

*Государственное унитарное предприятие*  
**«МОСКОВСКИЙ МЕТРОПОЛИТЕН»**  
*Учебно-производственный центр*

# Теория тяги

*Пособие по подготовке машинистов  
электропоездов метрополитена.*

*Презентацию подготовил Кулецкий А.Н.*

*Москва 2016 год.*

Версия 16-01

Kuletsky A.N.

# *Введение.*

*Впервые попытка по организации электрической тяги были предприняты в 1875г. русским инженером Пироцким. Питание электродвигателя осуществлялось по ходовым рельсам, изолированным друг от друга. Через 11 лет в Америке появился первый в мире электрифицированный участок железной дороги Балтимор - Огайо. Он работал на постоянном токе, напряжением 600В. В начале 20х годов прошлого века электрифицированные железные дороги появились в Англии и во Франции. В СССР электрификация железных дорог началась в 1926г. в Баку, а в 1929г. введён участок Москва - Мытищи, а первая линия метро была пущена в Москве 15 мая 1935г.*

**Тяга поездов** Тяга поездов — прикладная наука, изучающая комплекс вопросов, связанных с теорией механического движения **поезда** Тяга поездов — прикладная наука, изучающая комплекс вопросов, связанных с теорией механического движения **поезда и** работой **ЛОКОМОТИВОВ** Тяга поездов — прикладная наука, изучающая комплекс вопросов, связанных с теорией механического движения **поезда и** работой **локомотивов**. В наука основана на физическая прикладной



## *Как наука, тяга поездов состоит из четырёх взаимосвязанных разделов:*

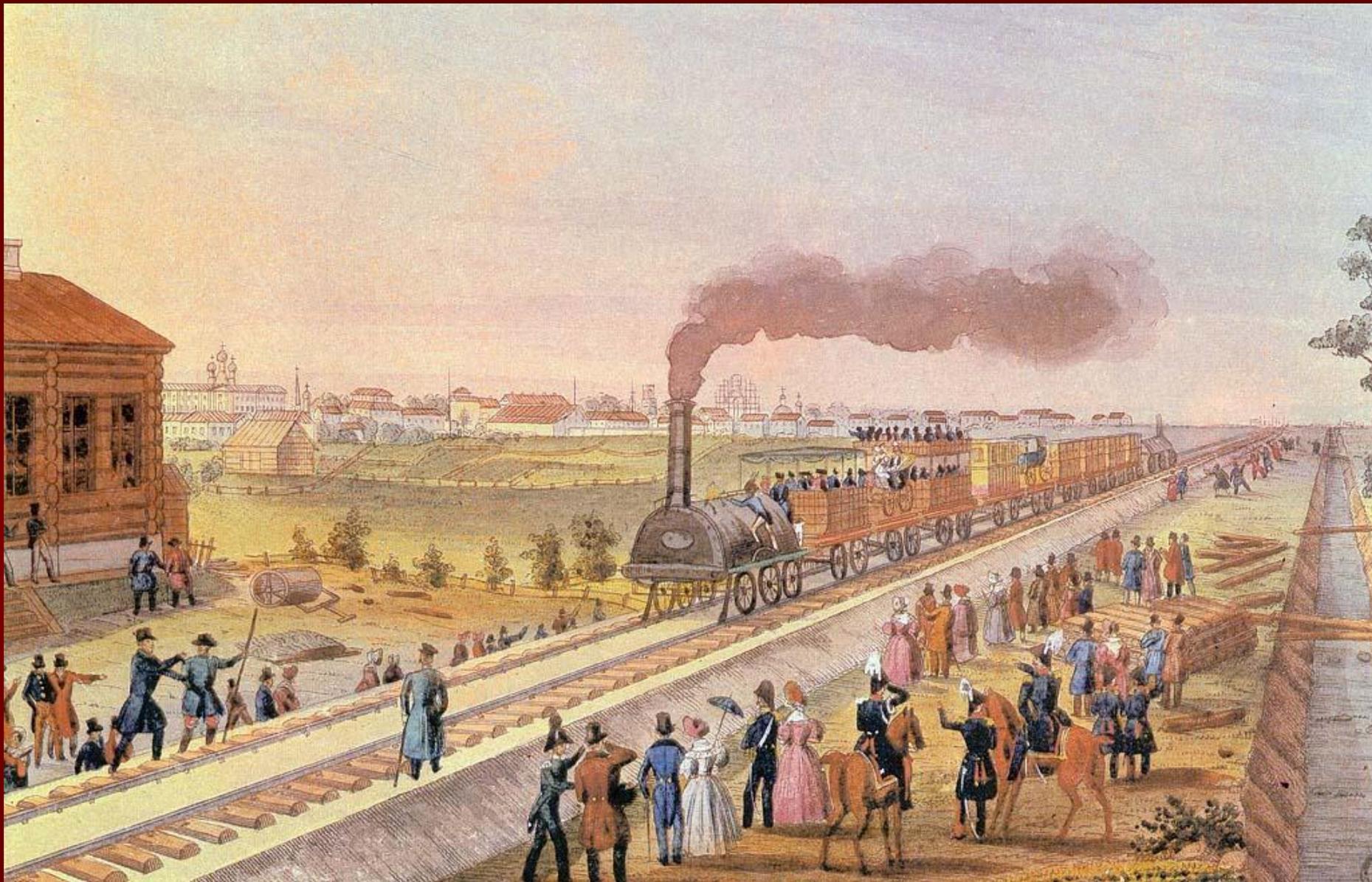
- ◆ *теория тяги — решает вопросы эффективной эксплуатации железных дорог, рассчитывает параметры вновь проектируемых линий, участков, переводимых с одного вида тяги на другой;*
- ◆ *ТЯГОВЫЕ РАСЧЁТЫ — рассматривает условия движения поезда и решает задачи, связанные с определением сил, действующих на поезд, и законов движения поезда под воздействием этих сил;*
- ◆ *ИСПЫТАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА испытания подвижного состава — служат для определения и проверки основных данных локомотивов, необходимых для нормирования веса поезда и тяговых расчётов;*
- ◆ *техника вождения поездов*

