

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Федеральное государственное университетский центр транспорта  
Санкт-Петербургский государственный университет

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ



**Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта**

**Московский государственный университет путей сообщения**

**Самарская государственная академия путей сообщения**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ**

**Под редакцией  
профессора В.П. Феоктистова  
профессора Ю.Е. Просвинова**

**Рекомендовано учебно-методическим объединением в качестве учебника  
для студентов вузов железнодорожного транспорта**

**Москва Самара  
2006**

УДК 629.423  
ББК 39.232.  
Э 45

**Рецензенты:**

Профессор, заведующий кафедрой «Подвижной состав  
и энергоснабжение железных дорог и метрополитена» РАПС  
*Э.Э. Ридель*

Заместитель начальника  
Отдела Департамента технической политики ОАО «РЖД»  
*Н.А. Сидоров*

Генеральный директор ЗАО «Кронид-ЭЛ»  
*В.Н. Ляпустин*

**Авторы:**

Профессор **В.П. Феоктистов** (главы 1 и 2, словарь терминов);  
профессор **Г.Г. Рябцев** (глава 2); профессор **Ю.Е. Просви́ров** (главы 4, 6, 7  
и 8, словарь терминов); профессор **В.Н. Пупынин** (глава 5), профессор  
**Е.К. Рыбников** (глава 3, словарь терминов); доцент **С.В. Володин** (глава 3);  
доцент **В.В. Иванов** (глава 8)

Э 45 **Электрические железные дороги** [Текст] : учебник / под ред. проф. В.П. Феоктистова, проф. Ю.Е. Просви́рова ; Моск. ун-т путей сообщения; Самарская гос. акад. путей сообщения. – Самара : СамГАПС, 2006. – 312 с. – 500 экз. – ISBN 5-98941-032-8; ISBN 5-7876-0020-7.

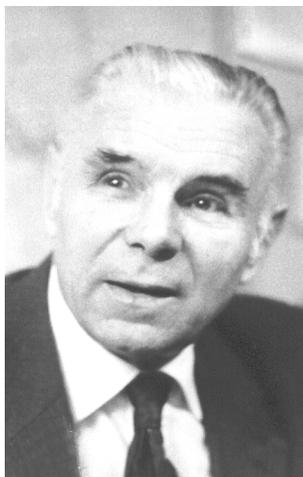
Приведены основные сведения об электрических железных дорогах, описана конструкция основных узлов и агрегатов электроподвижного состава, рассмотрены вопросы электроснабжения электрических железных дорог, эксплуатационной деятельности железных дорог, локомотивного хозяйства. Учебник рассчитан на студентов специальности 190303 «Электрический транспорт железных дорог». Отдельные разделы могут использоваться студентами других специальностей.

УДК 629.423  
ББК 39.232

ISBN 5-7876-0020-7  
ISBN 5-98941-032-8

© МИИТ, 2006  
© СамГАПС, 2006

**Игорю Петровичу Исаеву,  
посвящается**



**19 (06).08.1916 – 27.11.2001**

Эта книга посвящена выдающемуся ученому в области железнодорожного транспорта, заслуженному деятелю науки и техники РСФСР, профессору, академику Российской Академии транспорта ИСАЕВУ Игорю Петровичу.

Нет уголка на просторах нашей страны, где бы специалисты железнодорожного транспорта не знали этого имени. Инженеры, научные работники, руководители многих организаций железнодорожного транспорта, бывшие и теперешние студенты знают его не только как преподавателя, профессора, заведующего кафедрой, но и как ученого, автора и соавтора длинного ряда учебников по многим отраслям знаний железнодорожного транспорта.

Везде, где есть выпускники вузов нашей отрасли, есть частичка Игоря Петровича ИСАЕВА. Он подготовил шестьдесят кандидатов и девять докторов технических наук. Его научная школа, основанная на применении методов теории вероятностей и математической статистики, статистической физики, а также теории случайных процессов открыла новую страницу в исследовании, изучении и решении насущных задач железнодорожного транспорта. Статистические расчеты при определении надежности работы локомотивов, силы тяги, коэффициента сцепления, показателей динамических качеств электрического подвижного состава, виброустойчивости механического, электросилового и электронного оборудования электровозов позволили значительно повысить эффективность использования их работы, что в полной мере было реализовано на сети железных дорог России и стран СНГ.

Его многократно переиздававшийся учебник по основам теории электрической тяги стал настольной книгой не для одного поколения инженеров-электромехаников путей сообщения.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие

Глава 1. Система локомотивной тяги на отечественных железных дорогах

- 1.1. Подвижной состав железных дорог
- 1.2. Виды тяги – автономные и неавтономные
- 1.3. Особенности электрической тяги – непрерывное взаимодействие э.п.с. и системы электроснабжения железной дороги
- 1.4. Механика движения поезда
- 1.5. Режимы движения поезда
- 1.6. Природа сил, действующих на поезд
- 1.7. Определение массы поезда
- 1.8. Энергетика движения поезда
- 1.9. Эффективность электрической тяги
- 1.10. Перспективные виды систем электрической тяги

Глава 2. Электрическое оборудование электрического подвижного состава

- 2.1. Основные элементы силовой цепи э.п.с. постоянного тока
- 2.2. Основные элементы силовой цепи э.п.с. переменного тока
- 2.3. Электрическое оборудование цепей управления э.п.с.
- 2.4. Защита электрического оборудования э.п.с.
- 2.5. Вспомогательное оборудование э.п.с.
- 2.6. Расположение электрооборудования на э.п.с.

Глава 3. Механическая часть электровозов и электропоездов постоянного и переменного тока

- 3.1. Общие сведения
- 3.2. Назначение основных узлов и классификация механической части
- 3.3. Устройство тележек электроподвижного состава
- 3.4. Устройство колёсных пар, букс и рам тележек
- 3.5. Кузова электровозов и электропоездов
- 3.6. Взаимодействие колесных пар и рельсового пути
- 3.7. Рессорное подвешивание, его характеристика

Глава 4. Железнодорожный путь

- 4.1. Основы устройства железнодорожного пути, план и профиль. Габариты
- 4.2. Земляное полотно, верхнее строение пути
- 4.3. Рельсы, крепления, шпалы, стрелочные переводы
- 4.4. Понятие об устройстве рельсовой колеи
- 4.5. Искусственные сооружения, их виды и назначение

## Глава 5. Электроснабжение электрических железных дорог

- 5.1. Системы тяги и тягового электроснабжения
- 5.2. Классификация и структурные схемы тяговых подстанций
- 5.3. Защита систем тягового электроснабжения от перегрузок и коротких замыканий
- 5.4. Контактные сети и железнодорожные высоковольтные линии электропередачи

## Глава 6. Автоматика, СЦБ и связь

- 6.1. Автоблокировка, принципы ее работы
- 6.2. Полуавтоматическая блокировка
- 6.3. Диспетчерская централизация
- 6.4. Устройства автоматики и телемеханики на станциях
- 6.5. Автоматическая локомотивная сигнализация. Автостоп
- 6.6 Связь на железнодорожном транспорте

## Глава 7. Организация эксплуатационной работы

- 7.1. Грузовая работа. Пассажирские перевозки
- 7.2. План и порядок формирования поездов. Порядок приема, отправления и движения поездов
- 7.3. Пропускная и провозная способности. График движения поездов. Основные показатели эксплуатационной работы.
- 7.4. Оперативное планирование и руководство поездной работой. Функции поездного диспетчера. Роль дежурного по отделению дороги

## Глава 8. Организация эксплуатации и ремонта локомотивов

- 8.1 Структура локомотивного хозяйства. Классификация и распределение локомотивного парка
- 8.2 Показатели использования локомотивов. Способы обслуживания поездов локомотивами и локомотивов бригадами
- 8.3 Локомотивные бригады
- 8.4 Экипировка локомотивов
- 8.5 Основы технического обслуживания и ремонтов локомотивов

Словарь железнодорожных терминов

Библиографический список

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрические железные дороги являются основой нашей транспортной системы, они реализуют около 75% всего грузооборота железнодорожного транспорта. Ещё на рубеже 50 - 60-х годов СССР вышел на первое место в мире по протяжённости железных дорог с электрической тягой и по выполняемому ими грузообороту, а также по количеству и по суммарной мощности выпускаемого нашими заводами электроподвижного состава - электровозов и электропоездов.

Столь значительные количественные показатели сопровождались соответствующим развитием научно-исследовательских и конструкторских разработок по электрической тяге и электровозостроению. Поэтому электрические железные дороги представляют собой самостоятельную транспортную отрасль со своей специфической технической базой, включающей подвижной состав и энергоснабжение, со своей отраслевой наукой, а также с инфраструктурой, опирающейся на те отрасли транспортного машиностроения и электротехнической промышленности, которые обеспечивали производство оборудования для технической базы электрических железных дорог. В эту инфраструктуру входят такие строительные организации, обеспечивающие электрификацию: монтаж контактной сети, подстанций, линий электропередач, реконструкцию локомотивных и мотор-вагонных депо.

Благодаря этому, как у нас, так и за рубежом электрические железные дороги выделились в самостоятельный вид транспорта и ему соответствует самостоятельная инженерная специальность и комплекс учебных дисциплин. Первый в мире учебный курс «Электрические железные дороги» начал читать в 1907 г. в Петербургском технологическом институте академик Графтио Генрих Осипович - один из основоположников электрической тяги в России, несомненная заслуга которого состоит в том, что он развивал теорию электрификации железных дорог как составную часть комплексной электрификации России. Он рассматривал электрификацию как ключевую отрасль научно-технического прогресса на транспорте, в промышленности и сельском хозяйстве.

Данный учебник продолжает отечественную традицию лидирующей роли электрификации, заложенную академиком Графтио Г.О., и представляет собой расширенный вводный курс для студентов при подготовке инженеров в области эксплуатации электрических железных дорог, а также по электровозостроению. При этом соблюден принцип построения интегрированного курса, поскольку всё, относящееся к электрическим железным дорогам, рассматривается как единая и самостоятельная научная и учебная дисциплина.

Этот учебник позволяет изучить принципы электрической тяги, режимы работы электроподвижного состава постоянного и переменного токов магистрального и пригородного сообщений.

Авторы учебника надеются, что оно будет полезным не только студентам транспортных вузов и техникумов, но также и локомотивным бригадам, ремонтному персоналу и всем желающим познакомиться с принципами и особенностями работы электрической железной дороги.

Замечания и отзывы просим присылать по адресам:

101475, Москва, ул. Образцова, 15, МИИТ, кафедра «Электрическая тяга»;

443066, Самара, 1-й Безымянный пер., 18, СамГАПС, кафедра «Локомотивы».

# 1. СИСТЕМА ЛОКОМОТИВНОЙ ТЯГИ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

## 1.1. Подвижной состав железных дорог

В технике железнодорожного транспорта выделяют подвижной состав, т.е. локомотивы и вагоны, а также инфраструктуру, т.е. неподвижные устройства (путь, искусственные сооружения и т.д.). Классификация подвижного состава приведена на рис. 1.1. подвижной состав разделяют на тяговый подвижной состав и вагоны.

Подвижной состав железных дорог									
Тяговый подвижной состав					Нетяговый подвижной состав (вагоны)				
локомотивы		мотор-вагонные поезда			грузовые			пассажирские	
грузовые	пассажирские	маневровые	пригородные	местные	скоростные	универсальные	специализированные	До 160 км/ч	До 200 км/ч

*Рис. 1.1. Классификация подвижного состава железных дорог*

Движение поездов на железнодорожном транспорте осуществляется с помощью тягового подвижного состава. К нему относятся локомотивы и мотор-вагонный подвижной состав; последний состоит из моторных и прицепных вагонов. Мотор-вагонные поезда (электрические и дизельные) эксплуатируются в составах постоянного формирования. На локомотивах и моторных вагонах энергия, полученная от первичного источника, превращается в механическую энергию движения поезда (путем создания касательной силы тяги в точках контакта колес с рельсами).

Первоначально преобразование тепловой энергии, получаемой при сжигании топлива, в механическую производилось установкой с паровым котлом и паровой машиной. Локомотивы с такими установками получили название паровозов – это были первые локомотивы железных дорог.

В дальнейшем на смену паросиловым установкам пришли более совершенные тепловые двигатели: дизели и газовые турбины. Локомотивы с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (дизелями) называются тепловозами, а локомотивы с газотурбинными установками – газотурбовозами.

Паровозы, тепловозы и газотурбовозы являются автономными локомотивами, т.е. механическая энергия для движения поездов вырабатывается в результате сгорания топлива на самом локомотиве.

Развитие транспортной техники и развитие энергетики привело к созданию локомотивов и моторных вагонов неавтономной тяги. В отличие от автономного тягового подвижного состава здесь первичная (электрическая) энергия поступает на локомотив или моторный вагон от внешних источников. На самом локомотиве или моторном вагоне осуществляется лишь преобразованием электрической энергии в механическую энергию движения поезда. Неавтономный тяговый подвижной состав получает электропитание от электрической энергосистемы через тяговые подстанции и контактную сеть, расположенную над железнодорожными путями. При электрической тяге мощность локомотивов не ограничена первичным двигателем; поэтому электровозы имеют большие мощности на каждую ось в сравнении с автономными локомотивами.

Коэффициент полезного действия локомотива, характеризующий степень использования тепла сгорания топлива для получения полезной работы, тем выше, чем совершеннее первичная энергетическая установка. Энергия, потребляемая неавтономными локомотивами, вырабатывается на электростанциях.

Коэффициент полезного действия электротяги при питании от тепловых электростанций составляет 25–26%. При этом тепловые электростанции работают, как правило, на дешевых видах топлива (бурый уголь, торф). Если учесть долю гидроэлектростанций в электроснабжении электрических железных дорог, то КПД электротяги повышается до 32%.

Автономные локомотивы в зависимости от типа теплового двигателя и степени его использования имеют КПД достигающий у тепловозов 29–31%, а паровозов 5–7%. За счет улучшения использования и повышения экономичности дизеля КПД тепловоза может быть несколько повышен. КПД газотурбовоза пока еще несколько ниже, чем у тепловоза. Однако существенным преимуществом газовой турбины является её небольшой вес – она в 4–6 раз легче дизеля, такой же мощности. Это позволяет создавать газотурбовозы, идентичные по мощности электровоза.

Тяговые электродвигатели у электровозов позволяют при движении на расчетных подъемах работать на режимах с нагрузками, превышающими номинальные, если при этом перегрев обмоток электродвигателей не превышает допустимых пределов. У моторных вагонов электродвигатели обычно работают с токами больше номинальных во время пуска (разгона) поезда, что важно для пригородного сообщения с частыми остановками.

Электровозы могут при торможении возвращать в тяговую сеть часть энергии движения поезда (рекуперативное торможение). Эксплуатационные затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт электровозов примерно в 2–3 раза ниже, чем при автономных локомотивах. Провозная способность электрифицированных линий значительно превышает провозную способность неэлектрифицированных железных дорог. Элек-

тровоzy имеют значительно больший срок службы, ремонт и обслуживание их проще, чем тепловозов.

Вместе с тем введение электрической тяги требует больших капиталовложений (устройство контактной сети, линий электропередачи, тяговых подстанций). Однако они быстро окупаются на железных дорогах с большой интенсивностью движения. Поэтому электрическая тяга нашла широкое применение на наиболее грузонапряженных и тяжелых по профилю линиях, а также в пригородном пассажирском движении.

По роду работы локомотивы подразделяются на грузовые, пассажирские и маневровые. Грузовые локомотивы должны развивать силу тяги, позволяющую водить поезда большой массы до 6000 т. Пассажирские локомотивы предназначены для вождения более легких поездов, но с большими скоростями.

Моторвагонный подвижной состав на электрифицированных линиях состоит из электровагонов, включаемых в электропоезда; на неэлектрифицированных линиях применяют дизель-поезда. В отличие от локомотивов моторные вагоны служат не только для тяги поезда, а используются одновременно и для размещения и перевозки пассажиров.

Сила тяги, которая вызывает перемещение поезда, появляется в результате взаимодействия колес локомотива или моторного вагона с рельсами при передаче вращающего момента от двигателя к колесным парам.

Применение на электровозах или тепловозах тяговых электродвигателей дает возможность использовать как индивидуальный, так и групповой привод. При индивидуальном приводе каждая движущая колесная пара соединена со своим тяговым двигателем зубчатой передачей. При групповом приводе движущие колесные пары, размещенные в одной жесткой раме, соединяются между собой промежуточными зубчатыми колесами, но все колесные пары получают вращение от одного двигателя.

Если число колесных пар не превышает шести, локомотив всегда выполняется с одним кузовом. Такой локомотив называется односекционным. При большом числе колесных пар кузов локомотива оказывается слишком длинным и тяжелым, что сильно усложняет его конструкцию и затрудняет прохождение кривых. Поэтому такие локомотивы обычно выполняются не с одним, а с двумя и даже с тремя самостоятельными кузовами (секциями), соединенными между собой автосцепками или специальными шарнирными соединениями. Такие локомотивы называются двух- или трехсекционными. В некоторых случаях оборудование многосекционных локомотивов позволяет каждой его секции самостоятельно водить поезда. В последнее время односекционными стали выполнять и 8-осные локомотивы (электровоз ЭП200).

Расположение колесных пар в экипаже, род первичного двигателя, связи от тяговых электродвигателей к колесным парам и способ передачи тягового усилия принято выражать осевой характеристикой, в которой цифрами показывается число колесных пар. В осевой характеристике знак «—» означает, что обе тележки несочлененные – не связаны шарнирно – и тяговое усилие от движущих колесных пар к автосцепке локомотива пере-

дается через рамы тележки. Знак «+» указывает, что тележки сочлененные – соединены между собой и сила тяги передается через раму кузова.

Если движущие колесные пары имеют индивидуальный привод, то к цифре, показывающей число осей в тележке, добавляется индекс «0». Так, электровоз с осевой характеристикой  $3_0+3_0$  представляет собой локомотив с двумя сочлененными трехосными тележками и с индивидуальным приводом движущих колесных пар. Тепловоз с осевой характеристикой  $2(3_0-3_0)$  – двухсекционный локомотив, каждая секция которого имеет две трехосные тележки с индивидуальным приводом движущих колесных пар и может работать самостоятельно. Если же секции не могут работать самостоятельно, то осевая характеристика в данном случае имела бы вид  $3_0-3_0-3_0-3_0$ .

На железных дорогах широко применяют, особенно при тяжелых поездах, кратную тягу, т.е. совместную работу нескольких локомотивов. В связи с этим многие электровозы и тепловозы имеют оборудование, позволяющие им работать по системе нескольких (многих) единиц, что дает возможность помощью электрических цепей управлять всеми секциями локомотива или локомотивов из одной кабины машиниста; достигается точно согласованная и синхронная работа локомотивов и отпадает необходимость иметь на каждом из них полный состав локомотивных бригад. Особенно широко управление по системе многих единиц используется на электропоездах и дизель-поездах. Здесь поезд составляют из нескольких постоянных по составу поездных единиц – секций.

Каждая секция включает в себя один моторный вагон и несколько (обычно один или два) прицепных (немоторных вагонов). Управляют таким поездом из одной кабины, расположенной в головном вагоне.

На железных дорогах страны эксплуатируются электровозы около 20 серий и модификаций. Одним из самых мощных является двухсекционный 12-осный электровоз ВЛ85 с рекуперативным торможением, предназначенный для работы на магистральных, электрифицированных по системе однофазного переменного тока напряжением 25 кВ. электровоз состоит из двух шестиосных секций; кузов каждой из них подвешен на трех двухосных тележках. Электровоз может водить поезда массой 6000 т и более. Для вождения более тяжелых поездов и для работы на участках с более трудным профилем предусмотрена возможность работы двух электровозов при управлении одним машинистом из кабины любой секции. На электровозе предусмотрено автоматическое управление режимом движения. Мощность локомотива 10 000 кВт, сила тяги 740 кН, конструкционная скорость 110 км/ч.

В числе новых локомотивов грузовой 12-осный электровоз ВЛ15, он предназначен для вождения тяжеловесных поездов на магистральных участках с напряжением 3000 В постоянного тока. Мощность локомотива 9000 кВт, сила тяги 657 кН, конструкционная скорость 100 км/ч.

Современные электровозы и тепловозы могут совершать пробег между экипировками в зависимости от массы поездов и профиля пути до 1200 км, а между техническими обслуживаниями – от 1200 до 2000 км.

К электрическому подвижному составу относятся электровозы и электрические моторные вагоны. В зависимости от рода применяемого тока различают электровозы постоянного и переменного тока и двойного питания; также различаются и электропоезда.

Электровозы и моторвагоны состоят из механической части, электрического оборудования и имеют пневматические системы. К механической части современного электровоза или моторвагона относятся кузов и тележки. Электрическое оборудование состоит из тяговых электродвигателей, вспомогательных электрических машин, аппаратуры для управления двигателями и вспомогательными машинами, а на электроподвижном составе переменного тока и двойного питания, кроме того, – из трансформаторов и преобразователей тока (выпрямителей для питания электродвигателей переменного тока или автономных инверторов для питания асинхронных электродвигателей).

### ***1.2. Виды тяги – автономные и неавтономные***

В различных регионах мира и даже в отдельных странах железнодорожный транспорт отличается своеобразием применяемых решений. Здесь необходимо иметь в виду такие параметры, как ширина колеи и габариты (подвижного состава и приближения строений), предельно допустимые осевые нагрузки (15–33 т/ось), скорость движения поездов, типаж локомотивов и вагонов. Одна из принципиальных особенностей связана с использованием принципа автономности или неавтономности тяги. Обычно любая страна использует оба указанных рода тяги, но сочетание долей их участия в перевозочном процессе существенно различно. Например, в США преобладает автономная тяга с использованием самых мощных в мире тепловозов. В Швейцарии и Норвегии почти все перевозки осуществляются на неавтономной (электрической тяге) – причина состоит в чрезвычайно низкой цене электроэнергии, получаемой на гидроэлектростанциях, построенных на горных реках). Поэтому можно сделать вывод о том, что развитие железнодорожного транспорта, как системы и создание новых видов локомотивов и в целом локомотивной тяги, определялось в каждой стране ее экономическим потенциалом, наличием энергетических и сырьевых ресурсов, производственной базой, уровнем подготовки инженерных кадров, способных возглавить научно-технический прогресс, состоянием транспортного машиностроения и электротехнической промышленности.

