будет иметь вид:

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \zeta(f_K - w_K)_{cp} \quad (8.9)$$

В уравнении (8.9) принято допущение, что в пределах малых величин приращений $\Delta t = t_2 - t_1$ и $\Delta v = v_2 - v_1$ величина удельной равнодействующей силы изменяется незначительно и условно в этих пределах может быть принята постоянной, равной величине этой силы при среднем арифметическом значении скорости в этом малом диапазоне, а именно при $v_{cp} = (v_1 + v_2)/2$ или $v_{cp} = (v_1 \pm \Delta v)/2$. (Знак « \pm » означает здесь, что приращение скорости Δv может быть по своей величине положительным или отрицательным).

В результате этих допущений вместо дифференциального уравнения (6.9) получаем простейшее алгебраическое уравнение:

$$\frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \zeta(f_K - w_K)_{1-2} \quad (8.10)$$

в котором подстрочный индекс «1 - 2» при выражении удельной силы обозначает именно величину силы при средней скорости в диапазоне скоростей от v_1 до v_2 .

На основе алгебраического уравнения (8.10) можно получить формы приближенного уравнения движения поезда с различными числовыми значениями удельного ускорения, т.е.

$$\frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = 120(f_K - w_K), \text{ км/ч}^2 \quad (8.11)$$

$$\frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = 2(f_K - w_K), \text{ км/ч} \cdot \text{мин} \quad (8.12)$$

$$\frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{1}{30}(f_K - w_K), \text{ км/ч} \cdot \text{с} \quad (8.13)$$

Выражения (8.12 - 8.14) могут использоваться для практических подсчетов параметров перевозочного процесса в течение ограниченных промежутков времени.

Лекция № 9:

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА В ФУНКЦИИ ПУТИ (метод Липеца)

План лекции

7. Общие сведения о теории локомотивной тяги.
8. Методологические основы теории тяги поездов.
9. Модели механики движения поезда.
10. Исходные положения для формирования модели поезда.
11. Силы, действующие на поезд при его движении.
12. Режимы и виды движения поезда.

Для определения скорости движения поезда по участку рекомендуется использовать графический способ МПС (метод А. И. Липеца). Результаты расчета представляются студентами в виде кривой $v = f(S)$, выполненной в масштабе на миллиметровой бумаге.

Метод А.И. Липеца расчета скорости (графическое интегрирование уравнения движения поезда) основан на геометрической связи между кривыми ускоряющих и замедляющих сил и скорости движения поезда $v = f(S)$ при соответствующем подборе масштабов этих величин.

В табл. 9.1 приведены масштабы величин, которые рекомендуются для практического использования при графических построениях.

Таблица 9.1

Рекомендуемые масштабы для графических построений

Величина	Размерность	Тормозные расчеты	Определенные скорости и времени хода поезда
Удельные силы	1Н/кН	1	6
Скорость, v	1км/ч	1	1
Путь, s	1 км	120	20
Время, t	1 мин	-	10
Постоянная времени		-	30

Основные допущения метода А.И. Липеца: удельные силы, действующие на поезд при движении по прямому горизонтальному пути в произвольно выбранном интервале изменения скорости (не более 10 км/ч), принимаются постоянными и соответствующими средней скорости на этом интервале; поезд рассматривается как материальная точка, у которой вес сосредоточен в центре ее тяжести (то есть при построении кривой скорости длина поезда не учитывается).

Порядок построения кривой скорости

1. На миллиметровой бумаге с вычерченным спрямленным профилем пути в масштабе строят три графические зависимости, соответствующие режимам движения локомотива: тяги $f_k - w_0 = f(v)$, холостого хода $w_{0x} = f(v)$ и служебного торможения $0,5b_m + w_{0x} = f(v)$. При этом ось удельных равнодействующих сил (абсцисс) совмещают с осью пути S спрямленного профиля, а ось скорости v (ординат) - с началом рассматриваемого участка пути. Слева от оси скорости строят график ускоряющих сил, справа - кривые замедляющих сил. Для разграничения смежных профилей пути проводят вертикальные линии.

2. Задаются интервалом изменения скорости $\Delta v = v_k - v_n$ при условии $\Delta v \leq 10$ км/ч. Определяют среднее значение скорости, км/ч на выбранном интервале ее изменения $v_{cp} = (v_k + v_n)/2$.

3. В зависимости от скорости движения и перспективы изменения дополнительного сопротивления движению поезда от уклона выбирают один из режимов ведения поезда: тяги (РТ), холостого хода (ХХ) или полного служебного торможения (ТР), при этом необходимо стремиться к тому, чтобы, с одной стороны, поезд развивал на каждом элементе наибольшую допустимую скорость движения, а с другой - к экономии энергоресурсов на тягу поезда.

4. По кривым равнодействующих сил на общем планшете (лист миллиметровой бумаги с ранее выполненными построениями профиля пути) строят кривую скорости $v = f(S)$.

В качестве примеров на рис.9.1 и 9.2 показана методика построения кривой скорости с использованием всех режимов ведения поезда.

Движение поезда начинается в начале координат (станция А) – т. 0 (см. рис. 9.1) и заканчивается в конце станции В - т. 0 (см. рис. 9.2). В соответствии с выбранным режимом движения по средней скорости принятого интервала ее изменения на одной из кривых находят значение равнодействующей силы (см. рис.9.1 и 9.2, т. a_1, a_2, \dots), действующей на поезд на прямом горизонтальном пути. По профилю определяется величина и знак уклона элемента, на котором предполагается движение поезда.

Учитывая, что одна тысячная (промилле) уклона дополнительно действует на каждый килоньютон веса поезда с силой в 1 Н, т.е. $1 \text{ ‰} = 1 \text{ Н/кН}$, ось уклонов совмещают с осью удельных сил, откладывая в масштабе влево от начала координат (т. 0) подъемы, вправо - спуски. Через точки, соответствующие значению $r = f(v)$ при средней скорости движения поезда $v_{срi}$ в i -м интервале изменения скорости Δv (a_1, a_2, \dots) и величине уклона элемента, по которому движется поезд, на оси уклонов, проводится прямая (a_1b_1, a_2b_2, \dots), к которой из точки, соответствующей скорости v_n , восстанавливается перпендикуляр до пересечения с проекцией конечной скорости v_k выбранного интервала ее изменения Δv . Полученный отрезок, который определяет характер изменения скорости в интервале Δv , и является элементом зависимости $v = f(S)$.

Дальнейшее построение кривой скорости ведут аналогичным образом, только за начальную скорость движения поезда на следующем интервале ее изменения принимают конечную на предыдущем, т.е. $v_{Hn} = v_{Kn-1}$, и, соответственно, перпендикуляр восстанавливается из точки, соответствующей $v_{Kn-1}(C1, C2, \dots)$.

Так, в примере, рассмотренном на рис. 1.3, в качестве первого интервала изменения скорости выбрано $\Delta v_1 = v_{K1} - v_{H1} = 10 - 0 = 10$ км/ч, средняя скорость для Δv_1 $v_{cp1} = (10 - 0)/2 = 5$ км/ч режим движения – **РТ**. По кривой $f_k - \omega_0 = f(v)$, соответствующей режиму тяги, определяем значение равнодействующей (ускоряющей) силы поезда Н/кН - т. a_1 . Так как движение поезда начинается на площадке (первый элемент), через т. a_1 и т. 0 проводим прямую $a_1 b_1$, к которой затем из начала координат ($v_{H1} = 0$) восстанавливаем перпендикуляр ос₁ до проекции скорости $v_{K1} = 10$ км/ч (т. C_1). Вторым интервал $\Delta v_2 = v_{K2} - v_{H2} = 20 - 10 = 10$ км/ч. $v_{cp1} = 15$ км/ч Находим т. a_2 , проводим $a_2 b_2$, а затем уже из т. c_1 к прямой $a_2 b_2$ восстанавливаем перпендикуляр $c_1 c_2$ до $v_{K2} = 20$ км/ч (т. C_2).

Следует обратить внимание на ряд особенностей, с которыми приходится встречаться при построении кривой скорости методом А.И. Липеца: при движении поезда на спуске его максимальная скорость не должна превышать допустимую по условиям безопасности скорость движения поезда. Эта максимальная скорость для каждого уклона (спуска) определяется по графику $v_{доп} = f(-i)$. Следовательно, при $v_k = 80$ км/ч необходимо применять тормозной режим (см. рис. 9.2, прямая $c_3 c_4$); для максимального использования кинетической энергии поезда скорость к началу подъема должна быть наибольшей; для остановки поезда в конце ст. В (см. рис. 1.4) применяют режим полного служебного торможения. Кривую скорости при этом режиме движения строят из т. О, начиная с интервала $v_k - v_h = 10$ км/ч, до пересечения с ранее построенной кривой скорости (т. c_{10}).

При проходе входных стрелок ст. В (начало последнего элемента профиля) скорость движения не должна превышать величины 40 км/ч; при выборе интервала изменения скорости в конце элемента профиля, значение конечной скорости должно совпадать с линией, разграничивающей смежные профили; на точность графического расчета скорости движения поезда по участку влияет не только правильность выбора интервала изменения скорости из условия $\Delta v \leq 10$ км/ч, но и определение характера изменения скорости (возрастет, будет падать, станет постоянной), особенно при переходе с элемента на элемент. Для определения характера

изменения скорости необходимо определить знак удельной равнодействующей силы r_y , действующей на поезд, при заданном режиме ведения поезда и при условии движения по элементу известной крутизны с постоянной скоростью (Н/кН)

$$r_y = \pm(r + i), \quad (9.1)$$

где r - равнодействующая удельных сил при движении по прямому горизонтальному пути, Н/кН; определяется по графикам $f_k - \omega_0 = f(v)$; $\omega_{ox} = f(v)$ и $0,5v_T + \omega_{ox} = f(v)$ для значения скорости, с которой поезд начинает движение по следующему элементу профиля пути.

Покажем это на примере 3. Допустим поезд начинает движение по элементу +3,5/2000 со скоростью 40 км/ч в режиме тяги (см. рис. 9.1). Выбираем следующий шаг изменения скорости $\Delta v = 10$ км/ч. Необходимо определить характер изменения скорости, т.е. рассматривать интервал 40-50 км/ч или 40-30 км/ч. Задаемся условием: скорость поезда не меняется, т.е. остается постоянной $v = 40$ км/ч; определяем по характеристике $f_k - \omega_0 = f(V)$ (движение в режиме тяги) величину равнодействующей удельных сил для скорости 40 км/ч - точка "d₂" и, соответственно, $f_k - \omega_0 = 2,5$ Н/кН.

Определим знак и значение равнодействующей силы r_y , действующей на поезд, при движении по уклону +3,5/‰ в режиме тяги $r_y = r - i = 2,5 - 3,5 = -1$ Н/кН. Следовательно, скорость поезда при движении по уклону +3,5‰ будет снижаться и для дальнейших построений нужно выбрать интервал $\Delta v = 40 - 30$ км/ч. Нетрудно заметить, что при достижении поездом скорости 30 км/ч его движение будет равномерным, т.к. $r_y = 3,5 - 3,5 = 0$ (точка "d₁" на рис. 9.2).

На кривой $v = f(S)$ в точках перелома нужно отметить режимы управления локомотивом: РТ; ХХ; ТР. Режим работы локомотива проставляется в начале интервала изменения скорости.

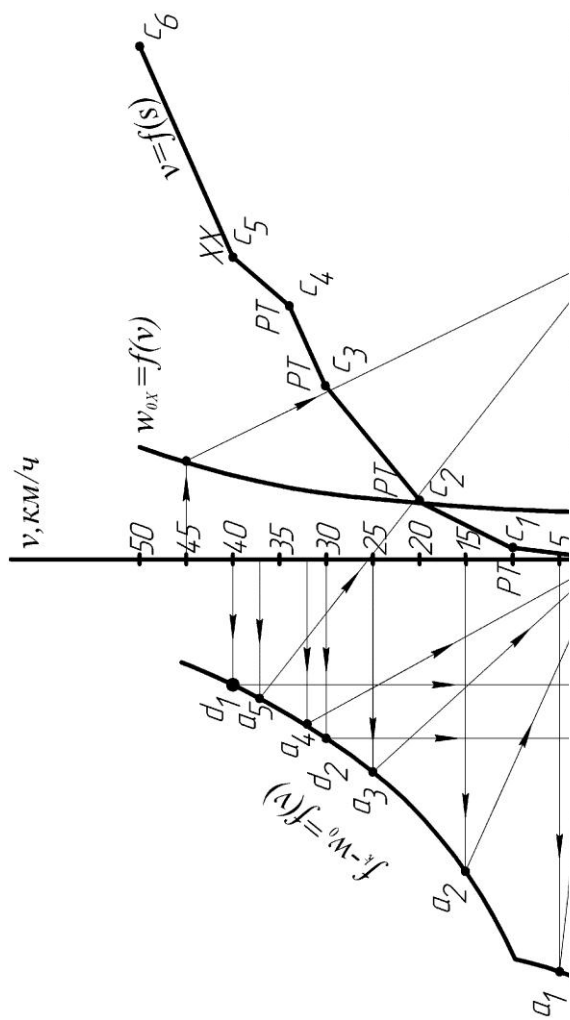


Рис. 9.1. Построение кривой скорости $v=f(s)$ в режимах тяги и холостого хода.

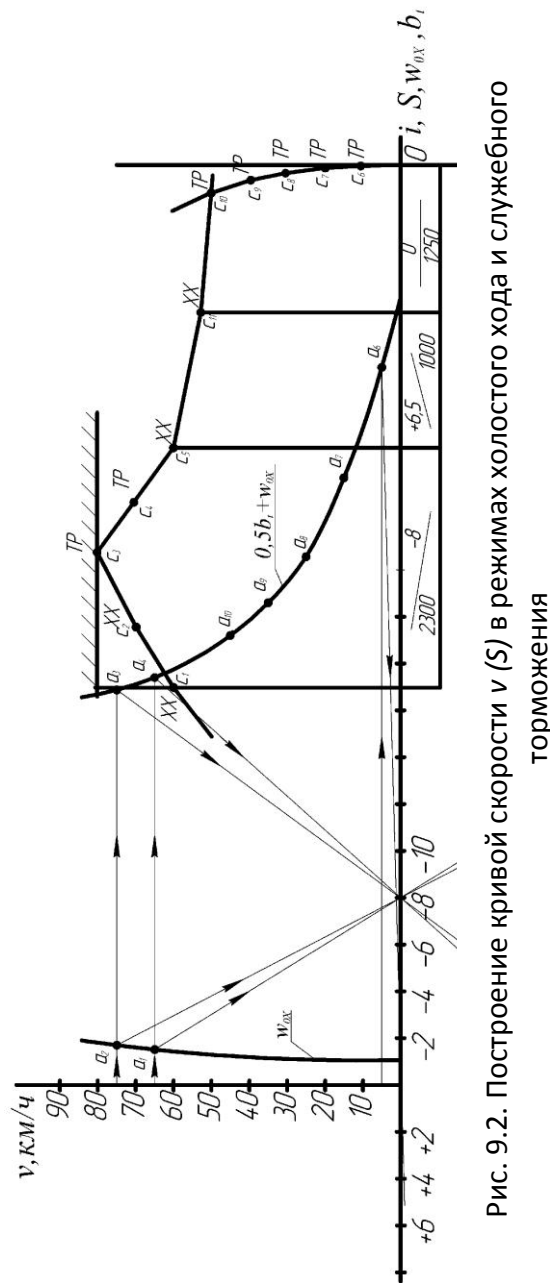


Рис. 9.2. Построение кривой скорости $v(S)$ в режимах холостого хода и служебного торможения

Контрольные вопросы:

8. Что изучает теория локомотивной тяги?
9. Основные положения теории тяги поездов.
10. Математическая модель поезда.
11. Физическая модель поезда.
12. Какие силы действуют на движущийся поезд?
13. Режимы движения поезда.
14. Назначение и сущность тяговых расчётов.

Литература

6. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. - М.: Маршрут, 2005, 448с.
7. Деев В.В. и др. Тяга поездов. – М.: Транспорт, 1987, 264с.
8. Подвижной состав и тяга поездов. Под ред. В.В.Деева и Н.А.Фуфрянского. - М.: Транспорт, 1979, 368с.
9. Бабичков А.М., Гурский П.А., Новиков А.П.. Тяга поездов и тяговые расчёты. – М.: Транспорт, 1971, 280с.
10. Правила тяговых расчётов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985, 288с.

Лекция 10:

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА В ФУНКЦИИ ПУТИ (метод Лебедева)

План лекции

13. Общие сведения о теории локомотивной тяги.
14. Методологические основы теории тяги поездов.
15. Модели механики движения поезда.
16. Исходные положения для формирования модели поезда.
17. Силы, действующие на поезд при его движении.
18. Режимы и виды движения поезда.

Для расчета хода поезда имеется много способов, из которых наиболее часто применяются: графический способ Г.В. Лебедева, численный с помощью ПЭВМ и аналитический. Имеются также более грубые (приближенные) методы: способ равновесных скоростей, Унрейна, Дегтярева-Мюллера и другие.

При выполнении задания рекомендуется использовать графический способ Г.В. Лебедева.