В мире и в целом пройден огромный и трудный путь исторического развития в локомотивостроении и тяге поездов от традиционного колеса паровоза до магнитного подвешивания высокоскоростных электропоездов (400–500 км/ч). К последним относятся построенная в Москве и введенная в эксплуатацию эстакадная монорельсовая дорога с линейными электродвигателями.

Ниже эта проблема рассматривается применительно к конкретным условиям железных дорог России.

Исторически на железных дорогах России, как и в других странах, сложились два вида тяги. При одном из них (автономная тяга) на локомотивах находятся полные запасы топлива, расходуемые на выработку энергии, необходимой для движения поезда. Запасы топлива, воды и смазки по мере их расходования пополняют обслуживающие бригады в специальных заправочных (экипировочных) пунктах на участковых станциях.

Локомотивы другого вида тяги не имеют на борту собственного источника энергии, а получают питание извне, т.е. централизованно: через контактную сеть от тяговых подстанций, специально сооружаемых при электрификации железных дорог. Тяговые подстанции получают электроэнергию от единой энергосистемы ЕЭС, в составе которой в России находятся более 100 крупных электростанций – тепловых (73%), гидравлических (15%) и атомных (12%).

Отсюда и получили свое название эти виды тяги: первая – автономная, вторая – неавтономная. Их классификация приведена на рис.1.2.

Если рассматривать эту проблему в историческом аспекте, то нужно начать анализ с автономных локомотивов, потому что они появились первыми. Сначала они использовали паровые машины (самые простые тепловые двигатели), потом – двигатели внутреннего сгорания (дизели). Предпринимаются также попытки использования газовых турбин (газотурбовозы).

Локомотивы автономной тяги подразделяют по наиболее характерному признаку – принципу действия их тепловых машин. Такими на паровозах являются паровые машины – в них используется пар, вырабатываемый паровым котлом. На тепловозах используют дизели – двигатели внутреннего сгорания, работа которых основана на самовоспламенении топлива, подаваемого в цилиндры при его сжатии. На газотурбовозах установлены газовые турбины, широко применяемые в авиации.

На неэлектрифицированных участках дорог пригородные и местные пассажирские перевозки осуществляют дизель-поезда. Два крайних их вагона являются моторными, часть пассажирского помещения в них занимают дизельные установки. В каждом поезде имеется от одного до четырех прицепных вагонов для размещения пассажиров. В газотурбовозах источником энергии, вырабатываемой для движения поезда, является установка с газотурбинными двигателями. Газотурбовозы пока менее экономичны, чем дизельный подвижной состав, и поэтому не получили широкого распространения. К тому же ресурс (срок службы) газовой турбины в 10–15 раз меньше, чем у дизеля.

Локомотивы неавтономной тяги – электрической классифицируют также на основе ее наиболее характерного признака – по роду тока и напряжению в контактной сети. На отечественных дорогах применяются две системы: постоянного тока напряжением 3 кВ и однофазного переменного тока напряжением 25 кВ стандартной частоты 50 Гц.

Чем выше напряжение в электрической цепи, тем меньше потери энергии при передаче ее на расстояние. Поэтому стремятся иметь в контактной сети возможно более высокое напряжение, изыскивая экономич-

ные способы преобразования его до значения, подходящего для питания тяговых двигателей.

Однако в условиях СССР и России преимущественное распространение получила электрическая тяга. Такая тенденция характерна для большинства стран Евросоюза, Японии, Китая, Кореи.

В России на электрической тяге выполняется свыше 80% грузооборота и эта доля постоянно растет.

### ***1.3. Особенности электрической тяги – непрерывное взаимодействие электроподвижного состава и системы электроснабжения железной дороги***

Электрическая тяга на железных дорогах предполагает питание электроподвижного состава (э.п.с.), т.е. электровозов и электропоездов, по сложной электрической цепи (рис. 1.3), которая включает:

- электростанции Э (тепловые, гидравлические и атомные), причем все электростанции вырабатывают 3-фазное переменное напряжение частотой 50 Гц. В России долевое участие указанных электростанций в общем энергобалансе страны можно оценить примерно как 73, 15 и 12%;
- линии электропередачи ЛЭП, по которым вырабатываемая электростанциями электроэнергия переменного тока передается потребителям (обычно магистральные ЛЭП выполняются на напряжение 500–1000 кВ);
- районные распределительные подстанции РРП, расположенные в крупных городах и промышленных центрах. От этих подстанций питаются все потребители электроэнергии (заводы, крупные предприятия, городские районы, железные дороги), причем вся совокупность Э + ЛЭП + РРП образует единую энергетическую систему страны ЕЭС;
- тяговые подстанции ТП, получающие питание от РРП 3-фазным переменным напряжением обычно 220 кВ и преобразующие это напряжение в постоянное напряжение 3,3 кВ или в однофазное переменное напряжение 27,5 кВ 50 Гц;
- тяговую сеть, состоящую из контактной сети, подвешенной на опорах, и рельсовой цепи, называемой также цепью обратного тока (ее образуют ходовые рельсы, соединенные по стыкам специальными электрическими перемычками);

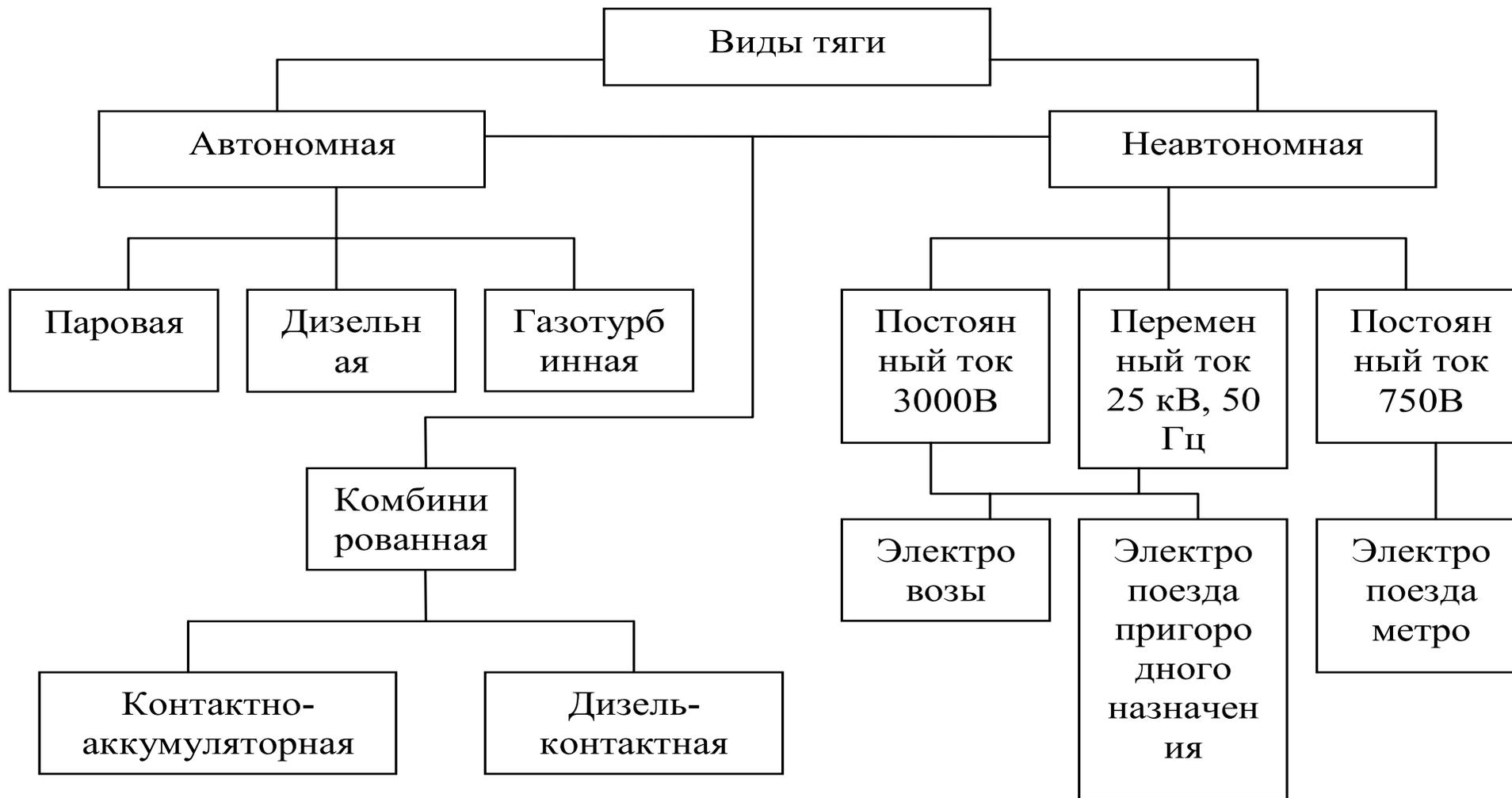
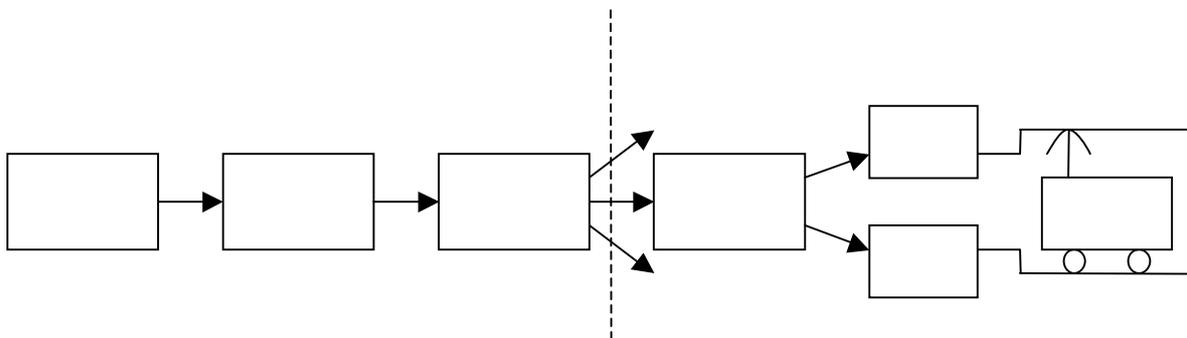


Рис. 1.2. Классификация видов тяги

- Э.п.с., который получает электроэнергию в любой системе электрической тяги по двум проводникам – по контактной сети посредством верхнего токоприемника и по рельсовой цепи через колесные пары, на которых установлены специальные токосъемники (графитовые щетки).



*Рис.1.3. Полная электрическая цепь системы электрической тяги на железнодорожном транспорте*

Особенность электрической тяги заключается в неразрывной связи режимов работы э.п.с. и устройств электроснабжения: для перемещения поезда э.п.с. отбирает из контактной сети необходимое количество энергии.

Система электроснабжения электрической железной дороги как постоянного, так и переменного токов имеет своим назначением обеспечение нормального снабжения электроэнергией э.п.с. при всех его нагрузочных режимах.

На рис. 1.4 показан участок электрифицированной железной дороги. Контактная подвеска состоит из несущего троса и подвешенных к нему на струнах контактных проводов, которые удерживаются фиксаторами примерно по оси пути, зигзагом от опоры к опоре  $\pm 20$  см для обеспечения равномерного износа токоприемника.

На опорах контактной сети, со стороны, противоположной контактной подвеске, располагаются, как правило, воздушные линии СЦБ, дополнительные провода питающих линий и др.

В процессе движения поездов меняется их взаимное расположение на участках, ток нагрузки и скорость поезда, так как каждый из них находится в данный момент на элементе профиля пути, оказывающем свое сопротивление движению. В зависимости от профиля участка одни электровозы могут работать в режиме тяги, другие в режиме рекуперации, т.е. они возвращают энергию в сеть.

Все это вызывает изменение нагрузок тяговых подстанций, а следовательно, и напряжения в электрической цепи от тяговой подстанции до токоприемника каждого электровоза или электропоезда. Так как это напряжение подводится к тяговым двигателям, то его изменение влияет, в свою очередь, на режим работы э.п.с.

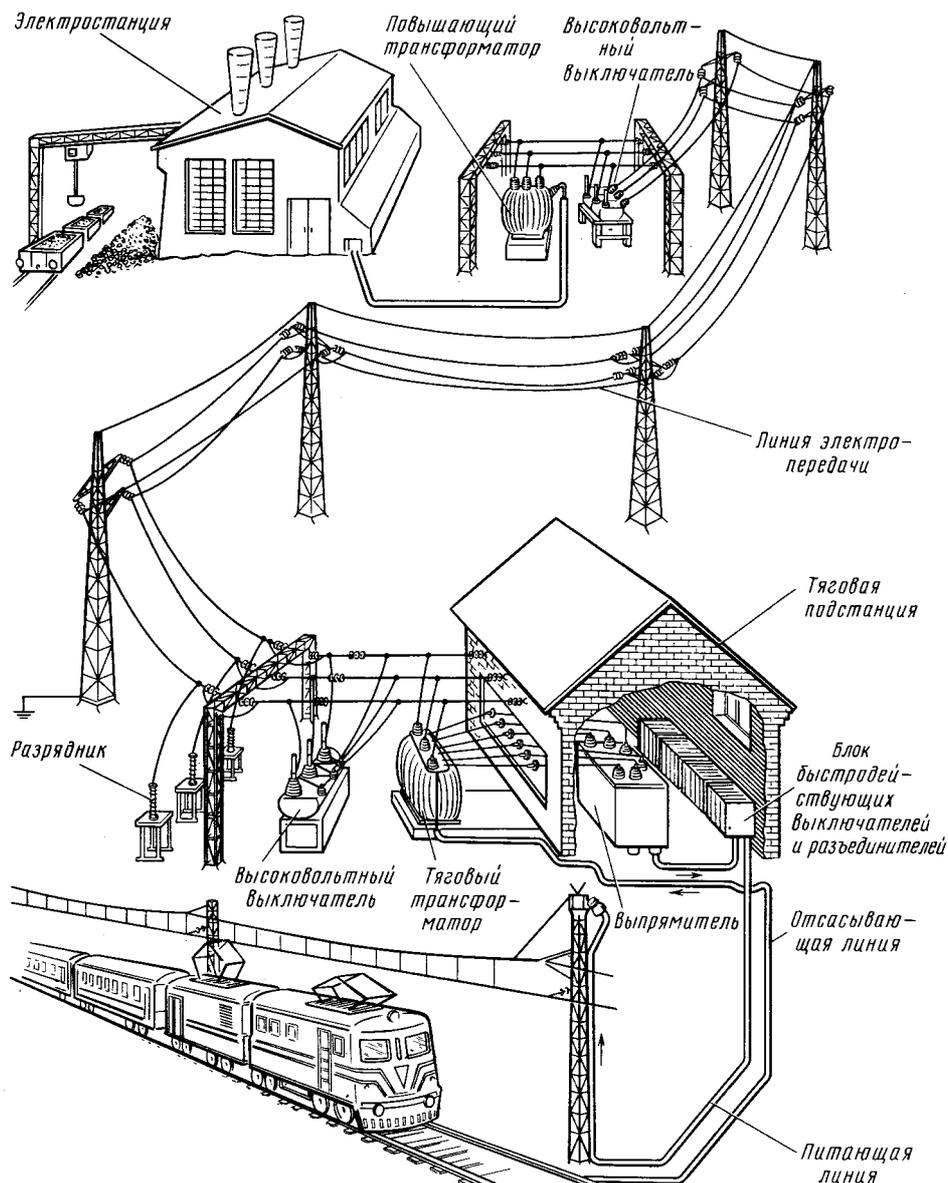


Рис.1.4. Участок электрифицированной железной дороги постоянного тока и питающих его устройств

При определении влияния изменения напряжения в контактной сети на скорость движения э.п.с. различают длительные отклонения по времени и кратковременные колебания напряжения.

Изменения напряжения в контактной сети, сохраняющиеся длительное время, в течение которого может измениться скорость движения поезда, называют отклонениями напряжения. Если же эти изменения происходят настолько быстро, что скорость движения поезда в силу его инерции изменится не успеет, говорят о колебаниях напряжения.

Уровень напряжения в сети регламентирован требованиями стандартов. Номинальное напряжение на токоприемнике э.п.с. постоянного тока установлено равным 3кВ, переменного тока 25кВ. Наибольшее допустимое напряжение на токоприемнике э.п.с. постоянного тока не должно превышать 3,85кВ (4кВ на участках с рекуперацией энергии), на токоприемнике э.п.с. переменного тока 29кВ, наименьшее напряжение на дорогах постоянного тока 2,4 кВ, на дорогах переменного тока 19 кВ.

Пониженное напряжение на токоприемнике э.п.с., сохраняющееся длительное время, вызывает пропорциональное снижение скорости движения поезда. Сила же тяги э.п.с., определяемая вращающим моментом его тяговых двигателей не зависит от подводимого к ним напряжения. При понижении напряжения скорость движения поезда будет уменьшаться до тех пор, пока снова не наступит равновесие между изменившимся сопротивлением движению поезда и силой тяги. Этому будет соответствовать несколько меньшее значение силы тяги, чем предшествующее моменту понижения напряжения, так как сила сопротивления движению поезда уменьшилась из-за снижения его скорости. Этот процесс характеризуют кривые, приведенные на рис. 1.5.

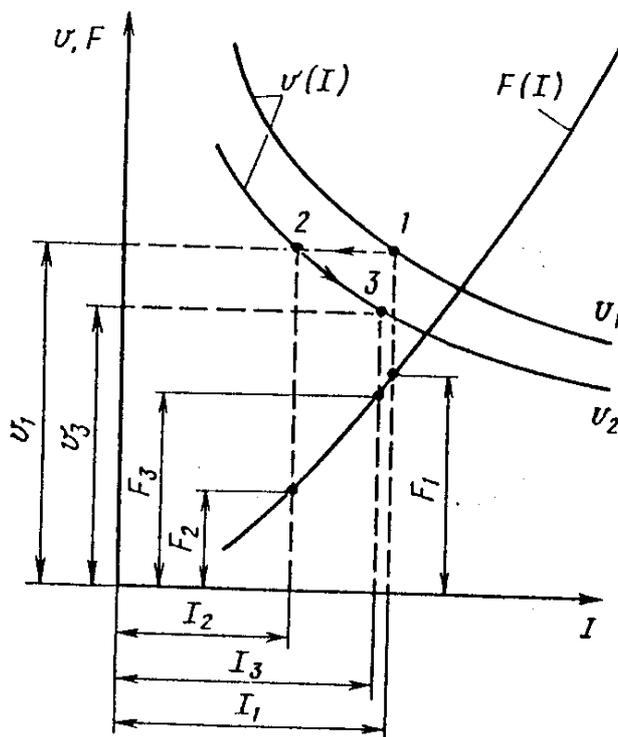


Рис.1.5. Установившемуся режиму работы тягового двигателя последовательного возбуждения при напряжении на его зажимах  $U_1$  соответствует точка 1 (ток двигателя  $I_1$ , сила тяги  $F_1$ ). В момент, когда резко снижается напряжение от  $U_1$  до  $U_2$ , происходит резкое уменьшение тока двигателя от  $I_1$  до  $I_2$  и силы тяги до  $F_2$ . Образовавшаяся разность силы тяги  $F_1 - F_2$  отрицательна, т.е. движение поезда замедляется и скорость снижается до значения  $v_3$ . Точка 3 — новое равновесие силы тяги  $F_3$  и сопротивления движению

Отклонения напряжения в контактной сети существенно влияют также на работу тяговых двигателей и вспомогательных машин э.п.с.

Дело в том, что изоляция обмоток тяговых двигателей рассчитана на работу при определенной температуре, превышение которой ведет к разрушению и пробое изоляции.

Казалось бы, при пониженном напряжении в контактной сети обмотки тяговых двигателей не должны перегреваться. Но надо помнить, что при этом снижается скорость поезда, а значит, увеличивается время его хода по участку. В результате растет время потребления электровозом энергии

на контактной сети, причем в значительно большей мере, чем снижается скорость движения. Все это приводит к увеличению количества тепла, выделяемого в тяговых двигателях, а следовательно, к росту температуры их обмоток.

На электровозах переменного тока поддержать напряжение на тяговых двигателях при длительном его понижении в контактной сети может сам машинист, изменяя путем выбора позиции контроллера число витков вторичной обмотки тягового трансформатора. Такой возможности на электровозах постоянного тока нет. Для поддержания на них нужной скорости при пониженном напряжении, как, впрочем, и на электровозах переменного тока, машинист может применить более глубокое ослабление магнитного потока тяговых двигателей. Однако при этом возрастут токи двигателей, что вызовет повышенный нагрев их обмоток, особенно обмотки якоря, ток в которой будет значительно больше, чем в обмотке возбуждения.

Одновременно на электровозах постоянного тока ухудшаются условия вентиляции тяговых двигателей, так как при пониженном напряжении в контактной сети снижается частота вращения мотор-вентилятора, а следовательно, уменьшается количество охлаждающего воздуха, поступающего в тяговые двигатели. В результате может произойти либо выплавление петушков секций обмотки якоря в местах их припайки к коллекторным пластинам, распушение обмотки якоря, либо тепловое разрушение изоляции обмоток. И то, и другое означает отказ электровоза и, следовательно, остановку поезда и нарушение графика движения. Поэтому при длительном понижении напряжения в контактной сети, наряду с регулированием напряжения на э.п.с., регулируют в установленных пределах напряжение на шинах тяговых подстанций, а следовательно, в контактной сети.

Повышение напряжения в контактной сети облегчает условия работы системы электроснабжения, так как при той же мощности уменьшается ток в контактной сети. В результате на тех же позициях контроллера машиниста скорость электровозов, работающих в режиме тяги, будет более высокой, так как она пропорциональна напряжению электропитания. По этой же причине расширяется диапазон максимальных значений тормозных сил при рекуперации.