Основные положения метода Г.В. Лебедева. Способ Лебедева Г.В. является графическим методом и основан на следующем геометрическом свойстве $t=f(S)$: угол, образованный касательной к кривой $t=f(S)$ с осью времени, пропорционален средней скорости движения поезда на данном интервале пути ΔS (при соответствующем выборе масштабов).

В таблице 9.1 приведены масштабы величин, которые рекомендуются для практического применения при выполнении данного пункта задания .

Кривая времени $t=f(S)$ строится по кривой скорости $v=f(S)$ на общем планшете с ранее выполненными графическими построениям.

Предположим, что на участке v_k-v_n (рис.10.1) скорость Δv изменяется по линии АВ, а время хода Δt по av , при этом поезд проходит путь ΔS . Из треугольника avc получим

$$\operatorname{tg} \gamma = ac / bc = \Delta S / \Delta t \quad (10.1)$$

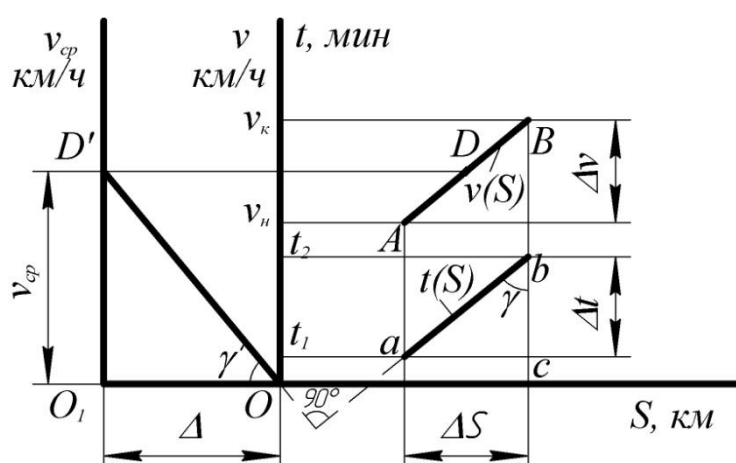


Рис. 10.1. Принцип построения кривой времени (способ Лебедева Г.В.)

По определению, $\Delta S / \Delta t = v_{cp}$, следовательно, интенсивность изменения кривой времени $t=f(S)$ будет зависеть от среднего значения скорости v_{cp} на участке АВ кривой $v=f(S)$.

Построим в масштабе треугольник OO_1D' , высота которого будет равна v_{cp} , а основание — постоянной времени Δ . Из рис. 1.5 следует, что значения углов γ и γ' зависят только от v_{cp} и соотношения масштабов скорости, времени и пути. При равенстве углов $\gamma = \gamma'$ построение кривой времени можно было бы производить с помощью линейки и угольника.

Порядок построения кривой

1. Кривую скорости разбивают на отдельные участки: OC_1 , C_1C_2 , C_2C_3 и т.д. (рис. 1.6), как правило, определяемые точками перелома кривой $v = f(S)$, и для каждого участка по равенству $v_{cp} = (v_{ni} + v_{ki}) / 2$ определяют среднюю скорость (т. D_1, D_2 и т.д.).

2. Влево от т. O по оси S откладывают отрезок O_1O_2 , равный постоянной времени $\Delta = 30$ мм, и через т. O_1 проводят ось средних скоростей v_{cp} , на которую затем проектируют т. D_1, D_2 и др.

3. Соединяя т. v_{cp1}, v_{cp2} и другие с началом основания треугольника, т.е. т. O_2 , лучами $v_{cp1}O_2, v_{cp2}O_2$ и другими, находят углы $\gamma'_1, \gamma'_2, \gamma'_3$, и т.д.

4. Для построения $t = f(S)$ достаточно к лучам $v_{cp1}O_2, v_{cp2}O_2$ и другим последовательно восстановить перпендикуляры 0-1, 1-2 и т.д. На практике лучи $v_{cp1}O_2, v_{cp2}O_2$ и другие не строятся, а к точкам, например, v_{cp1} и O_2 прикладывается линейка, к которой с помощью угольника из т. O восстанавливается перпендикуляр 0-1 до конца первого интервала изменения пути ΔS_1 . Аналогично строится кривая времени на втором интервале изменения скорости (пути), только перпендикуляр 1-2 восстанавливается уже из т. 1 и т.д.

5. Для уменьшения размера планшета и удобства расчетов кривую времени при достижении 10 мин. обрывают (т. 3' отрезка 2-3) и переносят в начало координат (т. 3''), а затем построение $t = f(S)$ продолжают (рис. 1.6, отрезок 2-3).

Определив время хода поезда по участку методом Г.В. Лебедева., следует рассчитать среднюю техническую V_m и участковую $V_{уч}$ скорости движения поезда (км/ч):

$$v_T = 60 \sum S / t; \quad (10.2)$$

$$v_{уч} = \beta_y v_T, \quad (10.3)$$

где $\sum S$ - общая длина профиля, км (из задания);

t - время хода поезда, мин;

β_y - коэффициент участковой скорости; можно принять $\beta = 0,8-0,9$.

где t - время хода поезда, полученное графическим методом (определяется по кривой времени), мин

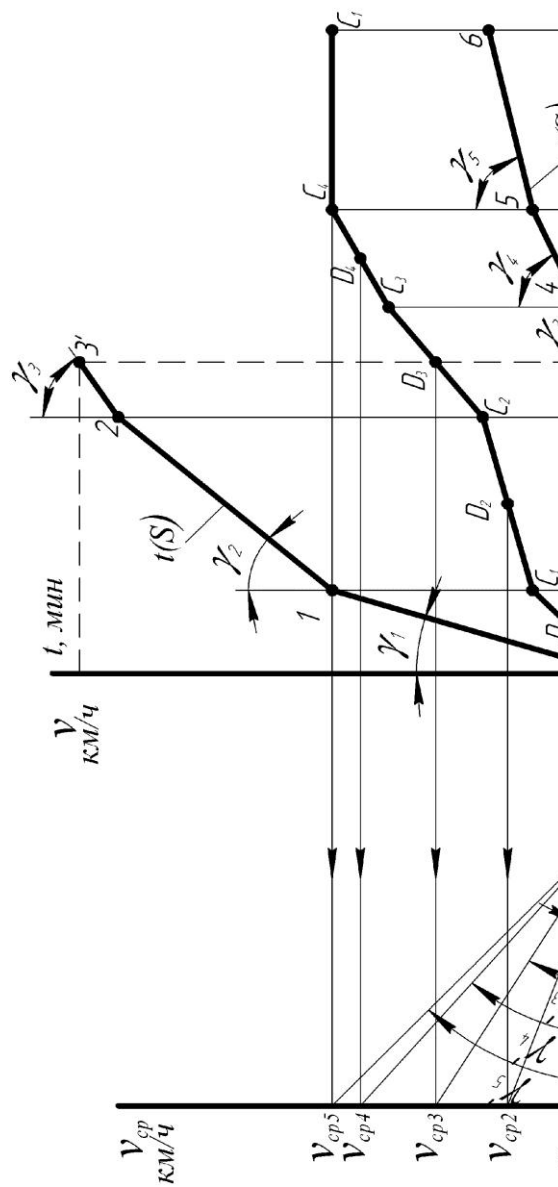


Рис. 10.2. Техника построения кривой времени (способ Лебедева Г.В.)

Контрольные вопросы:

15. Что изучает теория локомотивной тяги?
16. Основные положения теории тяги поездов.
17. Математическая модель поезда.
18. Физическая модель поезда.
19. Какие силы действуют на движущийся поезд?
20. Режимы движения поезда.
21. Назначение и сущность тяговых расчётов.

Литература.

11. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. - М.: Маршрут, 2005, 448с.
12. Деев В.В. и др. Тяга поездов. – М.: Транспорт, 1987, 264с.
13. Подвижной состав и тяга поездов. Под ред. В.В.Деева и Н.А.Фуфрянского. - М.: Транспорт, 1979, 368с.
14. Бабичков А.М., Гурский П.А., Новиков А.П.. Тяга поездов и тяговые расчёты. – М.: Транспорт, 1971, 280с.
15. Правила тяговых расчётов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985, 288с.

Лекция 11:

Методы расчета массы состава

План лекции

1. Железнодорожный путь и его характеристики.
2. Классификация и особенности профиля пути.
3. Расчет массы состава при условии движения с равномерной скоростью на расчетном подъеме.
4. Расчет массы состава с учётом использования кинетической энергии поезда (метод подбора).
5. Проверка массы состава при трогании с места.
6. Проверка массы состава по длине приемо-отправочных путей.
7. Расчет массы состава пассажирских поездов.

Наиболее важными характеристиками железнодорожного пути являются ширина рельсовой колеи, план и продольный профиль пути.

Ширина рельсовой колеи – есть стандартное расстояние между внутренними гранями головок рельсов.

Железнодорожный путь в плане – сочетание прямолинейных («прямых») и, имеющих постоянный радиус кривизны, криволинейных («кривых») участков различной протяженности (длины), соединённых друг

с другим переходными кривыми с постепенно изменяющимся по величине радиусом кривизны, что является необходимым условием для обеспечения более плавного и безопасного изменения направления движения поездов. Общая длина кривой, включая переходные – $S_{кр}$, м; радиус кривой R , м и её центральный угол α в градусах связаны между собой соотношениями

$$S_{кр} = \frac{2\pi R\alpha}{360}.$$

Продольный профиль пути – совокупность отдельных горизонтальных или наклонных под различными углами к горизонту прямолинейных отрезков пути – элементов профиля, которые, аналогично элементам плана пути, на стадии проектирования и строительства соединяются между собой кривыми постоянного радиуса кривизны, не учитываемыми при производстве тяговых расчётов.

Поэтому каждый элемент продольного профиля пути обозначают (задают) значениями двух величин: длина элемента s , м и уклон (крутизна) элемента – i ‰. Здесь тысячная (‰) означает тангенс угла наклона прямолинейного отрезка к горизонтали, следовательно, у элемента, крутизна которого соответствует одной тысячной, изменение высоты его конечной точки на длине в один километр будет составлять один метр.

При выполнении тяговых расчётов продольный профиль участка железнодорожного пути представляют условно в виде таблицы или одномерного, соблюдая масштаб лишь по длине элементов, изображения.

Наряду с конструктивными особенностями железнодорожного пути существенное влияние на характер движения поездов и перевозочную работу локомотивов будут оказывать следующие элементы профиля пути – расчётный и проверяемый (инерционный) подъёмы, руководящий спуск.

Расчётный подъём i_p – это самый трудный элемент участка железнодорожного пути, характеризующийся подъёмом наибольшей крутизны и наибольшей протяжённости, на котором поезд номинальной (максимальной) массы будет двигаться с равновесной скоростью равной расчётной и соответствующей этой скорости расчётной силы тяги локомотива.

Проверяемый (инерционный) подъём $i_{пр}$ – это наиболее крутой подъём (даже бóльшей крутизны, чем расчётный) относительно небольшой

протяженности, которому предшествуют «легкие» элементы профиля пути (спуски, площадки и подъёмы, сравнительно небольшой крутизны), где поезд, разгоняясь, может развить довольно высокую скорость движения, что позволит ему преодолеть такой подъём «по инерции» за счёт использования, накопленной на предшествующих элементах, кинетической энергии.

Руководящий спуск $i_{сп}$ – это элемент профиля пути, который имеет наибольший (максимальный) по крутизне спуск с учётом сопротивления от кривых, протяженностью более тормозного пути поезда. Длина полного тормозного пути поезда принимается равной 1000 метров – на спусках крутизной до 6‰ включительно и 1200 метров – на спусках круче 6‰.

В зависимости от сочетания групп элементов различной крутизны с учётом их удельной протяжённости на общей длине участка железнодорожной линии различают четыре типа профиля пути, которые, в свою очередь, можно разделить на следующие два вида.

Участки железных дорог с профилем пути первого вида имеют один или несколько, ярко выраженных, наиболее крутых подъёмов достаточной (затяжной) длины, протяжённость которых обеспечивает условия движения поезда на таких подъёмах с равновесной (равномерной) скоростью.

Второй вид профиля пути также характеризуется наличием наиболее крутых, но незначительных по протяжённости подъёмов, на которых скорость движения поезда, постепенно снижаясь, не достигает своего равновесного (равномерного) по величине значения.

Расчёт массы поезда производят исходя из принципа полного использования мощности и тяговых качеств локомотива, а также кинетической энергии поезда при движении на каждом конкретном элементе профиля пути с учётом выполнения условий эксплуатационной надёжности и устойчивости движения.

Расчет массы состава при условии движения с равномерной скоростью на расчётном подъёме ведут из условия равенства касательной силы тяги, силам сопротивления при движении поезда с равномерной скоростью, опираясь на уравнение движения поезда, т.е.

$$F_{кр} = (\omega_o'' + i_p) \cdot Qg + (\omega_o' + i_p) \cdot Pg \quad (11.1)$$

Откуда

$$Q = \frac{F_{кр} - (\omega_o' + i_p) \cdot Pg}{(\omega_o'' + i_p) \cdot g} \quad (11.2)$$

где $F_{кр}$ - расчётная сила тяги локомотива, Н;

P - расчётная масса локомотива, т;

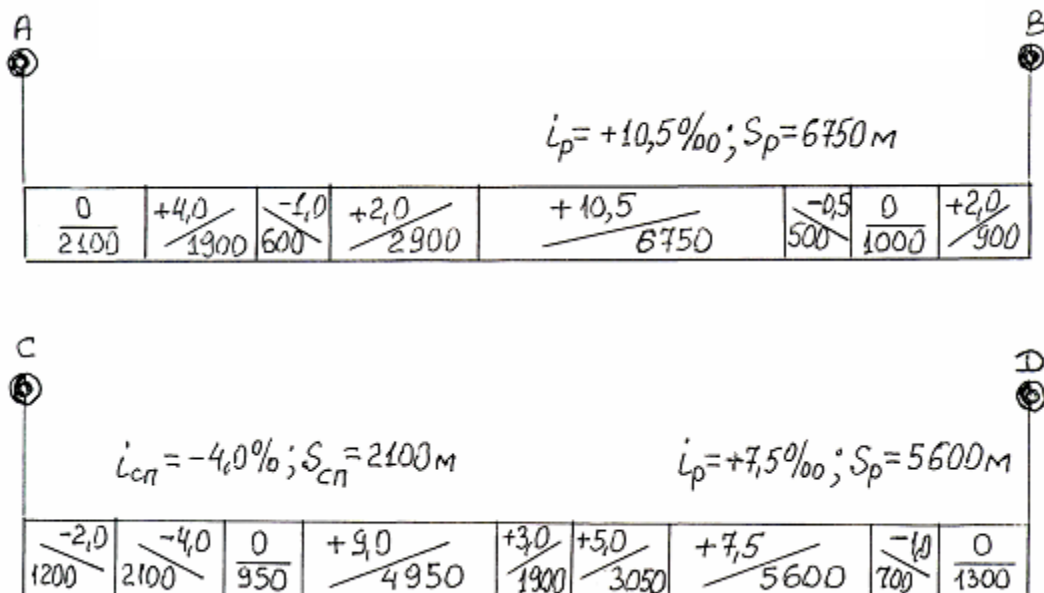
ω_o' - основное удельное сопротивление движению локомотива Н/кН;

ω_o'' - основное удельное сопротивление движению состава Н/кН;

i_p - крутизна расчётного подъёма, ‰;

g - ускорение свободного падения, $g=9.81$ м/с².

Следовательно, выражение (11.2) позволяет рассчитать массу состава, которую заданный локомотив может провести по расчётному подъёму любой протяжённости не снижая при этом скорость движения ниже расчётной.



Если на расчётном подъёме имеется кривая, то, следует это учесть путем замены её на фиктивный подъём в соответствии с эмпирическим выражением:

$$i_{кр} = \frac{700}{R_{кр}} \quad (11.3)$$

Тогда, значение расчётного подъёма для подстановки в выражение (11.2) будет являться результатом сложения величин фиктивного и действительного уклона на расчётном подъёме - $i_p = i + i_{кр}$.

Если на расчётном и труднейших подъёмах имеются кривые малого радиуса (для электрической тяги – менее 800м), снижение расчётного коэффициента сцепления учитывать пропорционально поправочному коэффициенту $K_{кр}$ для всех видов тяги по формуле:

$$\psi_{K_{кр}} = \psi_p \cdot K_{кр} \quad (11.4)$$

$$K_{кр} = \frac{250 + 1,55 \cdot R}{500 + 1,1 \cdot R} \text{ - для электрической тяги}$$

$$K_{кр} = \frac{3,5 \cdot R}{400 + 3 \cdot R} \text{ - при тепловозной тяге}$$

Если тяговые расчёты выполняются при пониженном напряжении в контактной сети, то тяговую характеристику перестраивают по формуле:

$$V' = V \cdot \frac{U'_2}{U_2} \quad (11.5)$$

где V - скорость по тяговой характеристике при нормальном напряжении U_2 , на данной позиции и при этой же силе тяги;

U'_2 - расчётное пониженное напряжение на токоприёмнике;

Ограничение силы тяги по сцеплению, ограничение по току и режим работы (позиция регулирования) грузовых электровозов на расчётном подъёме и электропоездов остаются, как при нормальном напряжении. Касательные силы тяги при трогании с места не меняются. У электровозов

ВЛ60 и ВЛ60^П корректировку расчётной скорости движения не производят.