Вырабатываемая рекуперирующим электровозом энергия может быть использована другими электровозами, работающими в режиме тяги. Однако не в каждый момент времени на участке, где происходит рекуперация, могут быть электровозы, работающие в режиме тяги. При их отсутствии напряжение в контактной сети резко возрастает, из-за чего создается угроза нарушения электрической прочности узлов электровоза и устройств электроснабжения. Поэтому на участках постоянного тока приходится применять специальные установки либо для преобразования, либо для поглощения избыточной энергии рекуперации. Инверторы, установленные с этой целью на тяговых подстанциях, преобразуют постоянный ток рекуперирующих электровозов в переменный, отдаваемый в первичную систему электроснабжения, т.е. в трехфазную сеть. Для поглощения избыточной энергии рекуперации применяют специальные установки, располагая их либо на тяговых подстанциях, либо на перегонах. В этих уста-

новках избыточная энергия рекуперации расходуется на нагревание резисторов и рассеивается в окружающую среду.

Повышенное напряжение в контактной сети вызывает увеличение нагрузки мотор-генераторов – возбuditелей режима рекуперации. Дело в том, что повышенное напряжение должно уравниваться значением ЭДС тяговых двигателей, работающих при рекуперации генераторами. Поэтому машинист должен увеличить частоту вращения возбuditеля, что приводит к резкому увеличению мощности, отдаваемой возбuditелем в цепь обмоток возбуждения двигателей. На крутых спусках при параллельном соединении их якорей мощность возбuditелей возрастает в 2 раза и более. Следовательно, при длительном режиме возникает опасность недопустимого нагрева обмоток двигателя возбuditеля.

Чтобы температура его обмоток не превысила допустимое значение, можно на части затяжного спуска применять последовательно-параллельное соединение двигателей, работающих в режиме генераторов, так как при этом ЭДС их будет меньше.

При резком повышении (скачке) напряжения в контактной сети мгновенно растет ток тягового двигателя, так как скорость движения быстро измениться не может из-за инерции поезда. Это увеличение тока вызывает нарастание силы тяги, и, как следствие, возникает ускорение поезда. Скорость его растет до тех пор, пока не наступит равенство силы тяги и силы сопротивления движению. Однако при этом вполне возможен переход колесного – моторного блока в режим буксования, т.е. в один из самых опасных аварийных режимов.

Так как отклонения напряжения контактной сети должны лежать в небольших пределах, допускаемых стандартом (а это значит, что и изменения скорости движения поездов будут также невелики), изменением силы тяги электровоза в рассматриваемых случаях пренебрегают. Следовательно, можно условно считать, что при движении поезда по пути неизменного профиля с установившейся скоростью сила тяги э.п.с., а значит, и ток тягового двигателя не зависят от напряжения в контактной сети.

Если повышенное напряжение в контактной сети сохраняется длительное время, то сначала постепенно увеличивается скорость электровоза, затем снова возрастает его сопротивление движению и устанавливается равновесие силы тяги электровоза и сопротивления движению поезда.

Влияние пониженного напряжения в контактной сети на скорость движения поезда ощутимо при подходе к таким подъемам, которые поезд может преодолеть по инерции - при отключенном контроллере. Это так называемые инерционные подъемы. При номинальном напряжении в контактной сети поезд, подходя к такому подъему, заранее приобретает (запасает) кинетическую энергию, достаточную для его преодоления без потребления энергии из контактной сети. Если же напряжение в контактной сети оказывается при подходе к подъему пониженным, поезд не успевает к моменту входа на него набрать достаточную кинетическую энергию (напомним, что она пропорциональна квадрату скорости). Поэтому под действием возросшего на подъеме сопротивления движению будет в любом случае быстро снижаться скорость поезда; если отключены тяговые двига-

тели, поезд не сможет преодолеть такой подъем за счет инерции. Машинисту придется включать тяговые двигатели, которые начнут потреблять энергию из контактной сети вместо ее экономии за счет использования кинетической энергии. Это ведет к перерасходу электроэнергии на тягу поезда.

На подъеме круче расчетного при полном использовании силы сцепления колес электровоза с рельсами поезд остановится, и электровоз не сможет его стронуть. Машинисту придется либо запрашивать резервный локомотив, либо вывозить поезд на подъем по частям. И то, и другое – нарушение нормального режима работы участка. Чтобы этого не произошло, необходимо, регулируя напряжение на шинах тяговых подстанций, обеспечить нормальный уровень напряжения в контактной сети на всех участках перегона.

Связь режимов работы э.п.с. и устройств электроснабжения проявляется не только во взаимном влиянии напряжений, но также и во влиянии механических колебаний токоприемников э.п.с. при движении и их аэродинамических характеристик на изменение условий токосъема с контактного провода. При неблагоприятном взаимодействии токоприемников и контактной сети может произойти нарушение токосъема, срабатывание соответствующих защит на э.п.с. и на тяговой подстанции, т.е. нарушение нормальной работы электрифицированного участка. Возможны еще более серьезные нарушения: перегорание контактного провода или поломка токоприемника (потому на электровозе всегда устанавливают по два токоприемника).

Взаимное влияние режимов работы устройств электроснабжения и э.п.с. проявляется и в другом виде – во взаимодействии электромагнитных полей, возникающих при преобразовании энергии на тяговых подстанциях и на э.п.с. Более ощутимо это влияние на дорогах, электрифицированных на переменном токе, особенно при тиристорном регулировании режимов работы э.п.с. Возникающие электромагнитные поля э.п.с. создают помехи нормальной работе не только его собственных электронных устройств, но в значительно большей степени для устройств связи, СЦБ, телемеханики и т.п. Это так называемая *электромагнитная совместимость*. Для обеспечения ее приходится на переменном токе вместо воздушной проводной связи использовать кабели, на тяговых подстанциях и э.п.с. устанавливать специальные электрические фильтры, поглощающие энергию электромагнитных помех, что, конечно, увеличивает стоимость электрификации по системе переменного тока (на каблирование воздушных линий связи уходят до 10–12% всех капитальных затрат при электрификации на переменном токе).

Таким образом, процессы, происходящие при работе электрической железной дороги, характеризуются, с одной стороны, механикой движения поезда с сопутствующими явлениями, а с другой – условиями электромеханического и электромагнитного взаимодействия э.п.с. и системы электроснабжения.

Комплексное научное рассмотрение механических, электромеханических и электромагнитных процессов, происходящих в системе электрической тяги, и оценка их взаимодействия связаны с чрезмерно большим объемом вычислений и затратами аналитического труда. При этом следует иметь в виду относительную точность исходных данных, принимаемых в расчетах, и, наконец, учитывать, что различные из рассматриваемых факторов влияют на результат расчета явно неодинаково. Одни из них, такие, например, как масса поезда, профиль пути, напряжение в контактной сети, нагрузки э.п.с., являются в нормальных режимах работы главными, другие – второстепенными. Поэтому часто выполняют расчеты, учитывающие влияние только основных факторов на характер взаимодействия э.п.с. и системы электроснабжения. Режимы работы э.п.с. и системы электроснабжения рассчитывают отдельно, исследуя затем их совместно только на самых тяжелых элементах профиля. Принимают, что скорость движения поезда пропорциональна напряжению в контактной сети за время хода его под током, а время движения соответственно обратно пропорционально напряжению. Исходя из этого определяют время хода при любом напряжении в контактной сети, отличающемся от номинального, разность времен хода при этих напряжениях в контактной сети, являющуюся поправкой при определении параметров и размеров движения.

В типовых упрощенных расчетах напряжение в контактной сети считают неизменным, равным его среднему значению. Влияние других поездов, находящихся на участке, учитывают приближенно – по средним потерям напряжения в контактной сети, которые определяют в зависимости от принятой расчетной схемы расположения нагрузок, представляющих собой токи э.п.с. каждого типа. Наибольшие размеры движения, которые могут быть на участке, зависят от мощности и размещения тяговых подстанций, сечения проводов контактной сети и способов организации движения.

Результаты расчета закладывают в нормативный график движения поездов. Затем на участке проводят опытные поездки с поездами различной массы, чтобы проверить прежде всего времена хода по перегонам, токи э.п.с. и условия реализации расчетной массы поезда. На основе результатов этих поездок вносят коррективы в тяговые расчеты и график движения поездов.

Особенно важные значения эта задача приобретает в условиях роста объема перевозок, когда провозная и пропускная способность электрифицированной линии приближаются к предельному уровню. Пропускная способность, т.е. количество пар поездов, которые можно пропустить по линии в сутки, лимитируется минимальным интервалом попутного следования, а этот интервал зависит от расстановки сигналов автоблокировки. В свою очередь эти сигналы (светофоры) ставят с таким расчетом, чтобы интервал между ними был больше тормозного пути (700 м). Таким образом, возможности повышения пропускной способности, в основном, исчерпаны.

В основном приходится решать задачу повышения провозной способности, т.е. повышения весовой нормы грузового поезда и соответст-

венно повышения суммарной мощности и силы тяги электровозов в составе поезда.

Для этих целей все наши электровозы, начиная с ВЛ19, были рассчитаны на работу по системе многих единиц. Потом были выпущены самые мощные в мире 12-осные двухсекционные электровозы ВЛ15 постоянного тока и ВЛ85 переменного тока. Изготовлены опытные образцы еще более мощных электровозов ВЛ86 и ВЛ86Ф с асинхронными тяговыми двигателями.

В связи с ростом объема перевозок на Транссибе и БАМе успешно решается задача введения унифицированной весовой нормы 6000 т с подталкиванием состава на руководящих подъемах 18–20‰.

Естественно, эти мероприятия требуют соответственного усиления системы электроснабжения, что значительно проще решается на переменном токе. Поэтому приложены огромные усилия, чтобы Байкальский перевальный участок Иркутск – Слюдянка, который почти сорок лет проработал на постоянном токе 3кВ, перевести на переменный ток 25 кВ. По системе переменного тока 25 кВ электрифицировано западное плечо БА-Ма. В перспективе по мере роста объема перевозок весь БАМ будет переведен на электрическую тягу, что позволит даже в существующем однопутном варианте увеличить провозную способность в 3,4 раза.

Имеются предложения дальнейшего совершенствования системы электрической тяги: повышения напряжения в контактной сети переменного тока до 50 кВ; переход на систему постоянного тока с повышением напряжения до 6 кВ (проект профессора Розенфельда В.Е.), 12 кВ (проект профессора Курбасова А.С.), 24 кВ (предложение профессора Буркова А.Т., Пупынина В.М. и Котельникова А.В.).

Однако научная и техническая база для этих решений еще отсутствует и поэтому их нужно рассматривать исключительно как возможные варианты развития.

#### ***1.4 Механика движения поезда***

При движении э.п.с. потребляет электрическую энергию из контактной сети, расходуя ее на преодоление сил сопротивления движению. Таким образом, по направлению движения поезда действует сила тяги локомотива или моторного вагона, а против - сила сопротивления движению. Их разность и определяет характер движения поезда: ускоренное, если сила тяги больше суммарной силы сопротивления движению, замедленное, если она меньше. Возможно движение с постоянной скоростью, если указанные силы равны,

Поезд представляет собой систему отдельных (дискретных) твердых тел – вагонов, соединенных автосцепкой друг с другом и с локомотивом. Поэтому наиболее точной является модель, учитывающая поезд как многомассовую систему. Однако такая модель сильно усложняет расчеты, даже при использовании современных компьютеров; поэтому она используется очень редко и только в расчетах продольной динамики поезда.

Так как каждый вагон под влиянием сил продольной динамики поезда имеет случайные, обычно колебательные перемещения относительно центра массы поезда, то математическое описание такого сложного процесса движения поезда до сих пор не имеет четкого формулирования в виде системы дифференциальных уравнений Лагранжа и соответственно нет его полного аналитического решения. Поэтому для практических тяговых расчетов поезд считают одной фиктивной материальной точкой, в которой сосредоточена вся масса поезда.

Математическое описание процесса движения такого поезда, определяющее в каждый момент времени связь между действующими на него силами и его ускорением, называют законом движения поезда. Этот закон записывают на основании 2-го закона Ньютона (действующая на тело сила равна произведению массы этого тела на его ускорение) в виде обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка, связывающего массу поезда, действующие на него силы, пройденный путь и время движения (обычно путь и время входят в уравнение движения через скорость  $V$ ):

$$F(V) - W(V) - B(V) = (1 + \gamma)m \frac{dV}{dt},$$

где  $F(V)$  – сила тяги, действующая от электровоза на поезд;

$W(V)$  – сила сопротивления движению поезда, включая сопротивление движению электровоза;

$B(V)$  – тормозная сила поезда. При колодочном торможении это сумма сил торможения электровоза и всех колодок состава; при электрическом торможении тормозная сила только электровоза; возможно комбинированное торможение – электрическим тормозом электровоза и колодочным тормозом состава;

$\gamma$  – постоянный для данного поезда коэффициент, учитывающий инерцию вращательного движения деталей поезда (колесные пары, якоря тяговых двигателей, тяговые редукторы, электрические генераторы пассажирских вагонов);

$m$  – физическая масса поезда;

$(1 + \gamma)m$  – приведенная масса поезда, которая всегда больше его физической массы  $m$ , поскольку  $\gamma = 0,02 - 0,08$ .

Это уравнение учитывает не только ускорение поступательного движения поезда, но и эффект вращающихся узлов локомотивов и вагонов – якорей тяговых двигателей, тяговой передачи, колесных пар. Правда, силы инерции вращающихся частей невелики по сравнению с силами инерции поступательно движущихся масс поезда: у локомотивов они составляют в зависимости от типа электровоза примерно 10–20%, у вагонов 5–6%. Однако во избежание ошибки при решении уравнения движения поезда эти силы всегда учитывают.

Закон движения поезда позволяет рассчитать необходимые для организации работы железных дорог режимы движения каждого поезда, его массу, в том числе ее предельное значение – критический вес, построить

график движения поездов, определить провозную и пропускную способность участков и направлений в целом, составить график работы локомотивных бригад, оценить использование и производительность локомотивов и т.д.

Для этого выполняют тяговые расчеты, в задачу которых входит предварительный выбор массы поезда, расчет его времени хода и скорости движения по перегонам, определение потребления тока из контактной сети и расхода электроэнергии на тягу поезда, определение температуры нагрева тяговых двигателей и другого силового электрооборудования, использование мощности э.п.с. и устройств системы тягового электроснабжения.

При заданном типе э.п.с. и профиле пути в процессе выполнения тяговых расчетов производят интегрирование уравнения движения поезда: находят на каждом последовательном, достаточно малом участке пути такие величины, как скорость движения поезда, пройденный им путь и время движения, ток тягового двигателя и электровоза в целом. Выполнять такие расчеты особенно эффективно на ПЭВМ. При этом действующие на поезд силы рассматривают в виде функций скорости движения в соответствии с характеристиками э.п.с. для соответствующей позиции контроллера машиниста, а как функции времени - только в специальных задачах.

Для сокращения затрат времени и труда на выполнение таких расчетов обычно принимают, как уже было сказано, что поезд представляет собой одну материальную точку, т.е. фиктивную точку, в которой сосредоточена вся его масса, в том числе и масса локомотива. При этом сокращается время, необходимое для выполнения тяговых расчетов, и обеспечивается достаточная для многих практических задач точность результатов (погрешность не превышает 3–4 %).

Однако, рассматривая поезд как материальную точку, не учитывают неизбежно возникающие при движении реального поезда перемещения вагонов друг относительно друга и относительно локомотива. При переделах профиля эти перемещения и вызванные ими продольные силы в поезде могут быть настолько велики, особенно в случае неумелого ведения поезда, что возникает опасность его обрыва. Она возрастает при длинных поездах. Если режим движения поезда выбран правильно, такая опасность практически незначительна, но все же на сети железных дорог России имеет место ежегодно 30–50 обрывов автосцепки. Однако такого рода расчеты входят в совершенно другой класс задач – они относятся к задачам продольной динамики. Актуальность этих задач существенно возрастает в связи с ростом массы поезда. Уже сейчас средняя масса поезда достигает 4 тысячи т, а на ряде участков нормативная масса равна 5–6 тысячам т, в частности по всему Транссибу с горными участками (руководящие подъемы 16–20‰) планируют ввести унифицированную весовую норму 6 тысяч т в дальней перспективе на наиболее грузонапряженных направлениях в полнее возможно повышение весовой нормы до 12–18 тысяч т, но это возможно только в варианте распределенной тяги, т.е. при постановке электровозов не только в голове состава, но также и в его середине и хвосте.

## 1.5 Режимы движения поезда

Задача машиниста сводится к реализации заданного режима движения поезда. Соотношение силы тяги  $F$ , силы сопротивления движению  $W$  и тормозной силы  $B$ , действующих в каждый момент на поезд, определяет режим его движения с учетом профиля и плана пути. Машинист управляет режимом движения поезда, регулируя силу тяги э.п.с. и применяя в необходимых случаях торможение поезда.

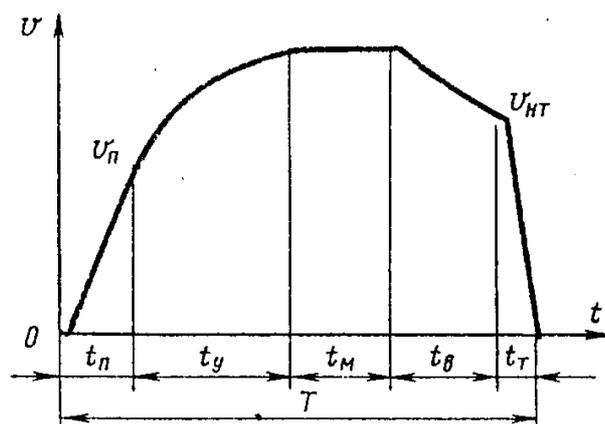


Рис. 1.6. Скорость  $V$  э.п.с. за время  $T$  движения его по перегону нарастает в течение времени  $t_n$  пуска и затем до достижения установившегося значения  $V_y$  (время  $t_y$ ), после этого э.п.с. движется со скоростью  $V_y$ , в течение  $t_m$ , затем на выбеге ( $t_б$ ), в течение  $t_m$  осуществляется торможение

При трогании поезда машинист выбирает такой режим работы тяговых двигателей, чтобы сила тяги  $F$  электровоза была больше силы сопротивления движению поезда  $W$ , т. е.  $F > W$ .

При этом результирующая сила, равная их разности, т. е.  $F - W$ , преодолевая инерцию поезда, определяемую его массой  $m$ , создает ускорение  $dV/dt > 0$  согласно второму закону Ньютона. Наибольшее ускорение поезд приобретает обычно во время пуска (рис. 1.7), так как сила тяги электровоза значительно больше силы сопротивления движению поезда.

Скорость  $V_n$  на рис. 1.7 означает скорость выхода на номинальную тяговую характеристику электровоза, на которой он может работать длительно.

По мере дальнейшего роста скорости движения возрастает сила сопротивления движению, а сила тяги электровоза монотонно снижается и через некоторое время эти силы становятся равными. Начиная с этого момента поезд на участке неизменного профиля будет двигаться с постоянной скоростью, потому что разность  $F - W$  равна нулю, а это значит, что ускорения поезда нет (равномерное движение).

При необходимости стабилизировать скорость поезда или при подготовке к торможению машинист переводит рукоятку главного контроллера в нулевое положение, отключая тяговые двигатели от контактной сети. Сила тяги электровоза становится равной нулю. Теперь режим движения поезда

определяется соотношением силы инерции, зависящей от величины накопленной к этому моменту кинетической энергии поезда, и силы сопротивления движению. В процессе выбега на горизонтальном участке пути поезд будет замедляться под действием силы сопротивления движению, т.е. силы трения.

При торможении поезда с начальной скорости  $V_{HT}$  машинист как бы искусственно увеличивает сопротивление движению поезда, гася кинетическую энергию движущегося поезда в тормозной системе (колодочное или реостатное торможение) или возвращая ее в контактную сеть при рекуперативном торможении.

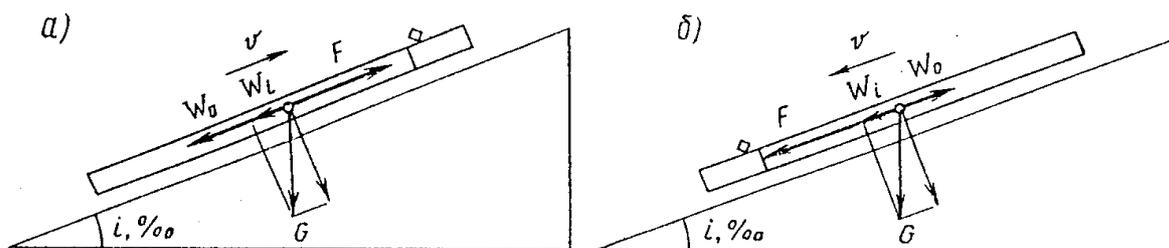


Рис. 1.7. В режиме тяги при движении по подъему (схема а) сопротивление  $W_i$  направлено против силы тяги  $F$ , на спусках (б) оно совпадает по направлению с силой тяги

При движении по вредному спуску суммарная составляющая (рис. 1.7) сопротивления движению от веса поезда, будучи направлена по движению поезда, увеличивает его ускорение и, как следствие, скорость движения. Для того, чтобы скорость движения не превысила допустимую, приходится подтормаживать поезд. Необходимость включения тормоза является признаком вредного спуска (обычно спуски больше 4–5‰).

При остановке поезда на крутом уклоне (контроллер машиниста выключен) может оказаться, что его основное сопротивление движению  $W_o$  меньше дополнительного от уклона  $W_i$ . Если при этом поезд не заторможен, то он начинает двигаться вниз по спуску, причем скорость его будет возрастать до значения, определяемого равенством  $W_o = W_i$ . Во избежание такого «самоката» поезда после остановки на подъеме или спуске рекомендуется применять ручной тормоз, а также устанавливать тормозные башмаки.