У тепловозов изменение касательной силы тяги в зависимости от атмосферных условий, отличающихся от стандартных ($P_0=760\text{мм.рт.ст.}=1013\text{гПа}$, $t_{\text{нв}}=+20^\circ\text{C}$), учитывают по формуле:

$$F_k = F_{ko} \cdot (1 - K_t - K_p) \quad (11.6)$$

где F_{ko} – сила тяги при стандартных атмосферных условиях;

K_t - коэффициент, учитывающий снижение мощности дизеля от изменения температуры наружного воздуха;

K_p - коэффициент, учитывающий снижение мощности дизеля от изменения атмосферного давления.

Расчёт массы состава с учётом использования кинетической энергии поезда производят, когда на участке пути, по которому движется поезд, отсутствует явно выраженный расчётный подъём. В этом случае массу состава определяют методом подбора. Для этого за расчётный принимают подъём, у которого крутизна меньше наибольшей, а по длине он достаточно затяжной и далее определяют массу состава Q при равномерном движении с расчётной скоростью на этом подъёме по формуле (11.2). Полученную массу состава проверяют на прохождение поездов участков профиля пути с подъёмами боьшей крутизны, чем принятый расчётный подъём с учётом использования кинетической энергии поезда. Упомянутую проверку производят аналитическим или графическими способами. При любом способе проверки расчёты начинают с элементами профиля, для которого скорость движения поезда может быть заранее известна – остановочный пункт, ограничение скорости, равновесная скорость на элементах профиля пути перед проверяемым подъёмом...

Аналитический способ проверки заключается в сопоставлении фактической длины проверяемого подъёма S_{np} с длиной подъёма S_i , которую поезд может преодолеть в режиме тяги с использованием кинетической энергии при снижении скорости от наибольшей возможной в начале проверяемого подъёма V_n до расчётной скорости в его конце $V_k=V_p$.

Интервалы изменения скорости следует брать в пределах 10 км/ч, а длину подъёма S_i определять по формуле:

$$S_i = \frac{4,17 \cdot (V_{ki}^2 - V_{ni}^2)}{(f_k - \omega_k)_i} \quad (11.7)$$

где V_{ki}, V_{ni} - начальная и конечная скорость интервала, км/ч;

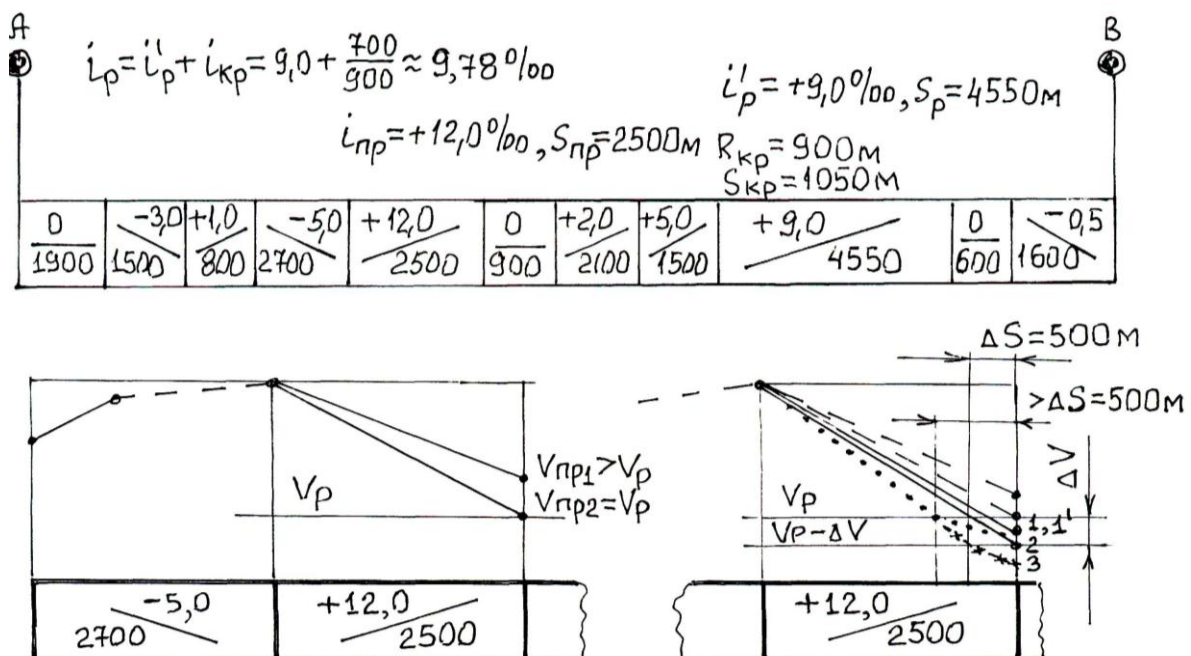
$(f_k - \omega_k)_i$ - средняя ускоряющая сила, действующая на поезд в пределах интервала скорости от V_{ni} до V_{ki} , н/кН.

Критерием окончания аналитической проверки является удовлетворение условию неравенства:

$$S_i \geq S_{пр} \quad (11.8)$$

В этом случае делают вывод, что массу состава следует считать определившейся, так как поезд надёжно преодолевает подъём большей крутизны, чем расчётный, за счёт использования кинетической энергии, накопленной перед началом проверяемого элемента профиля пути.

При графическом способе проверки определяют скорость движения поезда в конце проверяемого подъёма, опираясь на кривую скорости $V=f(S)$, построенную по диаграмме ускоряющих сил поезда. Если скорость движения в конце проверяемого подъёма окажется равной или будет несколько выше расчётной скорости для данной серии локомотива, то рассчитанную массу состава следует считать определившейся.



Согласно ПТР разрешается скорость выхода с проверяемого подъёма принимать следующую:

а) для электровозов постоянного тока и двойного питания (ВЛ82, ВЛ82^М) – по значению скорости при полном возбуждении последовательно – параллельного соединения тяговых электродвигателей;

б) для электровозов переменного тока – по значению скорости при нормальном возбуждении на 21-й позиции у электровозов серии ВЛ60^К, ВЛ60^Р, ВЛ60^Т, ВЛ60^С и 0,5 зоны 3 для электровоза ВЛ80^Р;

в) для тепловозов ТЭ3, М62 и 2М62 – 16 км/ч; тепловозов типа ТЭ10 и 2ТЭ116 – 20 км/ч при выходе на ограничение по сцеплению с переходом на режимы, соответствующие промежуточным позициям контроллера машиниста.

При этом протяженность пути, проходимого со скоростью меньшей, чем расчётная, для всех локомотивов не должна превышать 500 м.

Проверка массы состава при трогании с места выполняется по формуле

$$Q_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{Ктр}}}{(\omega_{\text{тр}} + i_{\text{тр}})} - P \geq Q \quad (11.9)$$

где $F_{\text{Ктр}}$ - сила тяги локомотива при трогании состава с места, Н;

$\omega_{\text{тр}}$ - удельное сопротивление при трогании с места, Н/кН;

$i_{\text{тр}}$ - уклон элемента профиля пути, на котором происходит трогание поезда, ‰.

Масса состава не будет ограничена по условиям трогания поезда с места, если $Q_{\text{тр}} \geq Q$.

Проверка массы состава по длине приемо-отправочных путей выполняется из соотношения, где длина поезда $l_{\text{п}}$ не должна превышать

полезной длины приёмо-отправочных путей $l_{\text{поп}}$ на участках обращения данного поезда с учётом допуска 10 м на установку поезда, т.е.

$$l_{\text{п}} \geq l_{\text{поп}} \quad (11.10)$$

Длина поезда определяется из выражения:

$$l_{\text{п}} = l_{\text{с}} + l_{\text{л}} + 10$$

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

$l_{\text{л}}$ - длина локомотива, м;

Число однотипных вагонов в сформированном составе определяют из выражения:

$$n_i = \frac{Q}{g_i} \cdot \alpha_i$$

где g_i - средняя для одиночной группы масса вагона (брутто), т;

α_i - доля (по массе) состава, приходящаяся на данную группу однотипных вагонов.

Расчёт массы состава пассажирского поезда производят исходя из условия лучшего обслуживания, которая колеблется от 700 до 1200т. Массу состава пассажирского поезда проверяют по композиции вагонов, включенных в состав и сравнивают с предварительно намеченным, а также по длине приёмо-отправочных платформ ($L_{\text{пл}}=350\dots400\text{м}$) с учётом удобства отправления и прибытия.