В режиме торможения на площадке независимо от вида его - механическое или электрическое – тормозная сила  $B$ , суммируясь с основным сопротивлением движению  $W_o$ , вызывает замедление поезда. Здесь важно выдержать заданный тормозной путь, например, при остановке перед запрещающим сигналом или на станционном пути.

При торможении поезда на подъеме составляющая  $W_i$ , действующая в том же направлении, что и тормозная сила  $B$ , будет вызывать более интенсивное замедление поезда. При торможении на спуске (рис. 1.7) составляющая  $W_i$  направлена против тормозной силы  $B$ , т.е. она становится движущей силой, снижает замедление поезда.

Поезд движется по вредному уклону с постоянной скоростью, когда  $B+W_0=W_j$ .

Регулируя в зависимости от обстановки силу тяги или в режиме торможения тормозную силу, машинист может установить желаемый режим движения поезда, регулируя его скорость вплоть до остановки.

Исходя из указанных обобщенных соображений продольной механики движения поезда, уже достаточно давно предпринимаются попытки автоматизировать ведение поезда по заданной программе, то есть по графику движения с учетом показаний путевых сигналов. Фактически эта задача сводится к решению в бортовом процессе уравнения движения поезда, приведенного выше, причем это решение должно учитывать:

- профиль пути, то есть сопротивление от уклона  $W_j$ ;
- график движения и режимные карты, т.е. требуемую скорость движения поезда;
- тяговые и тормозные возможности электровоза, то есть возможность регулирования сил  $F$  и  $B$ .

Принципиально эта задача может быть решена при помощи бортовой ЭВМ (автомашинист), которая обеспечивает движение поезда по программе  $V(S)$  при учете ограничений, накладываемых сигналами автоблокировки. В настоящее время такие системы автоведения созданы. Наиболее совершенные системы используются на метрополитене. Аналогичный принцип заложен для электропоездов пригородного сообщения. Решается эта задача и для поездов дальнего сообщения.

### **1.6. Природа сил, действующих на поезд**

Движение поезда по перегону определяется суммарным действием множества сил – внутренних и внешних: при этом машинист может регулировать только силы, развиваемые тяговым электроприводом и тормозной системой. Предельные значения этих сил ограничены коэффициентом сцепления колесных пар с рельсами. Поэтому для практики очень важно детальное изучение сил, действующих на поезд.

Эти силы различны по своей природе и воздействию на поезд в процессе его движения. Одни из них возникают вследствие электромагнитных процессов в тяговом приводе э.п.с., другие являются результатом трения в узлах э.п.с. (вагонов), третьи появляются из-за сопротивления воздушной среды при движении поезда, четвертые из-за различных метеорологических условий и т.п.

Так как эти силы являются в каждый момент времени результатом сочетания многих случайных факторов, то аналитически определить их чрезвычайно затруднительно. Поэтому в тяговых расчетах учитывают только средние значения наиболее существенных составляющих, определяемые опытным путем. Эти средние значения приведены в ПТР-85 для разных серий локомотивов, вагонов и условий их движения, а также для разных конструкций пути (звеньевой, бесстыковой).

Рассмотрим природу возникновения и воздействие основных сил на поезд, начиная с веса поезда.

Вес поезда – это один из важных показателей электрической тяги. Вес любого тела (э.п.с., вагонов, поезда в целом и т.д.) представляет собой силу, обусловленную полем тяготения Земли. Численно вес равен произведению массы тела на ускорение силы тяжести. Вес локомотива и вагонов поезда в целом передается через рельсы и далее через грунт к центру массы Земли. Со стороны центра массы Земли действует на локомотив и вагоны такая же по величине сила, но направленная противоположно. Так как масса Земли несоизмеримо больше массы локомотива, вагонов и поезда в целом, то вызываемое перемещением поезда изменение положения Земли оказывается ничтожным, и его не учитывают.

При движении локомотив должен развивать силу тяги, необходимую для преодоления силы инерции поезда, которая определяется его массой.

Сила тяги локомотива – внешняя по отношению к колесу локомотива сила, действующая со стороны рельса по направлению движения локомотива, она равна сумме сил тяги всех его колесных пар, приводимых во вращение тяговыми двигателями.

Сила тяги является регулируемой, т.е. машинист может изменять ее при выборе режима движения поезда.

Часто говорят, что силу тяги создает тяговый двигатель. Это неправильно, так как тяговый двигатель создает не силу, а вращающий момент, который с помощью тяговой передачи вращает колесную пару локомотива. Вращающий момент тягового двигателя действует внутри колесно-моторного блока и поэтому сам по себе он не может переместить колесную пару, а следовательно, и электровоз.

Из механики известно, что для изменения положения тела, например, перемещения его на некоторое расстояние, нужно, чтобы на это тело подействовала внешняя сила. Только внешняя сила может вывести тело из положения равновесия. Для колеса такой силой является сила сцепления его с рельсом; она обусловлена нажатием колеса на рельс и сцеплением, возникающим в месте опоры его на рельсе. Если бы сила сцепления не существовала, то под влиянием вращающего момента тягового двигателя колесная пара только вращалась бы на месте, не перемещаясь по рельсу. Точно так же мы не смогли бы ходить по земле, если бы не существовала внешняя для нас сила – сила трения между подошвой нашей обуви и грунтом. Благодаря тому что в месте опоры колеса на рельс возникает внешняя сила – сила сцепления  $F_{cu}$ , колесо движется поступательно.

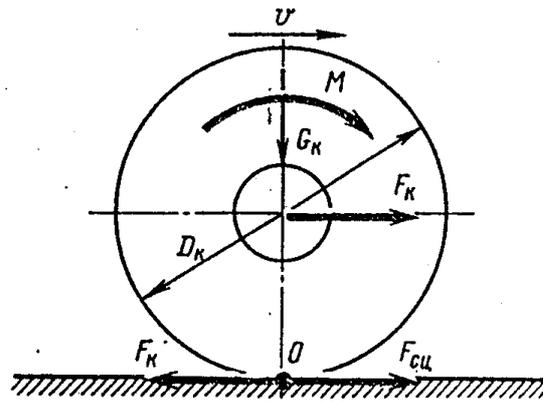


Рис. 1.8. Под действием вращающего момента  $M$  на колесо, сила нажатия которого на рельс  $G_k$ , образуется пара сил  $F_k$ . Сила  $F_k$ , приложенная в точке  $O$ , – это сила действия колеса на рельс, она направлена против движения. Реакция рельса – сила  $F_{сц}$  – направлена по движению колеса

Для наглядности представим вращающий момент  $M$  тягового двигателя, действующий на колесную пару, в виде двух равных и противоположных сил  $F_k$ , приложенных на расстоянии радиуса колеса (рис. 1.8).

При этом сила

$$F_k = \frac{2M}{D_k} \mu \eta_{пер},$$

где  $D_k$  – диаметр колес колесной пары (1250мм у электровозов, 1050мм у электропоездов);

$\mu$  – передаточное число тяговой передачи;

$\eta_{пер}$  – коэффициент полезного действия тяговой передачи (98%).

Одна из сил  $F_k$  действует в месте опоры колеса на рельс и представляет собой внешнюю для рельса силу. Так как эта сила направлена против движения, она стремится вызывать угон рельсов в сторону, обратную движению колеса. Другая сила  $F_k$  через буксы (или другое устройство) передается на автосцепку локомотива и при наличии достаточной силы сцепления колес с рельсами осуществляет тягу состава.

Силу тяги  $F_k$ , действующую от колеса на рельс, нередко называют касательной силой тяги, вероятно потому, что она направлена как бы по касательной к ободу колеса. Однако это название не соответствует общепринятому в механике понятию «касательная» – оно относится к криволинейному движению.

Иногда говорят, что сила сцепления уравнивает силу тяги  $F_k$ . Однако эти силы приложены к разным телам: сила  $F_k$  – от колеса к рельсу, сила  $F_{сц}$  – от рельса к колесу. Уравнивать же друг друга могут только силы, приложенные к одной точке или к одному телу. Если бы силы  $F_k$  и  $F_{сц}$  уравнивали друг друга, колесная пара вообще бы не двигалась. Другое дело, что в нормальных режимах тяги силы  $F_k$  и  $F_{сц}$  равны, но противоположно направлены. Это соответствует третьему закону Ньютона: действие равно противодействию.

При торможении на колесо действует момент  $M$ . Тормозная сила  $B$ , приложенная к центру колеса, направлена против движения и стремится остановить колесо. Такая же по значению тормозная сила  $B$  приложена и от колеса к рельсу. Она направлена по движению колеса, а сила сцепления  $F_{сц}$  колеса с рельсом, возникшая как реакция на силу  $B$ , направлена в сторону, обратную движению колеса (рис. 1.9).

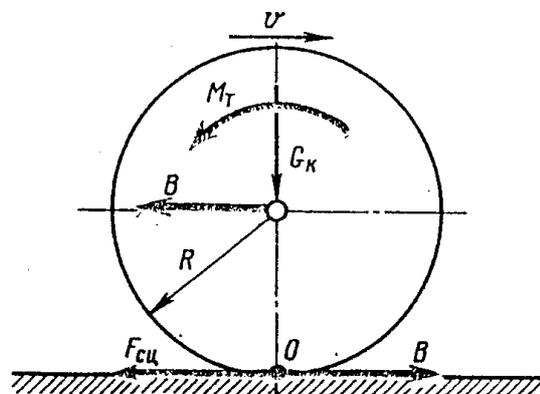


Рис.1.9. Тормозной момент можно представить в виде двух сил  $B$  с плечом, равным радиусу колеса. При действии тормозного момента  $M_T$  на колесо, сила нажатия которого на рельс равна  $G_K$ , возникает сила сцепления  $F_{сц}$ , направленная в сторону, обратную движению колеса

За все время существования железных дорог (почти 180 лет) было много попыток объяснить сущность явлений, происходящих при сцеплении колеса с рельсом. Вначале даже возникали опасения, сможет ли колесо на гладком рельсе развивать достаточную силу тяги, и было предложено выполнять колеса зубчатыми, а рельсы рифлеными. Опасения вскоре отпали, однако сущность процесса сцепления остается во многом неясной до сих пор.

Сила сцепления, подобно силе трения, образуется в результате взаимодействия огромного числа мельчайших частиц соприкасающихся поверхностей материалов бандажа и рельса. Оно происходит при одновременном воздействии многих факторов, большая часть которых является случайной.

В первом приближении силу сцепления  $F_{сц}$  определяют аналогично силе трения как произведение силы  $G_K$  нажатия колеса на рельс и коэффициента сцепления  $\psi_k$ , значения которого устанавливают в зависимости от скорости движения колеса:  $F_{сц} = G \psi_k(V)$ . Это выражение является исходным для решения многих технико-экономических и эксплуатационных задач. По нему рассчитывают нормативный вес грузового поезда, определяют скорости движения и начала торможения поезда, составляют график движения поездов и т.п. Расчетные зависимости  $\psi_k(V)$  для всех типов локомотивов приведены в Правилах тяговых расчетов.

Однако при движении поезда меняются условия образования силы сцепления: сила нажатия колеса на рельс не остается постоянной, так как происходят колебания локомотива и верхнего строения пути, меняются в

зависимости от профиля пути скорость движения и режим работы тяговых двигателей, окружающая температура и, что очень важно, состояние поверхностей рельсов и бандажей по кругу катания; на рельсах могут быть всякого рода загрязнения, пленки, лед и т. п.

Под влиянием этих факторов разброс значений коэффициента сцепления в условиях эксплуатации нередко достигает +50% от среднего значения, которое рассчитывается по ПТР–85. Поэтому наряду с расчетами силы сцепления по зависимости  $F_{сц} = G\psi_k(V)$  на тех участках дорог, где вес грузового поезда ограничен силой сцепления колес локомотива с рельсами, проводят опытные поездки, чтобы проверить возможность реализации расчетного веса поезда.

Существует ошибочное убеждение, что увеличение силы нажатия колесных пар сверх расчетного значения обеспечивает пропорциональное повышение весовой нормы поезда. В действительности это не так.

Допустим, что за счет доballастировки восьмиосного локомотива сила нажатия его колесных пар на рельсы увеличилась с 23 до 24,5 тс, т.е. на 6,5%. Однако это не означает, что весовую норму поезда можно повысить также на 6,5%.

Дело в том, что при таком расчете учитывают только средние значения сил нажатия колесных пар на рельсы, а значит, и средние силы сцепления. Не принимаются во внимание неизбежные в эксплуатации случайные разбросы значений этих сил, которые, как уже было сказано, могут достигать половины их средних значений. Поэтому оказывается, что действительный эффект повышения весовой нормы поезда значительно меньше определенного по средним значениям сил нажатия колес на рельсы.

Эффективный путь повышения весовой нормы поездов заключается не столько в увеличении силы нажатия колесных пар на рельсы, сколько в использовании при существующих силах нажатия локомотивов, оборудованных тяговых двигателей, которые имеют жесткие характеристики, обеспечивающие высокую степень сцепления колес с рельсами и препятствующие развитию процессов боксования.

Учесть влияние всех факторов для того, чтобы создать единую теорию сцепления, позволяющую с достаточной для практики точностью рассчитать значения коэффициента сцепления, пока не удалось. Установлены лишь отдельные важные закономерности. На основании, например, положений теории упругости выявлено, что под действием силы нажатия колеса в месте его опоры на рельсе возникают местные (контактные) напряжения, обусловленные упругостью материала бандажа и рельса. Поэтому в действительности колесо попирается на рельс не в одной точке, а по некоторой поверхности, имеющей форму эллипса, как - это схематично показано на рис. 1.10. Приблизительно считают, что у современных локомотивов опорная площадка составляет 350-500 мм<sup>2</sup> в зависимости от диаметра колеса, силы нажатия его на рельс и свойств материалов бандажа и рельса.

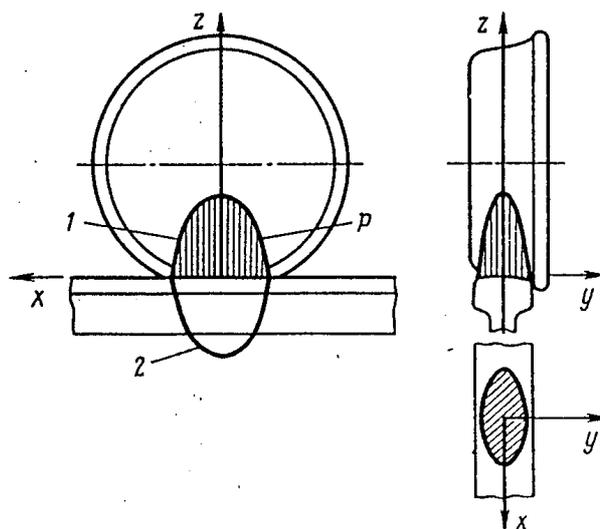


Рис. 1.10. Распределение давлений  $p$  по опорной поверхности бандажа (1) и рельса (2) при неподвижном колесе и статической силе нажатия его на рельс является симметричным. Максимальное давление в центре этой поверхности в 1,5 раза больше среднего (при нагрузке 25 т/ось)

Как видно из рис.1.10, при неподвижном колесе давления распределяются симметрично относительно продольных и поперечных осей опорного эллипса. Наибольшее давление, а следовательно, и наибольшие контактные напряжения материал испытывает в середине опорной поверхности, где они близки к пределу упругости. По краям поверхности контакта напряжения практически отсутствуют.

Ориентация опорного эллипса и его фактические размеры зависят от проката, то есть от износа бандажа. При отсутствии проката большая ось эллипса направлена вдоль рельса, малая – поперек. По мере нарастания проката и связанного с ним изменения очертания профиля бандажа угол между продольными осями эллипса и рельса увеличивается. При изношенном бандаже и рельсе опорная поверхность принимает форму прямоугольника, продольная ось которого расположена поперек рельса.

Если к неподвижному колесу, сила нажатия которого на рельс равна  $G$ , приложить вращающий момент  $M$ , то вступающие в контакт воображаемые волокна материала бандажа в набегающей части окажутся сжатыми, а в сбегавшей – наоборот, растянутыми. Принято различать на опорной поверхности две зоны:

- зона сцепления частиц материала бандажа и рельса, в которой силы трения частиц достаточны чтобы удержать их от взаимных смещений;
- зона относительного проскальзывания частиц материала бандажа и рельса, в которой силы, возникающие от вращающего момента  $M$ , больше сил внутреннего взаимодействия частиц, в результате чего возникает микропроскальзывание контактирующих частиц.

В виде реакции на упругие силы, являющиеся результатом этих относительных перемещений частиц, возникает равнодействующая сила по опорной поверхности, направленная в обратную сторону, т.е. по движению

колеса. Она и представляет собой внешнюю для колеса силу – силу сцепления, обеспечивающую поступательное движение колеса. Со стороны колеса на рельс будет действовать такая же по величине равнодействующая сила, но направленная в сторону, обратную поступательному движению колеса.

Таким образом, вследствие упругих относительных перемещений частиц материалов бандажа и рельса при движении колеса фактический путь, проходимый его геометрическим центром, не равен пути, подсчитанному за то же время, исходя из номинального радиуса. Разницу этих путей называют упругим скольжением (криппом). Однако при расчетах силы сцепления удобнее исходить не из значения упругого скольжения, а из отношения его к длине пути, пройденного за то же время колесом номинального диаметра. Это отношение называют относительным скольжением.

Разделив числитель и знаменатель этого отношения на время, получим относительную скорость упругого скольжения материалов бандажа и рельса. При малом ее значении существует линейная зависимость силы сцепления и коэффициента сцепления от значения этой скорости. С ростом скорости упругого скольжения происходит отклонение этой зависимости от линейной. По мере приближения скорости упругого скольжения к максимальному значению, определяющему максимальное значение силы сцепления, увеличивается вероятность боксования колеса. Как только сила тяги  $F_k$  превысит силу сцепления  $F_{сц}$ , произойдет срыв сцепления и начнется боксование колеса. При этом на упругое скольжение контактирующих частиц материалов бандажа и рельса наложится их действительное скольжение, вследствие чего реализовать силу тяги оказывается невозможно. Это ведет к боксованию или юзу.

Наибольшее значение скорости упругого скольжения частиц материалов бандажа и рельса, определяющее значение коэффициента сцепления в момент начала боксования, составляет 0,5-1,0% скорости поступательного движения колеса.

В процессе движения локомотив преодолевает силу сопротивления движению. Для поезда эта сила равна сумме сил сопротивления движению электровоза и состава. Эта сила является нерегулируемой: машинист не может изменять ее по своему усмотрению. Чем тяжелее состав, тем больше его сопротивление движению. Обычно оно во много раз больше сопротивления движению электровоза.

Сила сопротивления движению зависит от конструкции и состояния подвижного состава, верхнего строения пути, профиля и плана пути, скорости движения, силы и направления ветра. Так как природа этих сил различна, то сопротивление движению принято условно делить на две составляющие: одну, зависящую от типа подвижного состава и скорости его движения, и другую, зависящую только от плана и профиля пути, а также особых условий движения. Первую составляющую называют основным сопротивлением движению  $W_0$ , вторую – дополнительным  $W_d$ .

Основное сопротивление движению представляет собой сопротивление движению подвижного состава данного типа на прямолинейном и

горизонтальном пути при любой скорости движения, в том числе и при скорости, равной нулю. Оно обусловлено прежде всего трением в подшипниках и других узлах подвижного состава, трением качения колес по рельсам, колебаниями подвижного состава и пути, проскальзыванием колес по рельсам из-за разницы их диаметров, аэродинамикой, а также деформациями пути и ударами на стыках.

Энергия, затраченная на преодоление сил трения, невозвратима: она расходуется на истирание деталей подвижного состава и пути и, превращаясь в тепло, рассеивается в окружающую среду. Энергия, израсходованная на преодоление подъемов, может быть частично, а в некоторых случаях и полностью возвращена в контактную сеть в процессе рекуперации при движении поезда по спускам. Частично или полностью эта энергия будет возвращена в сеть, зависит в каждом конкретном случае от длины и крутизны спуска, массы и скорости движения поезда, его сопротивления движению и т.д.

Существенной составляющей основного сопротивления движению является сопротивление воздушной среды. При существующих скоростях движения оно возрастает пропорционально произведению квадрата скорости движения и площади поперечного сечения тела, – например подвижного состава.

Поэтому головным (и последним) вагонам скоростных поездов, а также локомотивам придают обтекаемую форму. Аэродинамические испытания моделей моторных вагонов показали, что если воздушное сопротивление головного вагона принять за 100%, то сопротивление промежуточных вагонов составит примерно 20% и хвостового вагона 30–35% – оно выше из-за завихрений воздушного потока, возникающих за последним вагоном поезда. Эти данные относят к электропоездам составностью 10 – 12 вагонов.

Зависимости других составляющих силы сопротивления от скорости движения также оказываются сложными. Одни из них, например сила трения в подшипниках, при трогании поезда сначала убывают, а потом при определенной скорости движения начинают расти, другие – силы взаимодействия подвижного состава и пути – интенсивно нарастают с увеличением скорости, третьи изменяются несущественно и т. д.

Кроме того, при движении сказывается влияние многих случайных факторов, таких, например, как состояние подвижного состава и пути, степень загрузки вагонов, температура и т.п. К тому же эти случайные факторы различно влияют на разные составляющие сил сопротивления движению. Поэтому установить теоретически зависимость основного сопротивления движению от скорости чрезвычайно трудно: ее определяют опытным путем для подвижного состава каждого типа. Принятые расчетные зависимости приведены в Правилах тяговых расчетов (ПТР – 85).

Вторая составляющая – так называемое дополнительное сопротивление движению ( $W_d$ ) – определяется профилем и планом пути, радиусом кривых, а также составляющей силы тяжести локомотива, вагонов и поезда в целом, возникающей на уклонах.

Профиль пути – это продольный разрез рельефа местности, на которой расположен путь. Так как рельеф местности обычно пересеченный, т.е. представляет собой сочетание подъемов, спусков и ровных участков, то и профиль пути представляет собой ломаную линию.