Для пассажирских и ускоренных грузовых поездов скорость и силу тяги на расчётном подъёме определяют на основании установленной (заданной) массы составов. С этой целью на планшете тяговой характеристики строят кривую полного сопротивления в зависимости от скорости движения $W_{\text{к}} = f(v)$ и в пересечении её с жирной линией тяговой характеристики находят искомые $F_{\text{кр}}$ и $V_{\text{р}}$ на заданном расчётном подъёме.

Контрольные вопросы

1. Перечислите характеристики железнодорожного пути.
2. Железнодорожный путь в плане – это...

3. Продольный профиль пути – это...
4. Какой элемент профиля является расчётным подъёмом.
5. Чем характеризуется инерционный (проверяемый) подъём.
6. Руководящий спуск – это...
7. Равновесная скорость движения поезда и методика её определения.
8. Классификация профиля пути и его виды.
9. Методы расчёта массы состава и их особенность.
10. Расчёт массы состава при условии движения с равномерной скоростью на расчётном подъёме.
11. Расчёт массы состава с использованием кинетической энергии поезда.
12. Методика определения $F_{кр}$ и V_p для пассажирских и ускоренных грузовых поездов.
13. Способы проверки рассчитанной массы состава и их сущность.
14. О рекомендациях ПТР по скорости выхода с проверяемого (инерционного) подъёма.
15. Сущность проверки массы состава при трогании с места.
16. Как проверяется масса состава по длине приемо-отправочных путей.
17. Расчёт массы состава пассажирских поездов.

Литература

1. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. - М.: Маршрут, 2005, 448с.
2. Деев В.В. и др. Тяга поездов. – М.: Транспорт, 1987, 264с.
3. Подвижной состав и тяга поездов. Под ред. В.В.Деева и Н.А.Фуфрянского. - М.: Транспорт, 1979, 368с.
4. Бабичков А.М., Гурский П.А., Новиков А.П.. Тяга поездов и тяговые расчёты. – М.: Транспорт, 1971, 280с.

5. Правила тяговых расчётов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985, 288с.

Лекция № 12:

Торможение поезда и методика решения тормозных задач

План лекции

1. Тормозной путь и способы его определения.
2. Время подготовки тормозов к действию.
3. Расчет допускаемой (максимально допустимой) скорости в начале торможения.
4. Расчет тормозного пути поезда.
5. Расчет потребного числа тормозных осей в поезде.

Для торможения поезда применяют следующие режимы торможения: экстренное, полное служебное, служебное и регулировочное. Экстренное торможение предназначено для остановки поезда в случаях внезапного возникновения опасности. При этом применяются только тормоза механического действия. Полное служебное торможение применяется для расстановки постоянных сигналов, при этом расчетный тормозной коэффициент поезда принимается $0,8 V_p$.

Служебное торможение (применяется тормоза механического действия) производится для остановки поезда на станциях и отдельных пунктах согласно расписанию - тормозной коэффициент установлен $0,5 V_p$, а для пассажирских, дизель- и электропоездов $0,8 V_p$. Регулировочное торможение производится для поддержания заданной скорости движения на участке (применяются тормоза механического и электрического действия), а также прямодействующий тормоз локомотива на спусках крутизной не более 5‰ .

Тормозные расчеты производят для определения:

- а) Допускаемой скорости движения при заданном тормозном пути, известных тормозных средствах и профиле пути;
- б) Потребной силы нажатия тормозных колодок при заданной максимально допустимой скорости движения, длине тормозного пути и крутизне уклона;
- в) длины тормозного пути в зависимости от заданной максимальной (начальной) скорости движения, силы нажатия тормозных колодок и

профиля пути. Эти тормозные расчеты выполняют отдельно для грузовых и пассажирских поездов.

Тормозной путь – это расстояние, проходимое поездом от момента поворота ручки крана машиниста в тормозное положение до полной остановки. Он складывается из подготовительного $S_{п}$ и действительного тормозного пути $S_{д}$, т.е.

$$S_{т} = S_{п} + S_{д}, \text{ м.}$$

Нормативы ГАЖК "Узбекистон темир йуллари" устанавливают полный тормозной путь на площадке не более: 1000 м. – для пассажирских поездов, движущихся со скоростями до 140 км/ч., и грузовых – до 100 км/ч., 1200 м. – для пассажирских поездов, движущихся со скоростями до 160 км/ч., и грузовых до 120 км/ч. Опираясь на эти нормативы производят расстановку сигналов и ограждение мест препятствия, обеспечивающее безопасность движения поездов.

Подготовительный тормозной путь – это расстояние, проходимое поездом от момента перевода ручки крана машиниста в тормозное положение до момента нажатия тормозных колодок с полной силой. Величину $S_{п}$ рассчитывают по формуле:

$$S_{п} = 0,278 V_{н} \cdot t_{п}, \text{ м.}$$

где $V_{н}$ – скорость движения поезда в начале торможения, км/ч;

$t_{п}$ – время подготовки тормозов к действию, с.

Время подготовки тормозов зависит от длины поезда, типа тормозов и типа воздухораспределителя, тормозной силы поезда и уклона на пути подготовки тормозов. Оно определяется по формуле:

$$t_{п} = a - c \cdot i / v_{т}, \text{ с.}$$

где a, c – постоянные коэффициенты, зависящие от категории поезда, типа тормозов, длины состава и числа осей;

$v_{т}$ – удельная тормозная сила поезда, Н/кН.

$t_{п} = 60$ с. – ручные тормоза;

При срабатывании автостопа $t_{п} + 14$ с.

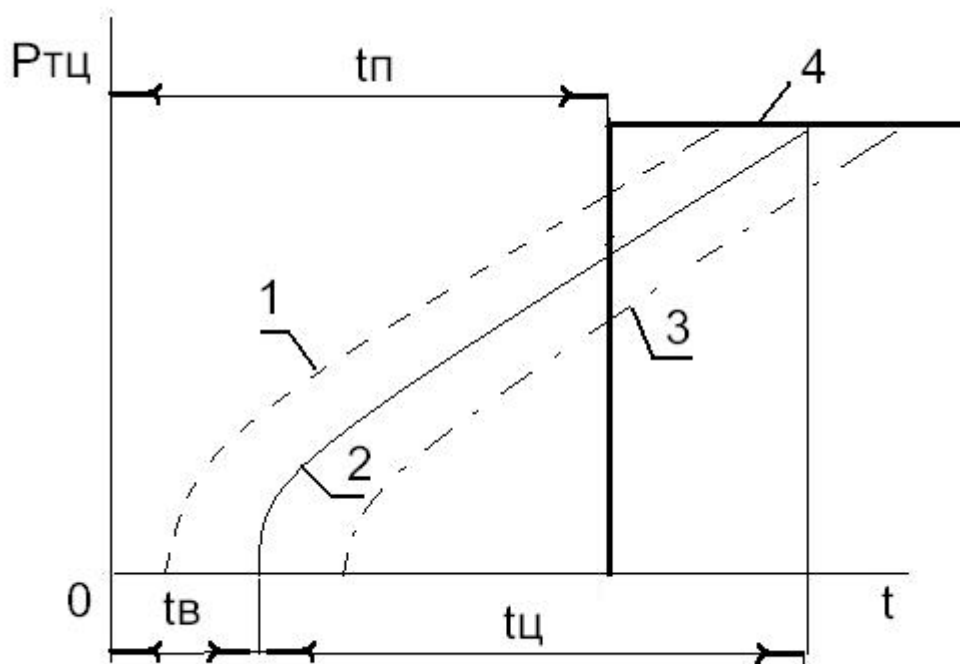
Пассажирские при пневматическом торможении $t_{п} = 4 - 5 \frac{i_{сп}}{b_i}$

Пассажирские при электропневматическом торможении $t_{п} = 2 - 3 \frac{i_{сп}}{b_i}$

При определении времени подготовки тормозов к действию принимается замена реальной диаграммы наполнения среднего в поезде тормозного цилиндра условно скачкообразной, при этом $t_{в}$ – время прохождения тормозной волны до среднего вагона поезда; $t_{ц}$ – время

наполнения тормозного цилиндра среднего вагона поезда; $t_{п}$ – время подготовки тормозов поезда к действию.

На приведенном рисунке показано условное (4) и действительное возрастание давления воздуха в начале торможения в тормозных цилиндрах головного (1), среднего (2) и хвостового (3) вагонов.



Действительный тормозной путь – это расстояние, проходимое поездом с прижатыми тормозными колодками (с полной силой) к колесным парам до полной остановки.

Действительный тормозной путь определяется по формуле:

$$S_{д} = \frac{40,85(V_{к}^2 - V_{н}^2)}{b_t + w_{ox} + g \cdot i}, м \quad S_{д} = \frac{4,17(V_{н}^2 - V_{к}^2)}{(b_t + w_{ox}) + i}, м$$

где $V_{н}$, $V_{к}$ – начальная и конечная скорости движения поезда в расчетном интервале, км/ч;

b_t – удельная тормозная сила, действующая на поезда при средней для данного интервала скорости, н/т;

i – уклон на пути торможения в соответствующем интервале скорости, ‰.

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

Нормативами задаются единые наименьшие тормозные нажатия в зависимости от категории поезда, максимальной скорости движения и спуска.

Нормативами установлены расчетные значения нажатий тормозных колодок для различных типов вагонов, локомотивов и моторвагонного подвижного состава.

На спусках круче 20 ‰ для грузовых и пассажирских поездов учитываются тормозные средства локомотива.

Расчет допускаемой (максимально допустимой) скорости в начале торможения. Методика решения тормозной задачи приводится в курсовой работе...

Расчет тормозного пути. Эта задача по определению длины тормозного пути и времени торможения решается при заданных начальной скорости торможения V_H , профиле пути на участке торможения и тормозных средствах поезда. Такой тип тормозной задачи решается графоаналитическим способом, т.е. величину S_D определяем графическим способом (или на отдельном планшете – ф. А4, или где строили $V(S)$, $t(S)$ и т.д.), а величину S_{Π} по известной формуле. Полный тормозной путь $S_T = S_{\Pi} + S_D$.

Аналогично задаче первой, но вместо одного уклона задан целый участок. Выбираем три элемента профиля: наибольший спуск $i_{\max} = i_1$, средний $i_{\text{ср}} = i_2$ и площадку $i_3 = 0$. Выполняем построения, подобные задаче 1, но для трех элементов. После этого строим график допустимых скоростей по тормозным средствам в функции спусков – $V_g^{\max} = f(i_c)$.

Расчет потребного числа тормозных осей в поезде. Задаемся величиной $V_p = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ кН/т, затем для каждого V_p строим четыре удельных равнодействующих силы поезда при электрическом торможении. По этим зависимостям строим $V = f(S)$ при электрическом торможении и с учетом S_{Π} определяем V_g^{\max} для принятых V_{Pi} , затем строим $V_g^{\max} = f(V_p)$. Зная V установ. и $V_g^{\max} = f(V_p)$ определяем требуемый тормозной коэффициент поезда $V_p^{\text{тр}}$.

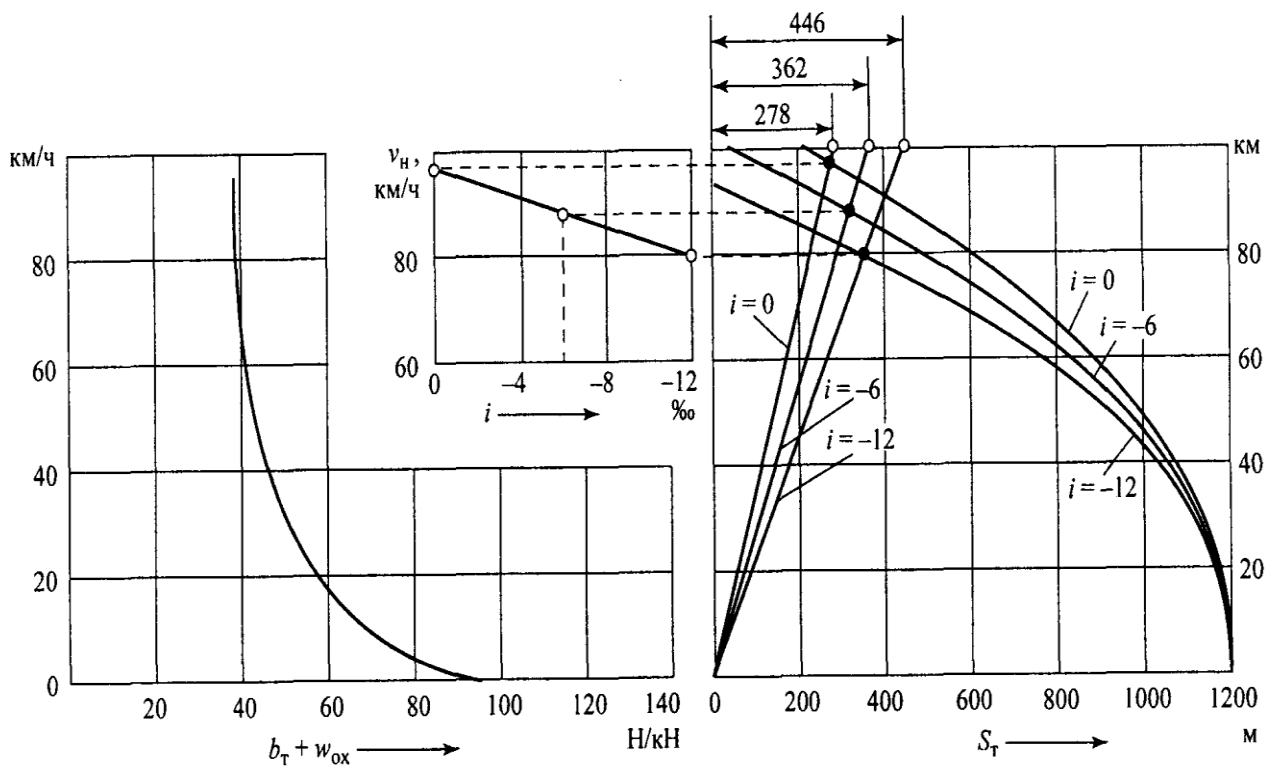


Рис.12.1 Определение ограниченной скорости движения поезда по тормозам на участке с уклоном -2‰