Крутизну каждого элемента профиля определяют как отношение разности высот конца и начала данного элемента к его длине. Разность высот  $h$  измеряют в метрах, длину – в километрах, тогда  $i$  определяют в тысячных долях (1:1000) и обозначают:  $i$ , ‰ (рис. 1.11). Уклон  $i$ , ‰, означает, что на длине элемента 1 км подъем пути составляет  $i$ , м. Если элемент, имеющий уклон  $i$ , короче 1 км, то пропорционально уменьшается и фактическая высота подъема пути на нем, и наоборот, если длина элемента больше 1 км, то фактический подъем пути превышает  $im$ . Горизонтальные элементы профиля пути, т.е. не имеющие уклона ( $i=0$  ‰), называют площадками.

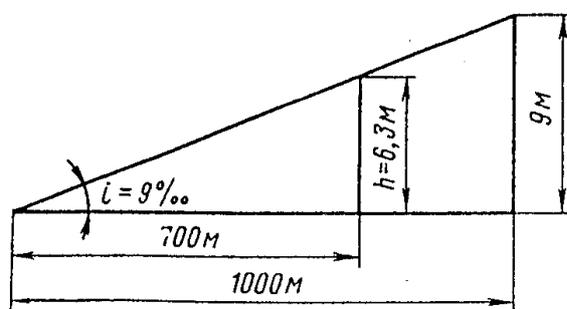


Рис. 1.11. Действительный подъем элементов пути при крутизне  $i$ , ‰ пропорционален его длине:

$$h = 9 \frac{700}{1000} = 6.3 \text{ м}$$

В тех местах, где элементы профиля примыкают друг к другу, происходит как бы перелом профиля. На них могут возникнуть большие продольные силы в поезде.

Когда поезд находится на уклоне, то к силам тяги и сопротивления его движению прибавляется еще составляющая  $Wi$ , его силы тяжести  $G$ ; на крутых уклонах она достаточно велика. Когда поезд движется по подъему, составляющая силы тяжести оказывает дополнительное сопротивление его движению. Она направлена противоположно скорости движения, и поэтому ее обозначают как  $-Wi$ . При движении по спуску эта составляющая действует по направлению движения поезда и как бы дополнительно ускоряет его. Поэтому ее обозначают  $+Wi$ .

Чем круче спуск, тем больше эта сила и тем больше должна быть тормозная сила, необходимая для остановки поезда, а, следовательно, тем больше тормозной путь. Учитывая тормозные средства грузового поезда, крутизну пути больше 30‰ не допускают.

Поезд испытывает дополнительное сопротивление движению  $W_{кр}$  также при проходе кривых. Набегание колес подвижного состава на на-

ружный рельс, принудительное вписывание тележек подвижного состава в кривые, увеличение трения гребня колес о рельсы под действием центробежной силы, проскальзывание колес в кривой приводят к возрастанию сопротивления движению. Чем меньше радиус кривой, тем больше это дополнительное сопротивление движению. Оно всегда направлено против движения поезда и вызывает увеличение расхода электроэнергии на тягу поездов.

Таким образом, сопротивление движению  $W$  – это сумма его составляющих:  $W=W_0+W_d=W_0+W_i+W_{кр}$ . Для снижения скорости поезда, остановки его и удержания на месте машинист применяет тормоза. Они создают тормозную силу, как бы искусственно увеличивающую сопротивление движению поезда. Машинист может регулировать тормозную силу по своему усмотрению, выбирая ту или иную тормозную позицию.

Существуют системы механического (колодочного и дискового), электрического и электромагнитного торможения.

При колодочном тормозе тормозная сила создается в результате нажатия тормозных колодок на бандажи колес (рис. 1.12). Воздух к тормозным устройствам подается по однопроводной тормозной магистрали, состоящей из трубопровода локомотива и последовательно включенных тормозных трубопроводов каждого вагона. В процессе торможения, которое начинается при установке рукоятки крана машиниста в соответствующее положение, происходит снижение давления в тормозной магистрали. В результате этого сжатый воздух из запасных резервуаров поступает через воздухораспределители в тормозные цилиндры вагонов. Штоки этих цилиндров приводят в действие тормозную рычажную передачу, и колодки прижимаются к бандажам.

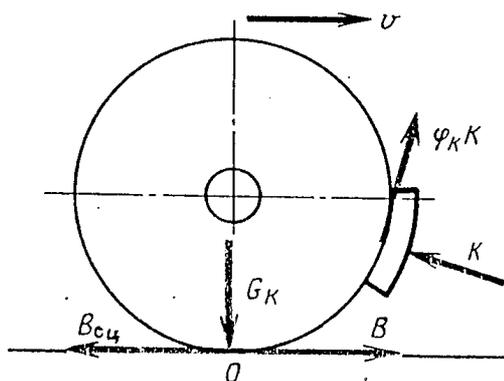


Рис. 1.12. В результате нажатия  $K$  колодки на колесо возникает в опорной поверхности колеса на рельсе тормозная сила  $B=K\varphi_K$  и как реакция рельса – сила сцепления. Коэффициент трения  $\varphi_K$  колодки о колесо снижается с ростом скорости, сила нажатия  $K$  определяется давлением в тормозном цилиндре

С помощью крана машиниста осуществляется и автоматическое восполнение возможных утечек воздуха из тормозной сети поезда и наполнение запасных резервуаров через воздухораспределители. Благодаря этому тормоз становится неистощимым.

При обрыве поезда или повреждении тормозной магистрали, а также при срабатывании стоп-крана тормоз приходит в действие вследствие снижения давления в тормозной магистрали, из которой в этих случаях воздух выходит в атмосферу. Поэтому такой тормоз является автоматическим.

При механическом торможении происходит неодновременное включение тормозов вагонов в действие по длине состава, т.е. тормозная волна сравнительно медленно (со скоростью около 280 м/с) распространяется вдоль поезда. Из-за этого затягивается торможение поезда. Чтобы тормоза всех вагонов приходили в действие одновременно, применяют систему электропневматического торможения, которая обеспечивает одновременное возбуждение вентилей воздухораспределителей всех вагонов, на которые подается напряжение от крана машиниста по специальным проводам, проложенным вдоль состава.

Для торможения широко применяют чугунные колодки, которые, однако, быстро изнашиваются. Их приходится часто заменять, что вызывает увеличение эксплуатационных расходов.

Ведутся работы по применению для тормозных колодок новых износостойких композиционных материалов, у которых коэффициент трения мало зависит от скорости. Замена чугунных колодок композиционными, износостойкость которых значительно выше, позволяет получить значительную ежегодную экономию чугуна при соответствующем сокращении эксплуатационных расходов.

Коэффициент трения чугунных колодок о бандаж снижается с ростом скорости более резко, чем коэффициент сцепления колес с рельсом. Поэтому в зоне малых скоростей движения (рис. 1.13) может произойти заклинивание колеса – юз, при котором происходит поступательное движение колеса по рельсу без вращения, из-за чего приходится ограничивать силу нажатия колодки на бандаж и применять противоюзные устройства.

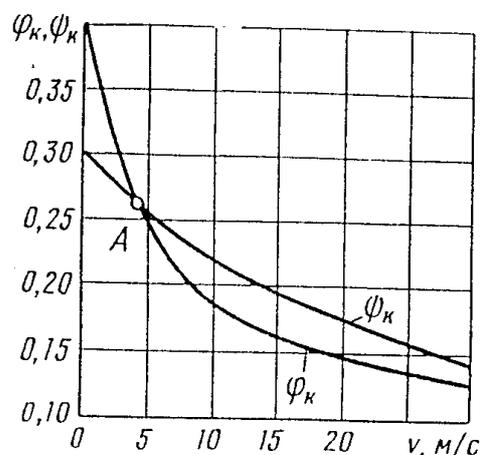


Рис. 1.13. При малых скоростях движения (левее точки А) возникает опасность юза. Это объясняется тем, что коэффициент  $\varphi_k$  трения колодки о бандаж (он определяет силу нажатия ее на бандаж) больше коэффициента сцепления  $\psi_k$  колеса с рельсом, т.е. тормозная сила больше силы сцепления

Следует также учитывать, что резкое нарастание тормозной силы, как и ее резкое прекращение, вызывает большие продольные силы в поезде. Они могут привести к выдавливанию вагонов из состава, повреждению крепления грузов и другим нарушениям безопасности движения.

В процессе торможения из-за снижения коэффициента трения тормозная сила уменьшается с ростом скорости движения быстрее, чем растет сопротивление движению поезда. Это является также недостатком тормозов, особенно при чугунных колодках, так как при движении на спусках обуславливает механическую неустойчивость процесса торможения. Однако эта неустойчивость не является принципиальным препятствием для применения механического торможения на подвижном составе, так как благодаря большой инерции поезда механические неустановившиеся процессы протекают медленно и машинист может повысить тормозную силу при возрастании скорости движения поезда, увеличив нажатие колодок на бандаж, и уменьшить ее при снижении скорости.

Колодочные, пневматические и электропневматические тормоза являются основными на подвижном составе, предназначенном для движения со скоростями до 180 км/ч.

Существуют системы электрического торможения – реостатного, рекуперативного, комбинированного и электромагнитного.

При реостатном торможении э.п.с. должен быть оборудован специальной схемой, позволяющей при переключении тяговых двигателей в генераторный режим часть энергии движущегося поезда в специальных резисторах превращать в тепло, рассеивая его в окружающую среду.

При рекуперативном торможении тяговые двигатели также переключаются по специальной схеме на генераторный режим, а вырабатываемая ими электрическая энергия возвращается в контактную сеть, что значительно повышает технико-экономические показатели электрической тяги.

Максимальная тормозная сила этих видов электрического торможения зависит как от параметров электрооборудования э.п.с., так и от силы сцепления их колес с рельсами, не допуская юза.

Особенность электрического торможения поездов состоит в том, что тормозную силу создает только э.п.с.:

- в грузовом движении только тяговые двигатели электровозов;
- в пассажирском пригородном движении только тяговые двигатели моторных вагонов электропоездов.

В процессе торможения особенно длинных грузовых поездов задние вагоны могут набегать на передние, создавая, особенно на переломах профиля, опасность выдавливания вагонов из состава. При правильном управлении режимом торможения такая опасность практически незначительна и может быть сведена до минимума действиями машиниста.

В системах электромагнитного торможения тормозная сила не зависит от сцепления колес с рельсами. Известны два вида электромагнитных рельсовых тормозов: магниторельсовые и тормоза, в которых использует-

ся тормозной эффект от вихревых токов, наводимых в рельсах. Однако на железнодорожном транспорте они применяются редко.

В магниторельсовом тормозе под действием силы электромагнитного притяжения к рельсам притягиваются специальные тормозные башмаки, упруго подвешенные к боковым балкам рамы тележки. Тормозные башмаки имеют обмотки возбуждения: при прохождении по ним тока возникает магнитный поток, охватывающий сердечник башмака и рельс. В результате образуется сила, притягивающая башмаки к рельсам. Поэтому реализуемые тормозные силы не ограничены сцеплением колес с рельсами.

В тормозах, основанных на действии вихревых токов, чтобы обеспечить достаточную эффективность торможения, обмотки тормозных башмаков должны создать сильное магнитное поле в рельсах. На это расходуется электрической энергии во много раз больше, чем в магниторельсовых тормозах. Однако при таких тормозах обеспечивается независимость тормозной силы от состояния поверхностей рельса и бандажа, степени их загрязнения и силы сцепления между ними. Их предназначают для э.п.с. с электрическим торможением, при котором энергия, необходимая для возбуждения катушек тормозных башмаков, генерируется тяговыми двигателями.

В связи с ростом скоростей движения подвижной состав оборудуют комбинированными системами торможения, каждая из которых имеет наибольшую эффективность в определенном диапазоне скоростей. Например, на электропоезде ЭР 200 применены реостатный тормоз, электропневматический, колодочный дисковый (полудиски размещены на центрах колес) и магниторельсовый, а также ручной тормоз для удержания поезда на месте. Действие их поясняют кривые, приведенные на рис. 1.14. Одновременное действие тормозов нескольких видов, при котором может возникнуть заклинивание колес – юз, предотвращается специальными устройствами.

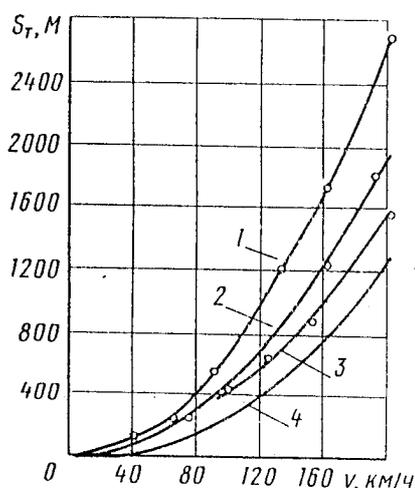


Рис. 1.14. Эффективность каждой из систем тормозов, которыми оборудован электропоезд ЭР 200, определяется тормозным путем  $S_t$ , т.е. расстоянием, пройденным электропоездом с момента поворота рукоятки крана машиниста при некоторой скорости  $V$  до полной остановки поезда. При действии магниторельсового тормоза (опытные точки отмечены кружками) тормозной путь характеризуется кривой 1, при работе дискового тормоза – кривой 2, в случае совместного действия дискового и магниторельсового тормозов – кривыми 3 (экспериментальная) и 4 (расчетная)

## 1.7. Определение массы поезда

Масса грузового поезда является одним из основных показателей эффективности работы участка и дороги в целом. Она определяет производительность труда на железнодорожном транспорте; от неё существенно зависит себестоимость перевозок. В практике эксплуатационной работы стремятся максимально повысить нормативную массу состава поезда, особенно в грузовом движении, постоянно повышая мощность и силу тяги локомотивов.

Однако повышение массы состава ограничивается условиями движения поезда по руководящему подъему и длинной приемо–отправочных путей на станциях. Ниже дана методика расчета критической, т.е. наибольшей массы состава по условиям движения поезда на руководящем, т.е. наиболее крутом подъеме в пределах данного тягового плеча.

На большинстве участков движения максимальная сила тяги локомотива и зависящая от нее предельная масса грузового поезда определяются условиями сцепления колес локомотива с рельсами:

$$F_{cu}(V_p) = 1000 m_{cu} g \psi_{cu}(V_p),$$

где  $F_{cu}(V_p)$  – максимальная сила тяги электровоза на расчетном подъеме крутизной  $i^0/100$  при установившейся скорости движения  $V_p$ , км/ч;

$m_{cu}$  – сцепная масса электровоза, т;

$g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$\psi_{cu}(V_p)$  – значение коэффициента сцепления колес электровоза с рельсами при скорости  $V_p$ , км/ч.

С другой стороны, эта сила тяги  $F_{cu}(V_p)$  должна быть равна силе сопротивления движению поезда:

$$1000 m_{cu} g \psi_{cu}(V_p) = m_o [W_o'(V_p) + i_p] g + m_c [W_o''(V_p) + i_p] g,$$

где  $W_o'(V_p)$ ,  $W_o''(V_p)$  – основное удельное сопротивление движению электровоза и состава при скорости движения  $V_p$  соответственно.

Из последнего равенства найдем массу  $m_c$  грузового поезда по условию сцепления колес электровоза с рельсами:

$$m_c = \frac{1000 m_{cu} g \psi_{cu}(V_p) - m_o [W_o'(V_p) + i_p] g}{[W_o''(V_p) + i_p] g}, \text{ т.}$$

Установившуюся скорость движения электровоза на расчетном подъеме  $i_p$  определяют как точку пересечения тяговой характеристики  $F(V)$  электровоза с кривой ограничения силы сцепления колес электровоза с рельсами в функции скорости движения.

В качестве примера на рис.1.15 приведена тяговая характеристика электровоза ВЛ10 с тяговыми двигателями ТЛ-2К при полном поле возбуждения, диаметре колес 1250 мм, напряжении на двигателе 1500 В (кривая 1) и ограничение по сцеплению силы тяги колес этого электровоза (кривая 2).

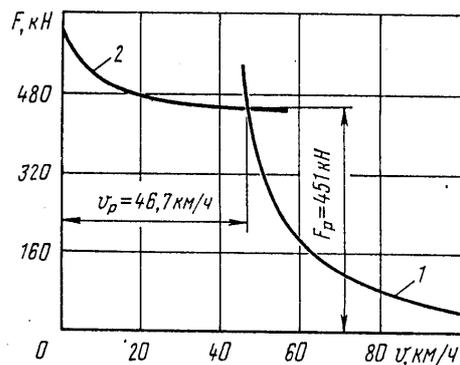


Рис. 1.15

Массу поезда рассчитывают отдельно для каждого участка дороги. Так как каждый участок имеет свой профиль, а может быть и серию электропровода, то необходимо изменять массу поезда применительно к каждому участку. Чтобы пропускать маршрутные поезда без переработки массы поезда на участковых станциях, устанавливают в таких случаях единую так называемую унифицированную массу поезда для всего направления.

Составы грузовых поездов формируют в зависимости от характера перевозимых грузов, для чего используют грузовые вагоны разных типов: крытые для защиты грузов от атмосферных осадков, полувагоны для перевозки массовых грузов навалом и леса; платформы для длиномерных и громоздких грузов; цистерны для перевозки жидких (наливных) и газообразных веществ; изотермические для перевозки скоропортящихся грузов и специальные для тяжеловесных и громоздких грузов; полувагоны-бункеры, вагоны для перевозки живности и скота, автомашин, цемента и т.п.

Если масса поезда будет значительно больше значения, определяемого силой сцепления колес локомотива с рельсами, то нормальное движение поезда невозможно: локомотив не стронет такой поезд с места, колесные пары будут боксовать. Подсыпая через форсунки песок под колеса локомотива, увеличивают силу сцепления, и становится возможным стронуть поезд с места. Однако режим движения поезда с непрерывной подачей песка под колеса локомотива нельзя считать нормальным, так как при этом происходит усиленный износ рельсов, увеличивается сопротивление поезда и, как следствие, неоправданно возрастает расход электроэнергии на тягу поездов.

На некоторых участках максимальная допустимая масса грузового поезда определяется условиями нагревания обмоток тяговых двигателей. Так как предельная допустимая температура нагрева обмотки зависит от класса ее изоляции, то если в течение длительного времени температура обмотки окажется выше указанной допустимой, может произойти ее тепловое разрушение. Опасность заключается в том, что такое разрушение обмоток происходит не мгновенно, а накапливается постепенно, после чего происходит массовый выход тяговых двигателей из строя, что грозит нарушением нормального движения поездов.

Длина грузового поезда обычной массы не должна превышать длины приемо-отправочных путей станций: 850, 1050 и 1200 м в зависимости от их класса и развития.

При длине станционных путей 850 м масса поезда для маршрутов с углем, рудными, строительными и другими массовыми грузами может достигать 4700–6200 т при длине станционных путей 1050 м она может составлять 5800–6700 т.

Исходя из технических возможностей подвижного состава один восьмиосный электровоз может вести поезд предельной массы в восемь тысяч тонн. Однако при торможении на затяжных спусках круче  $12\text{‰}$  возникают недопустимо большие продольные силы в поезде, что грозит его обрывом, или выдавливанием вагонов из состава (рис.1.16). На участках со спусками круче  $12\text{‰}$  массу и длину поездов устанавливают по результатам опытных поездок.

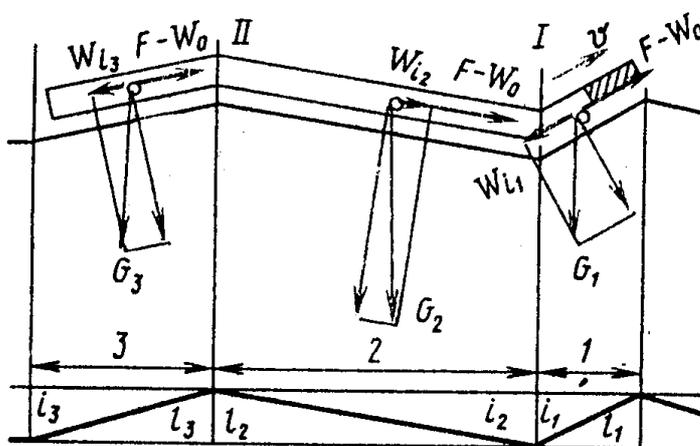


Рис.1.16. Длинносоставный поезд в данный момент времени расположен на трех элементах пути. Сила тяги  $F$  и основное сопротивление движению  $W_0$  приняты постоянными. При таком расположении поезда возникает опасность выдавливания вагонов (зона I) и обрыва (зона II). Чем резче переломы профиля, тем больше эта опасность

Известны случаи, когда при одном электровозе в голове поезда массу поезда необоснованно устанавливали выше 8 тыс. тонн. Результат – вышедшие из строя тяговые двигатели и сбой движения поездов на участке. Пуск длинных поездов представляет определенные трудности, необходимо заранее обеспечить безостановочное проследование таких поездов, с тем чтобы избежать предупреждений об ограничении скорости и тем более появления запрещающих сигналов на перегонах. Беспрепятственный пропуск таких поездов зависит от слаженности действий работников не только данной станции, но и соседних тоже. В еще большей мере не слаженность в работе сказывается на стыковых станциях дорог и направлений, если приходится изменять массу поезда.

В сложившихся условиях работы железных дорог, когда грузовое движение сократилось почти в два раза, особое значение для жизнедеятельности железных дорог приобретает эффективная организация пассажирских перевозок.

Пассажирские поезда различают по категориям: скорые формируют из жестких, купейных и мягких вагонов. Эти поезда имеют минимальное число остановок в пути следствия. Пассажирские поезда формируют из тех же типов вагонов с предусмотренными в них местами для сидения. Почтово-багажные поезда формируют из почтово-багажных вагонов, включая несколько пассажирских вагонов. На малодеятельных линиях эксплуатируются грузо-пассажирские поезда.

Расположение вагонов в поезде должно обеспечивать максимальное удобство пассажиров при соблюдении всех требований безопасности. Ведущая роль в организации пригородных перевозок пассажиров принадлежит электропоездам, как наиболее эффективному средству этого вида транспорта.

Массу и скорость пассажирских поездов определяют в результате многовариантного решения технико-экономической задачи сравнения, с одной стороны, приведенных ежегодных капиталовложений в подвижной состав (электровозы и вагоны), с другой стороны, эксплуатационных расходов - оплат электроэнергии на тягу, оплату работы локомотивных и поездных бригад, путевых ремонтных рабочих и т.д. Из рассмотренных вариантов выбирают оптимальный с учетом длины станционных путей на данном направлении. Такие варианты расчетов наиболее целесообразно выполнять на ПЭВМ.

На основании накопленного опыта вождения как грузовых, так и пассажирских поездов полезны режимные карты их рационального вождения, обеспечивающие экономию электроэнергии на тягу и безопасные условия их продвижения на каждом участке.

Режимные карты не должны становиться фактором, сдерживающим инициативу локомотивных бригад и совершенствование их работы. По мере накопления опыта вождения поездов, режимы прохождения ими каждого участка следует пересматривать.

Наилучший режим, однако, может быть реализован при полной автоматизации ведения поезда. Современные бортовые микро-ЭВМ вполне позволяют выполнить оптимизацию режима ведения поезда строго согласно графику движения с обеспечением минимума расхода электроэнергии.

### ***1.8. Энергетика движения поезда***

Перемещение состава в пределах тягового плеча происходит в основном по горизонтали, но обычно профиль поезда-участка представляет собой примерно горизонтальную линию с чередующимися подъемами и спусками. От профиля пути существенно зависит как критическая масса поезда, о чем было сказано выше, так и режим ведения поезда по участку. Для углубленного понимания этих вопросов данную проблему целесообразно рассматривать с точки зрения энергетических процессов движения поезда.

Для этого сначала используем метод баланса мощности. По диаграмме (рис. 1.17) видно, что мощность  $M_0$ , потребляемая электровозом из

тяговой сети расходуется полезно на создание касательной силы тяги  $F_k$ , причем полезная мощность равна

$$M_{пол} = F_k \cdot V$$

и в ней можно выделить 3 составляющих, которые идут

- на преодоление сил трения  $M_T$ , т.е. основного сопротивления движения поезда и сопротивления от кривых ( $W_0$  и  $W_{кр}$ );
- на накопление кинетической энергии поезда, т.е. на увеличение его скорости. Если формула для кинетической энергии имеет вид

$$\mathcal{E}_k = \frac{(P+Q) \cdot V^2}{2},$$

то рассматриваемая составляющая мощности представляет собой производную от энергии по скорости, т.е.

$$M_k = \frac{d\mathcal{E}_k}{dV} = (P+Q)V \frac{dV}{dt};$$

- на накопление потенциальной энергии, когда поезд идет на подъем с уклоном  $i$ , причем накопленная потенциальная энергия при этом равна

$$\mathcal{E}_{ном} = (P+Q) \cdot L \cdot i,$$

где  $L$  – длина подъема, км;

$i$  – уклон, ‰.

Составляющая доля мощности локомотива, при движении на подъем, расходуемая на увеличение  $\mathcal{E}_{ном}$  равна производной от этого выражения по времени, т.е.

$$M_{ном} = (P+Q) \cdot V \cdot i.$$

Следует отметить, что  $M_T$  безвозвратно уходит в потери, но  $M_k$  и  $M_{ном}$  идут в накопление энергии поезда и потом могут быть использованы полезно (для преодоления трения на выбеге). Однако в ряде случаев приходится гасить эту энергию тормозами. Так появляются тормозные потери – при остановке поезда или при поддержании его скорости на вредном спуске.

Чтобы снизить тормозные потери, предусматривают рекуперацию, т.е. возврат энергии в тяговую сеть.

В состав диаграммы баланса мощности входят также:

- расход на собственные нужды СН;
- потери в электровозе  $\Delta M$  (механические, электрические и магнитные).

Расчетные формулы для определения КПД электровоза по мощности могут быть записаны:

- в режиме тяги

$$\eta_T = \frac{M_{пол}}{M_0} = \frac{M_0 - M_{СН} - \Delta M}{M_0} = \frac{F_k \cdot V}{U \cdot I};$$

- в режиме рекуперации

$$\eta_{рек} = \frac{M_{рек}}{M_{кин} + M_{ном}} = \frac{U \cdot I}{B_k \cdot V}.$$

Однако в конечном итоге важна не мощность, а общие затраты энергии на перемещение поезда тяговому плечу. Поэтому ниже рассмотрены именно вопросы энергопотребления.

Железнодорожный транспорт потребляет около 4% всей электроэнергии, вырабатываемой в нашей стране. Поэтому ее экономия на железных дорогах приобретает важное значение, особенно в настоящих условиях, когда стоимость электрической энергии неуклонно растет.

Основная часть энергии на железнодорожном транспорте расходуется на движение поездов. При электрической тяге энергия, забираемая из контактной сети при движении поезда, равна сумме энергии, затрачиваемой на работу, совершаемую тяговыми двигателями, потерям энергии при ее преобразовании в узлах э.п.с. и энергии, расходуемой на собственные нужды поезда. В процессе передачи этой энергии от тяговой подстанции на э.п.с. неизбежны ее потери, обусловленные электрическим сопротивлением контактной сети. Кроме этого, энергия теряется в преобразовательных устройствах тяговых подстанций.

После отключения тяговых двигателей движение поезда продолжается за счет накопленной кинетической энергии. Преодолевая при этом силу сопротивления движению, поезд уменьшает скорость. Для увеличения скорости приходится вновь потреблять энергию из контактной сети.

Часть электрической энергии, потребляемой поездом, расходуется при движении на подъемах на изменение его потенциальной энергии. На спусках потенциальная энергия поезда, накопленная при подъеме, уменьшается и расходуется на преодоление основного сопротивления движению и сопротивления в кривых, а на крутых спусках поглощается частично в тормозах.

Потери энергии происходят также в тормозах при подтормаживаниях, при остановках поезда и снижении скорости перед кривыми, стрелками, перед станциями. Неизбежны потери энергии также в тяговых двигателях и тяговых передачах, преобразовательных и пусковых устройствах э.п.с.

Электрическую энергию  $A$ , затраченную на движение поезда, подсчитывают как сумму произведений  $U_i I_i t_i$  во всех режимах работы э.п.с. (здесь  $U_i$  – напряжение контактной сети при токе  $I_i$  э.п.с., определяемом с учетом схемы соединения тяговых двигателей;  $t_i$  – время движения э.п.с. с током  $I_i$ ):

$$A = \sum U_i I_i \Delta t_i .$$

Электрическая энергия, забираемая из контактной сети, расходуется также на собственные нужды э.п.с. – на работу приводных двигателей мотор–компрессоров, мотор–вентиляторов, мотор–генераторов управления. Кроме того, из сети должно быть дополнительно подведено некоторое количество энергии для питания цепей отопления и в пассажирских поездах.

В тех случаях, когда нет кривых тока, потребляемого электровозом, ведущим поезд данного веса, для расчета расхода электроэнергии на тягу используют другие методы. Из них рассмотрим сущность метода расчета по составляющим расхода электроэнергии, а также принципы статистического и базового методов расчета.

Метод расчета по составляющим состоит в последовательном вычислении каждой из них:  $\Delta A_{\text{п}}$  – потерь электроэнергии при пуске;  $\Delta A_{\text{во}}$  – потерь на преодоление основного сопротивления движению;  $\Delta A_{\text{ик}}$  – тоже на преодоление электровозом подъемов и кривых;  $\Delta A_{\text{пт}}$  – потерь при подтормаживании поезда;  $\Delta A_{\text{то}}$  – при торможении до остановки;  $\Delta A_{\text{тд}}$  – потерь в тяговых двигателях;  $\Delta A_{\text{с}}$  – расхода на собственные нужды э.п.с.. Сумма указанных составляющих дает общий расход энергии  $A$  на тягу данного поезда, а сумма расходов энергии всех поездов на участке – общий расход.

Сущность статистического метода состоит в определении среднего значения расхода энергии на тягу на основе оценки корреляционных связей между отдельными составляющими  $\Delta A_1, \Delta A_2, \dots, \Delta A_n$ . При этом общий расход энергии  $A = \Delta A_0 + \sum_1^n K_i \Delta A_i$ , где коэффициенты корреляции  $K_i$  устанавливаются по результатам анализа материалов опытных поездок.

В современных трудных условиях работы железных дорог приобретает большое значение базовый метод планирования расхода электроэнергии на предполагаемый объем перевозочной работы, учитывающий основные параметры этого плана: веса поездов по направлениям, удельные нагрузки вагонов, путевое развитие станций, места установки светофоров и т.д., позволяющий более полно учесть условия эксплуатации на данном участке.

В отношении расхода электроэнергии условия движения поездов, ведомых электровозами на магистральных участках, существенно отличаются от условий движения пригородных электропоездов. При электровозах основная часть электроэнергии тратится на преодоление сопротивления движению и подтормаживание на вредных спусках. Потери в тормозах перед остановками и потери при пуске составляют в этом случае, особенно на двухпутных участках, лишь небольшую часть общего расхода энергии: они не превышают 10–20%. Наименьший расход энергии получается при движении грузовых поездов на равнинных двухпутных участках с редкими остановками. В пригородном движении, для которого характерны короткие перегоны между остановками, тормозные и пусковые потери достигают 60–70% общего расхода энергии на движение поезда.

Чтобы снизить расход энергии на движение поездов, стремятся прежде всего уменьшить основное сопротивление движению поезда. Для этого необходимо содержать в требуемом состоянии подвижной состав и путь, обеспечивать полную загрузку вагонов и повышать средний коэффициент полезного действия э.п.с., уменьшать потери в тормозах на вредных спусках.

В существующих условиях эксплуатации потери энергии в двигателях можно несколько снизить, широко применяя регулирование их возбуждения, так как при средних и больших нагрузках двигателя заметную роль играет уменьшение потерь в цепи возбуждения. Значительно ухудшается КПД двигателей и преобразователей при работе в режиме пониженного напряжения. Они спроектированы так, что их максимальный КПД обеспе-

чивается при номинальном напряжении. Поэтому следует избегать езды на последовательном соединении тяговых двигателей или на позициях пониженного напряжения э.п.с. с преобразователями.

Очень велик расход энергии на вентиляцию преобразователей и тяговых двигателей электровозов переменного тока: в некоторых случаях он достигает 15% общего расхода энергии. Регулируя частоту вращения вентиляторов в зависимости от нагрузки тяговых двигателей, можно уменьшить количество потребляемой ими энергии в 2,5–3 раза.

Заметную экономию электрической энергии дают ускоренные трогание и разгон поезда: чем больше ток тягового двигателя, тем выше ускорение поезда, меньше скорость выхода на номинальную характеристику э.п.с. и меньше время потребления этого тока из контактной сети.

При ускоренном пуске (на рис. 1.18 этому соответствуют величины с индексом 1) экономия электрической энергии достигается за счет: сокращения потерь в пусковых резисторах (эти потери прямо пропорциональны квадрату скорости выхода на номинальную характеристику:  $V_{п1} < V_{п2}$ ), уменьшения времени потребления пускового тока ( $t_{п1} < t_{п2}$ ), снижения потерь при торможении до остановки, которые пропорциональны квадрату скорости начала торможения ( $V_{т1} < V_{т2}$ ).

Экономия электрической энергии за счет ускоренного пуска более ощутима при движении электропоездов, чем электровозов на магистральных участках, так как в пригородном движении более часто происходят пуски и остановки.

Увеличение замедления в процессе торможения при данной технической скорости также приводит к снижению расхода энергии, но не в столь значительной степени, как увеличение пускового ускорения.

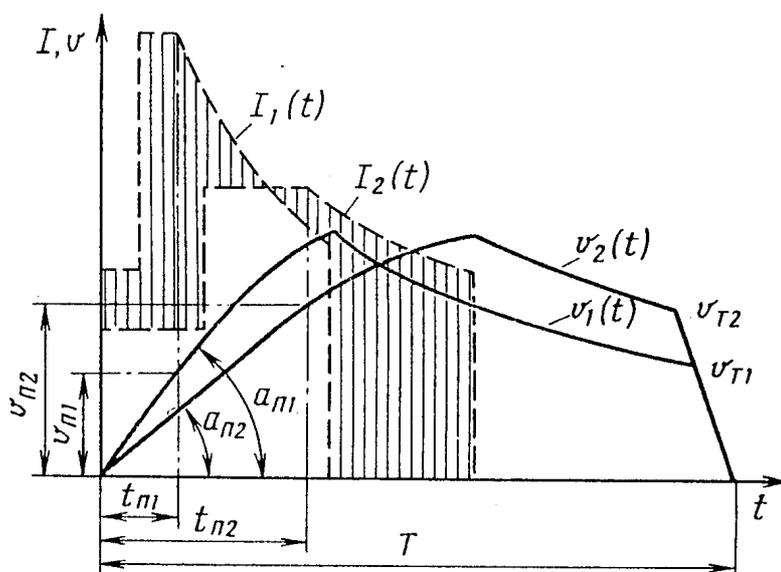


Рис. 1.18. Влияние изменения скорости движения  $V_1(t)$ ,  $V_2(t)$  и токов  $I_1(t)$ ,  $I_2(t)$  э.п.с. на расход электроэнергии в двух режимах (индексы 1 и 2) при одном и том же времени  $T$  хода по перегону. Пуск в режиме 1 более интенсивный: ускорение  $a_{п1} > a_{п2}$ , время  $t_{п1} < t_{п2}$ . Получаемая экономия энергии за счет интенсивного пуска пропорциональна разности заштрихованных площадей.

Существенную экономию электрической энергии дает применение рекуперативного торможения. На магистральных электрических железных дорогах рекуперация применяется преимущественно для торможения на крутых затяжных спусках. На горных участках при этом получают в среднем 12–15% экономии электрической энергии. При электропоездах эффект рекуперации проявляется в процессе торможения перед остановками. Так как потери в их тормозах достигают 40–50% общего расхода электроэнергии, то, применяя рекуперацию, можно получить экономию энергии в размере 20–30%.

Кроме того, при рекуперативном торможении, как и любом другом виде электрического торможения, значительно уменьшается износ тормозных колодок и бандажей, что дает экономический эффект, соизмеримый со стоимостью сэкономленной энергии.

Как при электровозной, так и при мотор-вагонной тяге существенное влияние на расход электрической энергии оказывает организация движения поездов. Потери энергии в случае непредвиденных остановок перед запрещающими сигналами, движение на станциях по предупреждениям с пониженной скоростью и т.п. связаны, как правило, с дополнительными торможениями поезда, а при полной остановке и с дополнительными пусками, т.е. с дополнительным расходом электроэнергии.

Существенное уменьшение расхода энергии можно было бы получить, снижая скорость движения, так как при этом уменьшились бы сопротивление движению и потери в тормозах перед остановками. Однако расход энергии не может служить единственным критерием для выбора оптимального режима работы поезда, так как снижение скорости может вызвать потери в эксплуатации, превышающие стоимость сэкономленной энергии. Поэтому режим движения поезда выбирают на основании экономических расчетов, учитывая, с одной стороны, расходы, зависящие от скорости движения, а с другой – от количества израсходованной энергии.

Из всех вариантов, отвечающих заданным техническим требованиям, выбирают оптимальный, т.е. требующий наименьших приведенных затрат на перевозку грузов или пассажиров, при учете всех затрат.

### ***1.9. Эффективность электрической тяги***

Электрическая тяга по сравнению с тепловозной требует дополнительных капитальных затрат на сооружение контактной сети, тяговых подстанций и на подвод к ним линий электропередачи от единой энергосистемы. Но электроподвижной состав создает и значительные преимущества, включая снижение себестоимости перевозок при значительных объемах перевозочной работы, возможность повышения весовых норм грузовых поездов и скорости пассажирских за счет более высокой мощности электровоза по сравнению с тепловозом. Важно также, что расходы локомотивных депо, эксплуатирующих электровозы, в 2–3 раза меньше, чем у аналогичных тепловозных депо.

Несомненны преимущества электрической тяги в пригородном сообщении. Высокоскоростное сообщение также базируется исключительно на электрической тяге.

Тем не менее, экономически целесообразна лишь электрификация линий с высокой интенсивностью движения поездов. Линии с малоинтенсивным движением экономически выгодно эксплуатировать на тепловозной тяге.

Именно поэтому в России и на электрической тяге работает около половины сети железных дорог, но эти линии, как наиболее загруженные, выполняют до 85% грузооборота.

Аналогичная ситуация имеет место в большинстве стран Евросоюза, в Японии, Китае. Обычно электрифицировано 30–60% сети железных дорог, но электрическая тяга выполняет до 90% всей перевозочной работы сети.

Электрические железные дороги являются крупным потребителем электроэнергии. В России они потребляют до 5% всей вырабатываемой в стране электрической энергии. Железнодорожный транспорт является выгодным потребителем, поскольку потребление электрической энергии практически равномерно в течение суток. Это позволяет сглаживать пики и провалы энергопотребления, свойственные крупным городам.

Хотя система электрической тяги является энергоемкой отраслью, эффективность ее работы в масштабе страны не может вызывать сомнений. Эффективность использования энергоресурсов оценивают отношением полезно израсходованной их части к общей величине энергоресурсов с учетом потерь при добыче, переработке и транспортировке выработанной энергии. Это отношение называют коэффициентом использования энергоресурсов. Чем совершеннее система тяги, тем выше коэффициент использования ею энергоресурсов.

Общие требования, предъявляемые к каждому виду тяги, состоят в следующем:

- высокая экономичность перевозок, одним из определяющих факторов которой является коэффициент полезного использования энергоресурсов: он во многом зависит от того, насколько экономичны характеристики силовых установок локомотивов, т.е. насколько можно регулировать их применительно к профилю участка и наиболее целесообразным с точки зрения экономии энергии режимам движения поезда;
- отсутствие необходимости в дорогостоящем топливе для силовых установок локомотивов;
- способность надежно работать в любых метеорологических условиях и сохранять работоспособность при отказе одного или нескольких элементов;
- достаточная ремонтпригодность;
- экологическая чистота, благоприятные изменения условий и характера труда людей.

Чтобы более полно охарактеризовать свойства электрической тяги, рассмотрим такие ее технико-экономические показатели, как коэффициент полезного действия (КПД), металлоемкость, особенности характеристик локомотивов, возможности экономии энергии при движении поезда, надежность электроподвижного состава и электрической тяги в целом, влияние электрификации железных дорог на условия работы и производительность труда.

Эффективность использования энергии, в любой системе определяется тем, насколько велики ее потери при работе этой системы. Полезно используемую долю энергии принято оценивать отношением ее к величине энергии, подводимой на вход системы, которое принято называть коэффициентом полезного действия (КПД) системы.

В сложных системах, состоящих из нескольких функциональных узлов, какими являются, например, системы тяги, в каждом узле неизбежны потери энергии на трение, рассеяние энергии в окружающую среду, преодоление сопротивления и т. п. Поэтому общие потери энергии в таких системах определяют как сумму потерь во всех узлах (рис. 1.18).

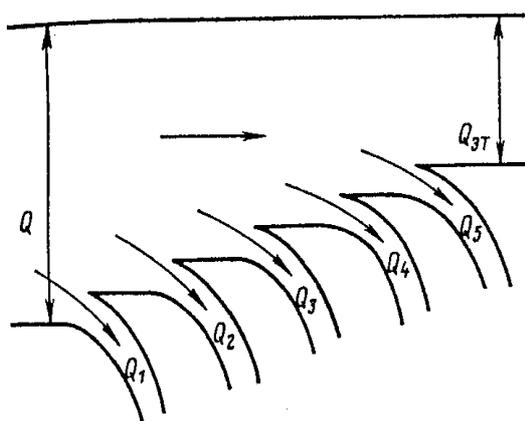


Рис. 1.18. В системе электрической тяги к энергии, полезно используемой, добавляется сумма потерь:

$Q_1$  – на электростанциях;  $Q_2$  – в ЛЭП включая повышающие и понижающие трансформаторы;  $Q_3$  – на тяговых подстанциях;  $Q_4$  – в контактной сети;  $Q_5$  – на э.п.с. Из энергии  $Q$  топлива, перерабатываемого на электростанциях, полезно используется в системе электрической тяги  $Q_{ЭТ}$

Однако проще определять КПД сложной системы путем последовательного умножения количества энергии, поступающей от предыдущего узла на вход последующего, на КПД последующего узла.

Первым узлом, где происходят потери энергии при ее переработке, является электростанция (КПД  $\eta_1$ ). Затем энергия теряется при передаче ее на тяговые подстанции по высоковольтным линиям электропередачи (КПД  $\eta_2$ ).

При преобразовании энергии на тяговой подстанции также теряется некоторое ее количество (КПД  $\eta_3$ ). Далее имеют место потери энергии в контактной сети (КПД  $\eta_4$ ) и, наконец, в процессе преобразования ее на

э.п.с. в механическую работу по передвижению поезда (КПД  $\eta_5$ ). Таким образом, КПД системы электрической тяги можно рассчитать как

$$\eta_{эл.} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5.$$

Важной энергетической характеристикой э.п.с. является зависимость КПД тягового двигателя от его нагрузки. При работе тягового двигателя возникают механические потери, обусловленные трением в его узлах и узлах тяговой передачи, а также электрические потери, пропорциональные квадрату тока двигателя, выделяющегося в виде тепла в его обмотках. В номинальном режиме КПД тягового двигателя постоянного тока составляет 94–95%.

Так как электровоз питается через контактную сеть от тяговых подстанций, то в зависимости от профиля пути, массы поезда и условий движения он может забирать от тяговой подстанции необходимое количество энергии для движения. Поэтому электровозы способны водить тяжелые поезда с высокими скоростями по трудным участкам пути.

Большая мощность, возможность увеличения ее при трогании поезда и на трудных элементах профиля, высокие скорости движения, работа по системе многих единиц и другие свойства э.п.с. обеспечивают его эффективное использование в эксплуатации.