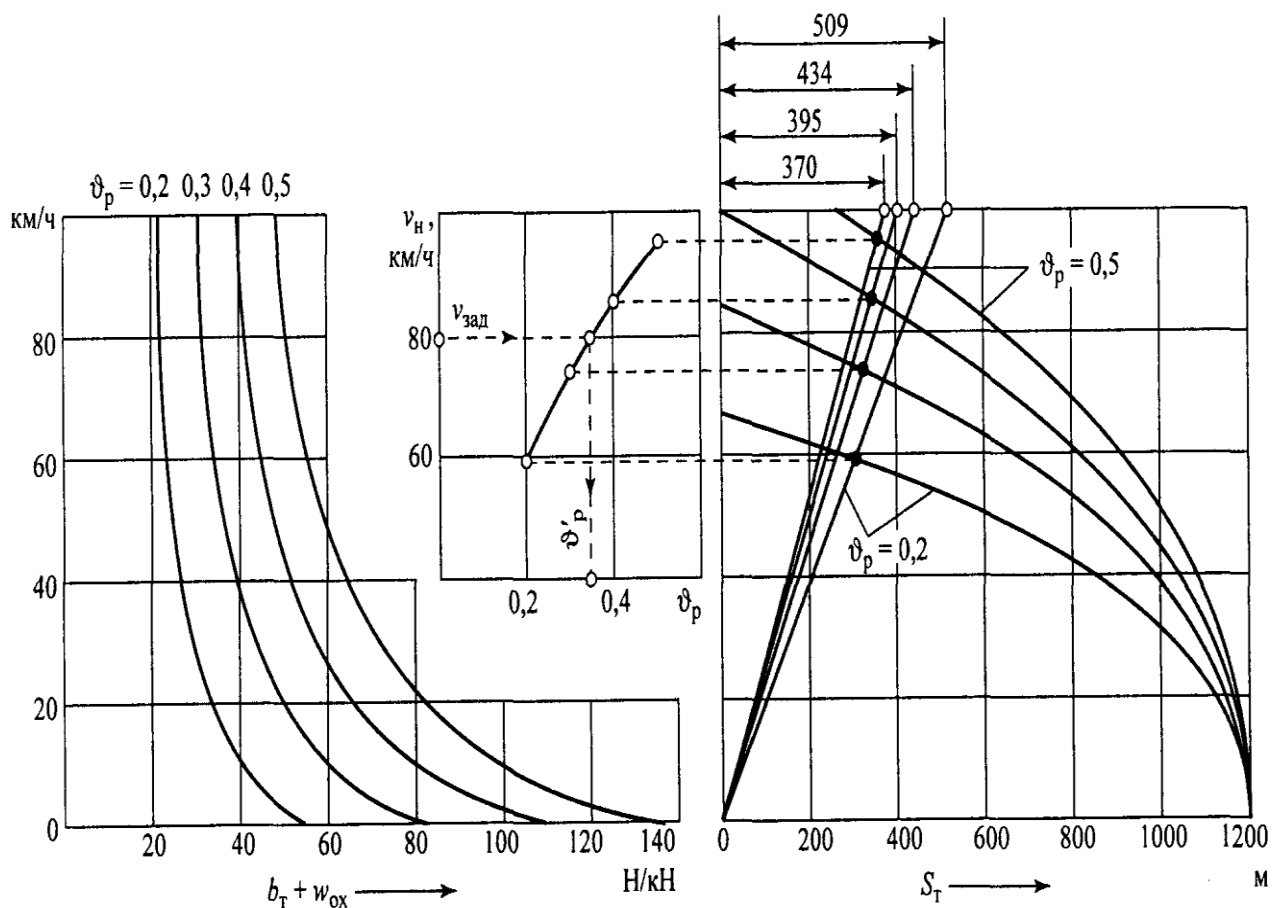


Рис. 12.2 Примеры решения тормозных задач графическим способом

Контрольные вопросы

1. Тормозная сила поезда и ее сущность.
2. Классификация режимов торможения.
3. Аналитический метод расчета тормозного пути поезда.
4. Графический метод определения тормозного пути поезда.
5. Тормозной путь поезда и его составляющие.
6. Как происходит возрастание давления воздуха в начале торможения.
7. Особенности процесса торможения поезда на спусках круче 20 ‰.
8. Методика расчета максимально допустимой скорости движения поезда в начале торможения.
9. Методы расчета тормозного пути поезда.
10. Методика определения необходимого числа тормозных осей в поезде.

Литература

1. Кузьмич В. Д., Руднев В. С., Френкель С. Я. Теория локомотивной тяги.- М.: Маршрут, 2005, 448с.
2. Деев В. В. и др. Тяга поездов. – М.: Транспорт, 1987, 264с.
3. Подвижной состав и тяга поездов. Под ред. В. В. Деева и Н. А. Фуфрянского.- М.: Транспорт, 1979, 368с.
4. Бабичков А. М., Гурский П. А., Новиков А. П. Тяга поездов и тяговые расчеты.- М.: Транспорт, 1971, 280с.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы.- М.: Транспорт, 1985, 288с.

Лекция № 13:

Методика расчета расхода электроэнергии и топлива на тягу поездов

План лекции

1. Методика построения кривой тока, потребляемого электроподвижным составом.
2. Токовая характеристика электровоза и ее особенности.
3. Методика расчета расхода электроэнергии для электровозов переменного тока на тягу поездов.
4. Методика расчета расхода электроэнергии для электровозов постоянного тока на тягу поездов.
5. Методика расчета расхода дизельного топлива тепловозами на тягу поездов.
6. Расчет удельного расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов.

Для определения расхода электроэнергии электровозом необходимо построить кривую тока, потребляемого им

При определении расхода электроэнергии электровозом переменного тока на графике строится кривая действующего значения активного тока

$I_{da} = f(s)$. При этом следует руководствоваться кривой скорости $v=f(s)$ и токовой характеристикой электровоза $I_{da} = f(s)$.

Расход электроэнергии, затраченной на перемещение поезда по участку, в кВт*ч вычисляют по формуле

$$A' = \frac{U_{\text{э}} \sum (I_{\text{дср}} \cdot \Delta t)}{60 \cdot 1000}$$

где $U_{\text{э}}$ — напряжение в контактной сети ($U_{\text{э}} = 25000 \text{ В}$);

$I_{\text{дср}}$ — среднее значение активного тока для отрезка кривой $I_{da} = f(s)$ между соседними точками перелома кривой;

Δt — соответствующий промежуток времени, который определяется по кривой

$t=f(s)$. Расчеты сводятся в таблицу. Расход электроэнергии электровозом

Расход электроэнергии на собственные нужды электровоза в кВт-ч

$$A'' = r \cdot t$$

где r — средний расход электроэнергии на собственные нужды электровоза в единицу времени, кВтч/мин;

$t = t_1 + t_2$ — полное время работы электровоза на заданном участке, мин.

Полный расход электроэнергии электровозом на заданном участке, 1кВт-ч,

$$A = A' + A''$$

Удельный расход электроэнергии в подсчитывают по формуле

$$a = \frac{A \cdot 1000}{QL}$$

где Q - масса состава

L - длина участка, для которого выполнены тяговые расчеты, км

Таблица расчета расхода электроэнергии электровозом

номера участков	Ток электровоза $I_{\text{эср}}, \text{ А}$	Δt , мин	$I_{\text{эср}} \cdot \Delta t, \text{ А} \cdot \text{мин}$
Всего			$\sum (I_{\text{эср}} \cdot \Delta t) =$

При определении расхода электроэнергии электровозом постоянного тока на графике строится кривая действующего значения активного тока $I_{da} = f(s)$. При этом следует руководствоваться кривой скорости $v=f(s)$ и токовой характеристикой электровоза $I_{da} = f(s)$.

Расход электроэнергии, затраченной на перемещение поезда по участку, в кВт*ч вычисляют по формуле

$$A' = \frac{U_{\text{э}} \sum (I_{\text{даср}} \cdot \Delta t)}{60 \cdot 1000}$$

где $U_{\text{э}}$ — напряжение в контактной сети ($U_{\text{э}} = 3000 \text{ В}$);

$I_{\text{даср}}$ — среднее значение активного тока для отрезка кривой $I_{\text{да}} = f(s)$ между соседними точками перелома кривой;

Δt — соответствующий промежуток времени, который определяется по кривой

$t=f(s)$. Расчеты сводятся в таблицу. Расход электроэнергии электровозом

Расход электроэнергии на собственные нужды электровоза в кВт-ч

$$A'' = r \cdot t$$

где r — средний расход электроэнергии на собственные нужды электровоза в единицу времени, кВтч/мин;

$t = t_1 + t_2$ — полное время работы электровоза на заданном участке, мин.

Полный расход электроэнергии электровозом на заданном участке, 1кВт-ч,

$$A = A' + A''$$

Удельный расход электроэнергии в подсчитывают по формуле

$$a = \frac{A \cdot 1000}{QL}$$

где Q - масса состава

L - длина участка, для которого выполнены тяговые расчеты, км

Таблица расчета расхода электроэнергии электровозом

номера участков	Ток электровоза $I_{\text{эсп}}, \text{А}$	Δt , мин	$I_{\text{эсп}} \cdot \Delta t, \text{А} \cdot \text{мин}$
Всего			$\sum (I_{\text{эсп}} \cdot \Delta t) =$

Расход дизельного топлива тепловозом на заданном участке в кг определяют по формуле

$$E = Gt_T + g_x t_x$$

где G - расход дизельного топлива тепловозом на режиме при положение рукоятки контроллера, кг/мин;

t_T - суммарное время работы тепловоза на режиме тяги, мин;

g_x -Расходы топлива тепловоза при включенном токе (режимы холостого хода и торможения), кг/мин

t_x -суммарное время движения тепловоза на режиме холостого хода торможения , мин

Время работы тепловоза t_T и t_x определяются по кривой времени $t = f(s)$ и отметкам об изменении режима работы тепловоза на кривой скорости $v = f(s)$

Удельный расход топлива на измеритель в кг/10⁴ ткм

$$e = \frac{E}{QL}$$

Удельный расход топлива обычно приводится к удельному расходу условного топлива в кг/10⁴ ткм

$$e_y = e\mathcal{E}$$

где \mathcal{E} - эквивалент дизельного топлива ($\mathcal{E}=1,43$)

Контрольные вопросы

1. Токовая характеристика электроподвижного состава и ее особенности.
2. Приведите токовую характеристику для электровозов переменного тока.
3. Приведите токовую характеристику для электровозов постоянного тока.
4. Методика составления таблицы для расчета расхода электроэнергии электровозами.
6. Приведите формулу для расчета расхода электроэнергии при перемещении поезда под нагрузкой.
7. Как определяют расход электроэнергии на собственные нужды электровоза.
8. Как и где определяют время хода поезда под нагрузкой и на холостом ходу.
9. Где и как берут величину расхода топлива на рабочей позиции и на холостом ходу для магистральных и пассажирских тепловозов.
10. Что означает удельный расход топлива и электроэнергии на тягу поездов.
11. Расход топлива и электроэнергии за поездку показывает, что...?

Литература

1. Кузьмич В. Д., Руднев В. С., Френкель С. Я. Теория локомотивной тяги.- М.: Маршрут, 2005, 448с.
2. Деев В. В. и др. Тяга поездов. – М.: Транспорт, 1987, 264с.
3. Подвижной состав и тяга поездов. Под ред. В. В. Деева и Н. А. Фуфрянского.- М.: Транспорт, 1979, 368с.
4. Бабичков А. М., Гурский П. А., Новиков А. П. Тяга поездов и тяговые расчеты.- М.: Транспорт, 1971, 280с.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы.- М.: Транспорт, 1985, 288с.