Железнодорожный транспорт является довольно металлоемкой отраслью хозяйства страны. На его долю приходится около 11% общего расхода металла в стране. Больше половины этого металла идет на производство и ремонт подвижного состава - локомотивов, вагонов, электро- и дизель поездов и т.п.

Казалось бы, что в первую очередь следует добиваться снижения массы электровоза. Однако масса электровоза, от которой зависит его сила тяги, определяемая условиями сцепления колес локомотива с рельсами, задана техническими условиями на поставку электровозов. Поэтому если при создании электровоза удастся снизить его массу, то, чтобы обеспечить заданные тяговые свойства, приходится устанавливать на электровозе балласт.

Опыт постройки э.п.с. показывает, что металлоемкость конструкций по многом зависит от конструктивных решений, технологической готовности производства к серийному выпуску, разработки и внедрения ресурсосберегающей технологии. Например, осуществленные на НЭВЗе такие мероприятия, как перенос автосцепки с рамы тележки на раму кузова электровоза, переход на двухосные бесшкворневые тележки, применение наклонных тяг для передачи силы тяги и т.п., позволили получить значительную экономию материалов.

Одним из эффективных мероприятий, снижающих металлоемкость локомотивного парка, необходимого для выполнения заданного объема перевозок, является совершенствование тяговых и тормозных свойств локомотивов, внедрение мероприятий по повышению использования сцепления колес локомотива с рельсами при существующих номинальных осевых нагрузках и мощности тяговых двигателей.

Одним из существенных преимуществ электрической тяги является возможность рекуперации энергии, (возврат ее в тяговую сеть при движении поезда по спуску и в процессе торможения). Электрическую энергию нельзя запасать впрок (не считая зарядки аккумуляторных батарей); она должна расходоваться по мере выработки. Существуют несколько возможностей ее использования. На участках постоянного тока с интенсивным движением энергию рекуперации потребляют поезда, следующие в тяговом режиме. Особенно это ощутимо там, где имеются подъемы. Благодаря рекуперации энергии электровозом, спускающимся по соседнему пути, возрастает напряжение в контактной сети, растет скорость поезда, движущегося по подъему, и сокращается время его хода. При большой неравномерности движения напряжение в контактной сети может достигать высокого уровня, что затрудняет применение рекуперации.

В рекуперативном режиме работы э.п.с. его тяговые двигатели работают как генераторы, преобразуя энергию движущегося поезда в энергию электрическую, отдаваемую в контактную сеть, создают тормозной момент. Поэтому кинетическая энергия поезда постоянно уменьшается, скорость его движения снижается до значения, устанавливаемого машинистом.

Рекуперативное торможение является также эффективным средством поддержания постоянства скорости движения поезда на спусках. Оно особенно эффективно на затяжных крутых спусках.

В случае применения рекуперации повышается безопасность движения поездов, так как по существу на э.п.с. оказывается второй, кроме пневматического, вид тормоза. Он действует настолько эффективно, что на спусках крутизной до 10–12‰ можно не применять пневматические тормоза. Это исключает необходимость в повторных торможениях, обеспечивает неистощимость и сохранение работоспособности пневматических тормозов.

Эффективность режима рекуперации во многом зависит от состояния оборудования э.п.с., ухода за ним в эксплуатации. При нормальном состоянии э.п.с., используя возможности рекуперативного торможения, можно обеспечить движение поезда по спускам со скоростями, близкими к максимальным допустимым, без перепадов, характерных для пневматического подтормаживания. Это позволяет развивать максимальную скорость к моменту выхода на подъем и эффективно использовать кинетическую энергию поезда на преодоление этого подъема.

Большой экономический эффект, получаемый при рекуперативном торможении, определяется возвратом электрической энергии в контактную сеть и сокращением расхода ее на тягу поездов. Эффект зависит от профиля пути, грузонапряженности участка и получают разным в различных условиях эксплуатации. Обычно возврат энергии достигает 18–22% на горных участках и 5–6% на участках с равнинным или с холмистым профилем пути.

Надежность электрической тяги и ее устройств обеспечивают нормальную работу электрической железной дороги. Под надежностью понимают способность устройства обеспечивать выполнение заданных функ-

ций в течение установленного времени при соблюдении принятой заранее системы технического обслуживания и ремонта.

Для устройств, обеспечивающих безопасность движения, допустимо только одно решение – максимум надежности, практически не отличающейся от единицы. Затраты имеют при этом второстепенное значение.

Расчет надежности в отдельности каждого из устройств еще не означает определения надежности системы электрической тяги в целом, так как эти устройства взаимосвязаны и потому влияют: друг на друга в процессе движения поезда.

Действительно, например, на условия работы устройств электропитания оказывает влияние режим работы электровоза, и не только данного электровоза, но и всех, находящихся на рассматриваемом участке контактной сети.

Состояние рельсового пути влияет не только на колебания и механическую прочность подвижного состава и силы, действующие на оборудование локомотивов и контактные провода, но и на условия взаимодействия токоприемников электровоза с контактной сетью, т.е. на изменение условий токоотбора при движении с различными скоростями. При оценке надежности электрической тяги следует учитывать и аэродинамические воздействия, которым сопутствуют колебания контактной подвески и рельсового пути, и многое другое.

Опыт эксплуатации локомотивов показывает, что их надежность и, в частности, время безотказной работы зависят от трех основных факторов: от качества проектирования и, главное, изготовления на заводе, которое определяется степенью ритмичности производства и соблюдением технологии изготовления, допусками на параметры деталей и узлов, тщательностью сборки узлов; отрицательно сказываются на качестве ошибки проектировщиков и конструкторов, а также нередко практикуемая необоснованная замена материалов, от качества ремонта и технического обслуживания в эксплуатации (пропуск и нарушение последовательности ремонтных операций при отсутствии ритмичности работы депо, недобросовестное выполнение технологии ремонта и технического обслуживания), отсутствие системы контроля качества и т.п.; от организации эксплуатации локомотивов и условий движения поездов – перегрузки локомотивов сверх допустимых значений, работа узлов и агрегатов без технического обслуживания, оставление локомотивов долгое время в отстое и т.д.

Ожидать снижения надежности следует прежде всего у узлов локомотивов, в которых энергия одного вида преобразуется в энергию другого вида. Именно они являются наиболее напряженными. На электровозах переменного тока такими узлами являются выпрямитель, выпрямительно-инверторный преобразователь, тяговые двигатели, тяговая передача, колесно-моторный блок и другие устройства и аппараты.

Важным узлом электровоза является токоприемник. Он передает энергию, но не преобразует ее из одного вида в другой. Его надежность во многом определяется внешними причинами - состоянием контактной сети, а также колебаниями подвижного состава.

В системе электроснабжения устройствами, преобразующими энергию, являются преобразователи на тяговых подстанциях, аппараты защиты и трансформаторы.

Часть преобразуемой энергии затрачивается невосполнимо (потери энергии), так как существует трение, рассеивание, например, тепловой энергии в окружающую среду и т.п. В нормальных условиях эти потери вызывают износ, старение материала, т.е. постепенные отказы. Если возникают ненормальные режимы, потери энергии резко увеличиваются и, как следствие, происходят внезапные отказы, т.е. неконтролируемые, непредсказуемые.

Наступление постепенных отказов устройства легко предотвратить, так как можно контролировать степень его износа. Поэтому основное внимание при определении надежности устройств уделяется внезапным отказам и изучению физических причин их возникновения.

Информация об отказах - первичный документ, позволяющий количественно оценить надежность устройства. Существуют три пути получения этой информации: аналитический, т.е. расчет показателей надежности на основании исследования принятой математической модели работы данного устройства; по данным эксплуатации об отказах устройства; по результатам ускоренных испытаний образца устройства.

Опыт эксплуатации, а также результаты испытаний показывают, что наиболее распространенными повреждениями тяговых двигателей, приводящими к их отказам, являются нарушения электрической прочности изоляции (пробои) обмоток, недопустимое искрение под щетками и круговой огонь на коллекторе, распушение обмотки якоря, ослабление крепления полюсов, катушек на сердечниках, а также механическое разрушение некоторых деталей, в первую очередь таких, как межкатушечные соединения.

Учитывая характер указанных выше отказов, надежность тягового двигателя можно рассматривать как произведение надежностей трех его систем - *изоляционной, коммутационной и механической*; надежность каждой из них изменяется под воздействием условий эксплуатации.

**Электрическая прочность изоляции.** Существенное влияние на надежность (прочность) изоляции тяговых двигателей оказывают нагрев и вибрации. Использовать для оценки надежности изоляции методы разрушающих испытаний, т.е. доводить ее до пробоя, нельзя. Наиболее подходящими являются методы неразрушающего контроля. Они основаны на последовательном повышении напряжения, прикладываемого на каждом шаге испытаний до тех пор, пока ток утечки изоляции не станет резко нарастать: это свидетельствует о приближении пробоя.

**Надежность коммутации.** Установлено, что наиболее существенными причинами нарушения коммутации являются вибрации коллекторно-щеточного узла при движении локомотива, осложняющие условия токо-съема под щетками. В результате возникает искрение, происходит усиленный износ щеток. При ускорениях, равных, например,  $10g$ , и токе на 25% больше часового межламельное напряжение может достигать 41–42 В, в то время как без учета этих ускорений оно составляет 30–32 В. Если

амплитуда ускорений увеличивается в 2 раза, межламельное напряжение возрастает еще больше. Так как вибрации в сильной мере зависят от конструкции и состояния рессорного подвешивания локомотива и рельсового пути, то ясно, какое значение для надежности тяговых двигателей имеет хорошее состояние пути и локомотивов.

**Механическая прочность обмоток.** Под влиянием колебаний относительно точки закрепления на остовах в обмотках тяговых двигателей и межкатушечных соединениях возникают динамические напряжения, которые могут привести к обрыву.

Так как частоты колебаний обмотки и ее элементов зависят от многих причин (жесткости, массы, длины, скорости движения, частоты вибраций), тяговый двигатель можно рассматривать как колебательную систему с большим числом степеней свободы. Эта система может входить в резонанс, с колебаниями, вызванными движением по рельсовому пути, который из-за своей разнотелости порождает также очень большой спектр частот собственных колебаний. Поэтому возможны резонансы колебаний обмоток и других узлов тягового двигателя на многих частотах и, как следствие накопления механических повреждений, разрушение этих обмоток и узлов.

Надежность устройств энергоснабжения - одно из главных условий обеспечения бесперебойного движения поездов. В существующих условиях главной причиной отказов этих устройств являются повреждения контактной сети.

Наименьшей надежностью обладают контактные провода, а на участке переменного тока еще и изоляторы. Повреждения контактных проводов возникают главным образом из-за отступления от установленных норм и правил содержания контактной сети и узлов, в частности токоприемников э.п.с., а также вследствие воздействия неблагоприятных атмосферных условий (гололед, гроза и т.п.). В ряде случаев к нарушениям нормального состояния контактной сети приводят неправильные действия локомотивной бригады, такие, например, как поднятие при движении и опускание токоприемника при включенных вспомогательных машинах, при коротких замыканиях в цепях э.п.с. и т.п. До сих пор недостаточна надежность опор контактной сети.

При оценке надежности устройств электроснабжения приходится учитывать, что скорость движения поезда в значительной мере зависит от напряжения на токоприемнике, которое обычно изменяется в довольно широких пределах, зависящих как от изменения напряжения на шинах тяговых подстанций, так и от расстояния, на котором находится поезд от подстанции, и режимов его работы. Тем не менее в целом электрическая тяга является значительно более надежной, чем тепловозная, даже в условиях ее более высокой интенсивности эксплуатации.

## **1.10. Перспективные виды систем электрической тяги**

В настоящее время в России на железных дорогах применяют две системы электрической тяги:

- постоянного тока 3 кВ;
- переменного однофазного тока 25 кВ 50 Гц.

Недостаток системы постоянного тока связан с относительно низким напряжением, что требует для реализации необходимой мощности значительных токов. Следовательно, необходимо значительное сечение проводов контактной сети, частые расположения тяговых подстанций.

Этот недостаток устранен в системе переменного тока, но она имеет свои недостатки: повышенное электромагнитное мешающее влияние из-за соединения переменного магнитного поля, асимметричная загрузка фаз питающей 3-х фазной сети, более сложный электроподвижной состав.

В свете дальнейших перспектив развития систем электрической тяги следует отметить то направление, которое предусматривает создание системы постоянного тока высокого напряжения.

Большинство железных дорог Содружества Независимых Государств (СНГ) электрифицировано на постоянном токе при напряжении в контактной сети 3 кВ. Однако такое напряжение не является оптимальным ни для устройств электроснабжения, ни для э.п.с.. Оно представляет собой компромиссное решение, определяемое стоимостью потерь энергии в такой системе и стоимостью ее устройств.

Повышение же напряжения в контактной сети постоянного тока, например, до 6 или 12 кВ и более с целью уменьшения потерь энергии в системе при существующих принципах регулирования режимов работы э.п.с. приводит к значительному удорожанию электрической аппаратуры и тяговых двигателей.

Характерно, что отмеченные недостатки системы тяги постоянного тока 3 кВ связаны с тем, что в ней существует непосредственная электрическая связь между напряжением контактной сети и напряжением тягового электрооборудования. Если устранить эту связь и обеспечить возможность регулирования в широких пределах напряжения на тяговых двигателях, то можно будет повысить напряжение в контактной сети в несколько раз, т.е. существенно улучшить технико-экономические показатели системы тяги постоянного тока.

Новые возможности в этом отношении открывает применение систем импульсного преобразования энергии, устраняющих непосредственную связь между напряжениями контактной сети и тяговых двигателей. Применение тиристорного управления режимами работы тяговых двигателей позволяет плавно регулировать в широком диапазоне напряжение, подводимое к тяговым двигателям, независимо от значения напряжения в контактной сети.

Перспективными являются системы, при которых в качестве тяговых используются бесколлекторные двигатели - асинхронные или синхронные (вентильные).

Если в системе тяги постоянного тока поднять напряжение в контактной сети в 2–3 раза, то при использовании тиристорного управления работой тяговых двигателей, помимо экономии энергии при пуске, уменьшения количества аппаратуры управления э.п.с., снизится стоимость сооружения и эксплуатации системы электроснабжения. На электрифицированных участках при повышенном в несколько раз напряжении в контактной сети будет меньше тяговых подстанций, возрастет скорость движения поездов и пропускная способность участков по условиям электроснабжения.

Перевод участков железных дорог с 3 на 6 кВ и более не может быть осуществлен сразу на всей сети железных дорог; в первую очередь это целесообразно выполнить для наиболее грузонапряженных участков, на которых не хватает пропускной способности по условиям электроснабжения при напряжении 3 кВ.

Примыкающие к ним относительно малодетальные участки могут продолжать работать при напряжении в контактной сети 3 кВ.

При переходе с участка, имеющего в контактной сети напряжение 6 кВ, на участок с напряжением 3 кВ электровоз можно не менять, а выключить на нем половину преобразователя энергии, благодаря чему он и будет работать на напряжении 3 кВ. Наоборот, при переходе с участка с напряжением 3 кВ на участок с напряжением 6 кВ на электровозе включают вторую половину преобразователя.

Этот принцип кратного дробления мощности преобразователя энергии на электровозе может быть использован и при напряжении в контактной сети 12 и 24 кВ постоянного тока.

Повышать напряжение в контактной сети сверх 24 кВ при существующих устройствах электроснабжения уже невыгодно: резко возрастают стоимость устройств и их техническое обслуживание, а также потери энергии как в системе электроснабжения, так и на э.п.с.

Возможна и другая перспективная система тяги постоянного тока при напряжении в контактной сети 6 кВ и более. В этом случае постоянный ток контактной сети с помощью специальных преобразователей, устанавливаемых на э.п.с., преобразуется в трехфазный (или более) переменный ток высокого напряжения регулируемой частоты, на котором работают трехфазные асинхронные тяговые двигатели. Предполагается одновременно плавное бесконтактное регулирование напряжения и режимов работы этих двигателей.

Для практического осуществления такой системы (рис. 1.19) преобразователи должны быть выполнены на высоковольтных тиристорах. Асинхронные тяговые двигатели должны быть рассчитаны на напряжение, например, 6 или 12 кВ и более. Подобные двигатели на напряжение 10 кВ мощностью 1000 кВ серийно выпускает промышленность. Однако следует помнить, что тяговые двигатели э.п.с. являются машинами предельного исполнения, т.е. такими, у которых должно быть обеспечено использование конструктивных, технологических и эксплуатационных возможностей при сохранении необходимой надежности. При разработке асинхронных фазных тяговых двигателей целесообразно для расширения диапазона регулирования их характеристик предусмотреть включение в цепь ротора

конденсаторов. Меняя их емкость, можно существенно изменять не только вращающий «момент двигателя», но и энергетические показатели системы тяги в зависимости от скорости движения как в тяговом режиме, так и при рекуперации.

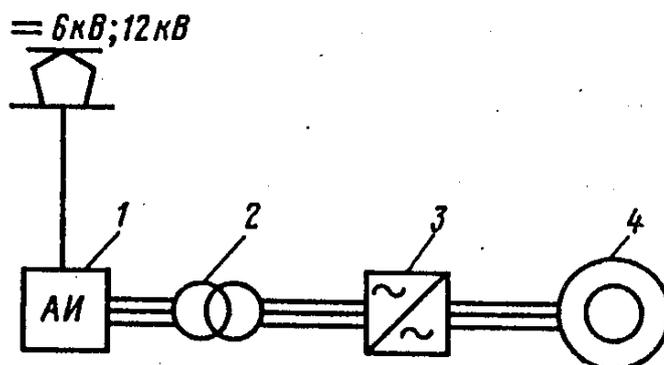


Рис. 1.19. При системе тяги постоянного тока, предусматривающей преобразование его в переменный, на электровозе установлены для питания автономный инвертор 1, трансформатор 2, преобразователь однофазного тока в многофазный 3, асинхронный тяговый двигатель 4

Однако при таком способе увеличения вращающего момента тягового двигателя, а следовательно, и тока ротора существенно возрастает нагрев его обмоток. Поэтому для обеспечения электрической прочности обмоток двигателя нужно использовать более теплостойкую по сравнению с существующей изоляцию обмоток, например полиамидную, и, кроме того, интенсивную систему охлаждения двигателей.

Известен и другой вариант системы электрической тяги постоянного тока с асинхронными тяговыми двигателями при напряжении в контактной сети 6; 12 кВ и более. В этом случае на электровозе имеется специальный преобразователь энергии постоянного тока с напряжением контактной сети в энергию постоянного же тока, но напряжением 3 кВ. Эта энергия постоянного тока поступает на вход автономного инвертора напряжения, вырабатывающего трехфазный ток для питания асинхронных тяговых двигателей.

Принципиальная схема такой системы электрической тяги представлена на рис. 1.20. Такой электровоз является двухсистемным: он может работать на электрифицированном участке постоянного тока с напряжением в контактной сети как 12, так и 3 кВ. В заключение отметим, что по мере новых успехов различных отраслей науки и техники, и прежде всего электроники, преобразовательной и микропроцессорной техники будет происходить все более обстоятельная переоценка свойств и технико-экономических показателей каждого вида тяги. Несомненно, это приведет к новым предложениям по дальнейшему совершенствованию существующих и созданию новых, более экономичных систем тяги.

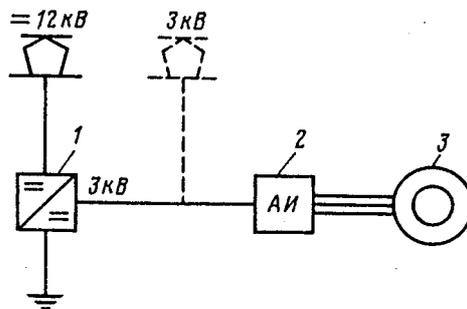


Рис. 1.20. Электровоз, предназначенный для работы на участках постоянного тока с напряжением 3 и 12 кВ, имеет следующие основные узлы: преобразователь 1 постоянного тока напряжением 12 кВ в постоянный ток напряжением 3 кВ, автономный инвертор 2, асинхронный тяговый двигатель 3 (штриховые линии – система тяги при напряжении 3 кВ постоянного тока в контактной сети)

Однако пока развитие электрической тяги осуществляется в рамках существующих систем постоянного и переменного тока. Главная задача состоит в реализации э.п.с. с асинхронными двигателями.

## 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

### 2.1 Основные элементы силовой цепи э.п.с. постоянного тока

Электрический подвижной состав оборудован электрическими аппаратами для регулирования реализуемой им силы тяги и скорости поезда, а также для изменения направления движения (реверсирования) и защиты от аварийных и других опасных режимов. Электрическая цепь электровоза или моторного вагона содержит тяговые электродвигатели и аппараты для их регулирования и защиты, начиная от токоприёмника для снятия энергии с контактной сети и кончая заземляющим устройством на колёсной паре; она называется *силовой цепью*. Графическое изображение этой электрической цепи при помощи условных обозначений называется *схемой электрической цепи* (электрической схемой). Термины «электрическая цепь» и «электрическая схема» имеют различное значение и их не следует путать.

*Электрическая цепь* – это совокупность электрических машин, преобразователей электроэнергии, аппаратов, приборов и соединяющих их проводов, образующих пути для протекания электрического тока регулируемой величины.

*Электрическая схема* – это чертеж электрической цепи, выполненный при помощи условных обозначений, согласно действующим метрологическим стандартам.

На упрощенной электрической схеме силовой цепи э.п.с. постоянного тока с четырьмя тяговыми электродвигателями (рис. 2.1) якорные обмотки тяговых электродвигателей вместе с коллекторно-щёточным аппаратом обозначены *Я1, Я2, Я3* и *Я4*, а обмотки возбуждения главных полюсов этих электродвигателей – *К1, К2, К3* и *К4*. Ниже дано краткое описание основных элементов этой схемы.

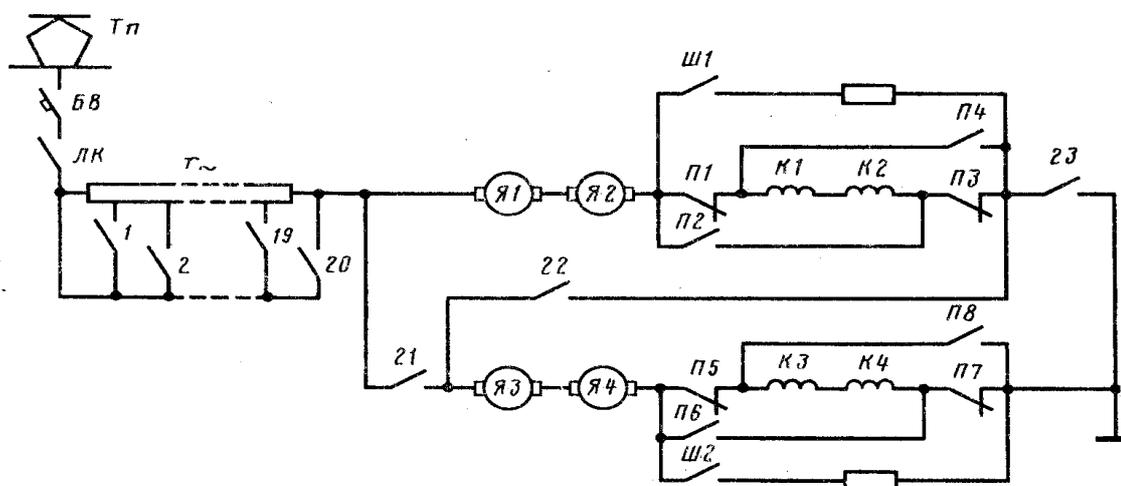


Рис. 2.1. Упрощённая электрическая схема силовой цепи э.п.с. постоянного тока

Тяговый электродвигатель является главным компонентом силовой цепи электровоза или моторного электровагона. Рассмотрим схему электрических соединений обмотки якоря и обмоток возбуждения полюсов (рис. 2.2). Обмотки полюсов в корпусе тягового двигателя соединены последовательно так, что при протекании тока по этой цепи северные  $N$  и южные  $S$  полюса чередуются. Начало и конец этой цепи обозначают соответственно  $K$  и  $KK$ . Неподвижные обмотки полюсов электрически соединены с вращающейся обмоткой якоря тягового двигателя в последовательную цепь через щетки  $\text{Щ}1\text{--}\text{Щ}4$ , прижатые щёткодержателями к цилиндрической поверхности коллектора. Количество этих щеток равно числу полюсов электродвигателя. К щеткам присоединены провода, соединяющие обмотку якоря с другими элементами силовой электрической цепи двигателя и электроподвижного состава в целом. Чтобы различать начало и конец обмотки якоря, их обозначают соответственно  $Я$  и  $ЯЯ$ . Таким образом, независимо от числа главных полюсов (обычно 4–8) тяговый электродвигатель имеет четыре выводных внешних провода:  $K$  и  $KK$  от обмотки возбуждения,  $Я$  и  $ЯЯ$  от обмотки якоря, т.е. от щёток.

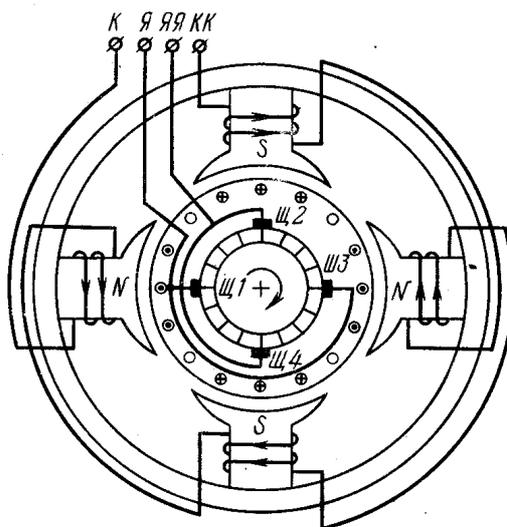


Рис. 2.2. Схема электрических соединений обмотки якоря и обмоток возбуждения тягового электродвигателя

В тяговом электродвигателе (рис. 2.3) на внутренней поверхности корпуса остова 1, отлитого из стали, болтами закреплены сердечники главных полюсов 4 и 9, на которых расположены катушки 3 и 8 обмотки возбуждения. Сердечник якоря 7 и коллектор 11 напрессованы на вал 6, который вращается в роликовых подшипниках 5, установленных в подшипниковых щитах 12. На остова предусмотрены щёткодержатели 10, количество которых равно числу щёток или числу главных полюсов. При работе электродвигателя по его якорной обмотке и обмотке возбуждения протекает электрический ток, создающий вращающий момент, но при этом вызывающий потери энергии в двигателе и нагревание обмоток. Для

охлаждения двигателя в его остове предусмотрен патрубок 2, по которому в электровозах поступает воздух от вентилятора, установленного в кузове электровоза. Тяговые двигатели электровозов постоянного тока имеют мощность 500–1000 кВт при номинальном напряжении 1500 В. Изоляция обмоток относительно остова выполнена на максимальное напряжение контактной сети 4000 В.

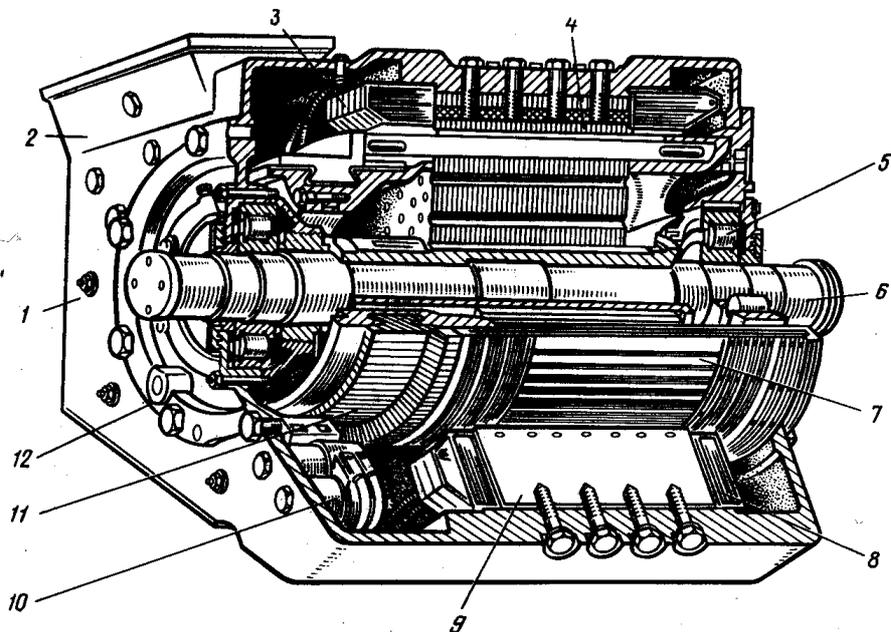


Рис. 2.3. Тяговый электродвигатель постоянного тока

При напряжении контактной сети 3000 В включают последовательно не менее двух двигателей. Тяговые двигатели электропоездов пригородного сообщения имеют мощность до 200–300 кВт при номинальном напряжении у электропоездов старых выпусков 1500 В (электропоезд ЭР2), как и на электровозах. Но на электропоездах последующих выпусков (ЭР2Р, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭД4, ЭД4М, ЭД4МК, ЭР200) установлены тяговые двигатели с номинальным напряжением 750 В, что облегчает реализацию электрического торможения – рекуперативного и реостатного, когда тяговые двигатели работают в генераторном режиме. В силовой цепи этих электропоездов последовательно включено не менее четырех двигателей. Это позволяет снизить межламельное напряжение на коллекторе и значительно повышает надёжность двигателя.

Тяговые двигатели вагонов метрополитена получают питание от контактного рельса (825 В) и имеют мощность до 100 кВт при номинальном напряжении 412,5 В. На городском электротранспорте (трамвай и троллейбус) тяговые двигатели мощностью 50–90 кВт питаются от сети напряжением 600–800 В.

Токоприемник Тп, установленный на крыше кузова электровоза или моторного вагона (см. рис. 2.1), подает питание на силовую цепь э.п.с. Он обеспечивает надежный непрерывный контакт движущегося электровоза или моторного вагона электропоезда с контактным проводом. Для этого

пружинный механизм токоприемника создает постоянную силу нажатия контактного элемента независимо от высоты подвеса контактного провода. Основание 1 токоприемника (рис. 2.4) опирается через изоляторы 2 на крышу кузова электровоза или моторного вагона. Вокруг шарниров 5 могут поворачиваться нижние рычаги 6 подвижной рамы токоприемника, соединенные шарнирами 7 с верхними рычагами 8, на которых упруго закреплены один или два полоза 9, скользящие, при движении поезда, по контактному проводу. Полозы 9 имеют графитовые или медные накладки, прижатые к контактному проводу и образующие с ним скользящий электрический контакт. Подъем токоприемника в рабочее положение выполняет пружина 3, которая поворачивает рычаги 6. Для опускания токоприемника в нерабочее положение предусмотрена более сильная опускающая пружина 4, которая при поднятом токоприемнике заблокирована пневматическим цилиндром 10. Если же из последнего выпустить сжатый воздух, то опускающая пружина 4 преодолет усилие более слабой подъемной пружины 3 и опустит токоприемник в нерабочее положение.

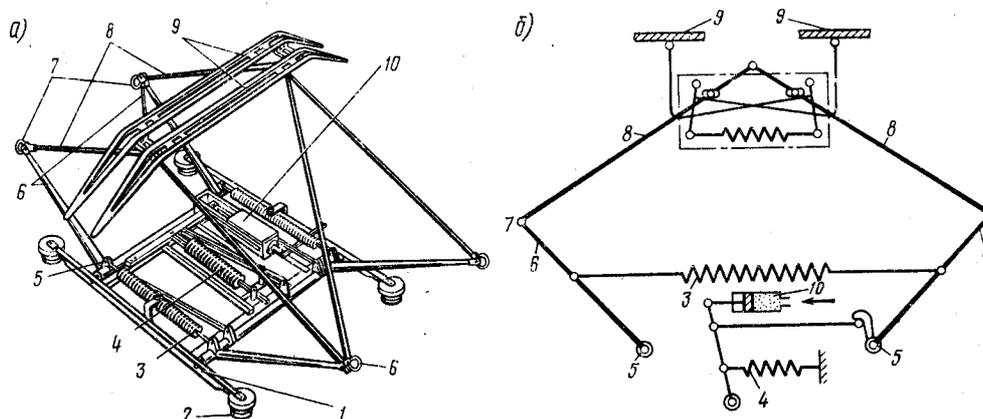


Рис. 2.4. Токоприемник (а) и его кинематическая схема (б)

Токоприемники э.п.с. постоянного и переменного тока имеют незначительные различия. При одинаковой мощности э.п.с. ток, потребляемый из контактной сети постоянного напряжения 3 кВ больше примерно в 8 раз, чем для переменного напряжения 25 кВ. Поэтому токоприемники постоянного тока имеют более высокую силу нажатия на контактный провод до 180 Н, а для переменного тока достаточно нажатия 60–90 Н. Рассмотренная конструкция токоприемника хорошо работает при скоростях до 160 км/ч. Для скоростного подвижного состава (до 300 км/ч) используют токоприемники специальной конструкции со строго стабилизированным нажатием. Они обеспечивают хороший токосъем при любых скоростях, но при строго постоянной высоте контактного провода, что достигается применением специальных контактных подвесок, которые будут рассмотрены ниже.

Аппараты силовой цепи э.п.с. находятся под напряжением свыше 1000 В и прикосновение к ним в рабочем состоянии опасно для жизни.

Кроме того, в этих аппаратах протекают токи, измеряемые сотнями и даже тысячами ампер, так что для надежной работы аппарата его контакты должны быть прижаты друг к другу силой 200–500 Н. Эти два обстоятельства исключают возможность переключения аппаратов непосредственно усилием руки машиниста. Поэтому на э.п.с. применяют *косвенное управление*, при котором все аппараты силовой цепи имеют пневматические или электрические приводы для перемещения подвижных контактов, а машинист в кабине управления переключает только цепи управления этими приводами, по которым протекают небольшие токи около 1 А при напряжении 50 или 110 В. Косвенное управление имеет следующие преимущества: переключение цепей управления не требует от машиниста значительных физических усилий; размещение высоковольтных электрических аппаратов силовой цепи в закрытой и заблокированной высоковольтной камере исключает возможность попадания людей под напряжение; имеется возможность управлять из одной кабины несколькими сцепленными вместе электровозами или моторными вагонами (система многих единиц); возможна полная автоматизация процессов управления.

Принцип косвенного управления реализуется силовыми контакторами.

*Контактор* – это электрический аппарат с косвенным управлением, предназначенный для замыкания и размыкания силовой цепи (название происходит от английского слова *contact* – соприкосновение). Контактор (рис. 2.5,а) имеет силовые контакты: неподвижный 1 и подвижный 2, соединенные с проводами силовой цепи электровоза. Для перемещения подвижного контакта 2 служит пневматический привод 4, связанный с подвижным силовым контактом 2 изоляционным стержнем 3. На трубопроводе 5 сжатого воздуха установлен электромагнитный вентиль 6. Машинист включает катушку вентилея 6 выключателем 7, который установлен в кабине машиниста и соединен с источником низкого напряжения 50 или 110 В проводами цепи управления.

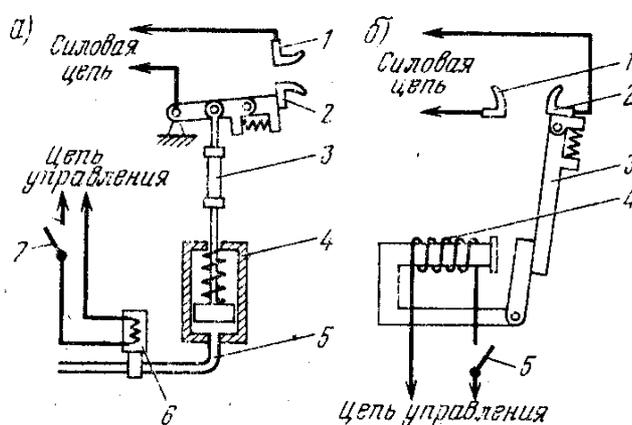


Рис. 2.5. Кинематическая схема электропневматического (а) и электромагнитного (б) контакторов

В индивидуальных контакторах э.п.с. гораздо реже используют также электромагнитный привод (рис. 2.5,б). Такие контакторы также имеют силовые контакты: неподвижный 1 и подвижный 2, причем, рычаг 3 подвижного контакта перемещается электромагнитом 4, который управляется низковольтным выключателем 5. В групповых контакторных аппаратах, например на электровозах переменного тока, обычно используют специальный электродвигательный привод.

Контакторы в силовой цепи э.п.с. выполняют различные функции. Линейный контактор ЛК (см. рис. 2.1) предназначен для замыкания или размыкания силовой цепи в процессе управления электровозом. Последовательно с тяговыми двигателями включен пусковой резистор  $r$ , разделенный на несколько секций. Контакторы 1–20, подключенные параллельно секциям пускового резистора, предназначены для ступенчатого регулирования его сопротивления. Контакторы 21, 22 и 23 служат для соединения тяговых электродвигателей в различные схемы-группировки (С, СП, П).

При включенном контакторе 22 и отключенных контакторах 21 и 23 все четыре тяговых двигателя соединены последовательно (группировка С). При замкнутых контакторах 21 и 23 и разомкнутом 22 тяговые двигатели включены в две параллельные ветви по два двигателя последовательно в каждой (группировка П). Соединение тяговых двигателей, при котором в каждой параллельной ветви остается по одному двигателю, не предусматривается, так как тяговые двигатели постоянного тока имеют номинальное напряжение не выше 1500 В и не рассчитаны на прямое подключение к контактной сети с напряжением 3000 В.

Для ослабления возбуждения тяговых электродвигателей параллельно обмоткам возбуждения подключают шунтирующие резисторы контакторами Ш1 и Ш2.

*Пусковой резистор* выполнен из металлической ленты, намотанной на керамические изоляторы. Поскольку при протекании тока лента нагревается до плюс 350–450 °С, то очень важно, чтобы её электрическое сопротивление при этом не изменялось. Для этого разработаны специальные сплавы. Обычно применяют ленту из сплава железа, хрома и алюминия (фехраль). Пусковой резистор с контакторами для переключения его секций называют пусковым реостатом. Сопротивление пускового реостата изменяют степенями при переключении его секций контакторами. Пусковой реостат имеет наибольшее сопротивление, когда контакторы 1–20 разомкнуты. При поочередном включении этих контакторов отдельные ступени пускового резистора замыкаются накоротко и сопротивление в цепи тяговых двигателей соответственно постепенно, по мере разгона поезда, уменьшается до нуля. На рис. 2.6,а приведена схема с последовательным закорачиванием секций  $R1–R4$  при замыкании контакторов 1–4, в которой количество ступеней регулирования общего сопротивления резистора  $R$  равно числу контакторов. Там же дана таблица замыкания контакторов, поясняющая работу этой схемы, в которой

перечислены позиции регулирования, указано сопротивление пускового реостата на каждой позиции и даны номера замкнутых при этом контакторов. На рис. 2.6,б приведена более сложная схема, которая позволяет увеличить число ступеней, применяя комбинированное включение секций  $R1-R4$  реостата. Здесь количество контакторов и секций реостата меньше.

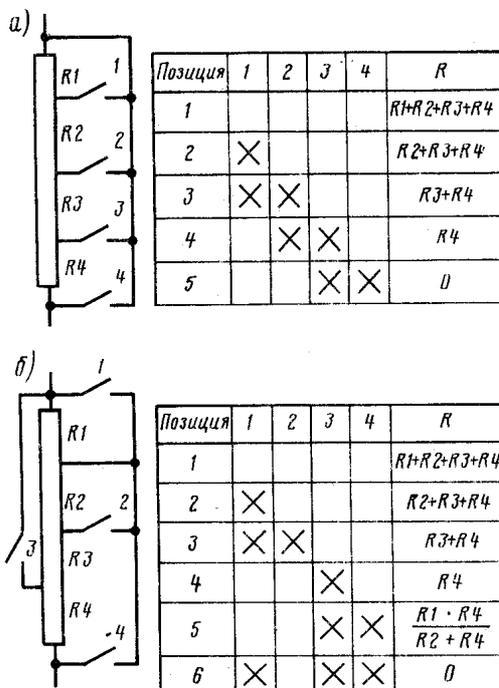


Рис. 2.6. Схемы пускового реостата с последовательным выводом секций (а) и с комбинированным включением секций (б)

Режимы работы пускового или тормозного реостата на электровазе и электропоезде существенно отличаются друг от друга. Процесс разгона электроваза с тяжелым грузовым поездом, особенно на подъеме, может занимать несколько минут. Еще более продолжительным может быть режим реостатного торможения грузового поезда при движении по затяжному спуску на горном участке. Поэтому на электровазах всегда предусматривают принудительное охлаждение реостата от вентилятора. Причем для экономии энергии электродвигатель вентилятора выгодно подключать параллельно одной из секций этого же реостата. На электропоездах реостат нагружен пусковым током не более 10–15 с в каждом цикле движения от остановки до остановки. Поэтому такой реостат устанавливают под кузовом моторного вагона или же на его крыше, где происходит естественное охлаждение секций реостата потоком встречного воздуха.

*Реверсор* – это электрический аппарат, предназначенный для изменения направления движения э.п.с. (от английского *reverse* – противоположность). Этого можно добиться двумя способами: изменить направление тока  $I$  в якорных обмотках  $Я-ЯЯ$  тяговых двигателей, сохранив прежним направление тока возбуждения и магнитного потока главных

полюсов (рис. 2.7,а), или изменить направление тока в обмотках возбуждения  $K-KK$ , сохранив прежним направление тока в якорных обмотках (рис. 2.7,б). Для таких переключений нужно четыре контактора на каждую группу тяговых электродвигателей. Контактры П1–П8 (см. рис. 2.1) обычно объединены в один групповой аппарат – реверсор с общим пневматическим приводом. При движении вперед замкнуты контакторы с нечетными номерами, при движении назад – контакторы с четными номерами.

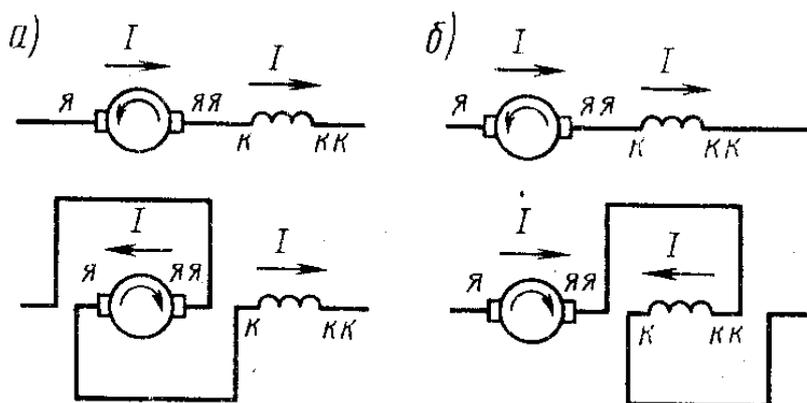


Рис. 2.7. Схемы реверсирования якоря (а) и обмотки возбуждения (б) тягового двигателя

При работе э.п.с. постоянного тока имеют место потери энергии в пусковых резисторах. При пуске ток тягового двигателя  $I_d$  поддерживают постоянным и равным току регулирования  $I_n$ . Для этого в цепь тягового двигателя, питающегося от сети с напряжением на токоприемнике  $U_3$ , (рис. 2.8,а), должен быть включен резистор сопротивлением  $r$ , значение которого определим из уравнения равновесия напряжений  $U_3 = U_d + U_r = C\Phi v + I_n(r + r_d)$  как

$$r = \frac{U_3 - C\Phi v}{I_n} - r_d,$$

где  $r_d$  – сопротивление обмоток двигателя.