# *Объектом изучения являются:*

- ◆ *основные закономерности, которые едины для различных видов тяги (паровозная, ТЕПЛОВОЗНАЯ основные закономерности, которые едины для различных видов тяги (паровозная, тепловозная, ЭЛЕКТРОВОЗНАЯ) и особенности, свойственные каждому из этих видов в отдельности.*

## *Непосредственно исследуются следующие параметры:*

- ◆ *природа сил, действующих на поезд (в том числе и сцепление колёс с рельсами)*
- ◆ *процесс образования данных сил и их ограничения*
- ◆ *методы повышения мощности и сил тяги локомотива и тормозных сил, реализуемых в поезде*
- ◆ *режимы управления тягой и регулирования системы тягового электроснабжения*
- ◆ *сопротивление движению подвижного состава и его составных элементов, с целью совершенствования методики тяговых расчётов и изыскания путей сокращения энергетических затрат на перемещение поездов*
- ◆ *действия тормозных сил и способы управления ими*



*Поезд на Царскосельской железной дороге.*

**Условия работы  
электроподвижн**

**ого**

**состава и**

**устройств**

**электроснабжен**

**ия**

- ◆ **Поезд** — сложная система, состоящая из многих элементов с упругими (междувагонные сцепления) и жесткими (рельсы или дорожное покрытие без учета их упругости) взаимными связями. Вследствие этого при движении поезда по рельсовому пути или дороге имеет место сложное движение.



- ◆ **Полезная составляющая движения поезда** — перемещение вдоль оси пути, сопровождается вращением колес, осей, якорей тяговых двигателей, элементов движущих механизмов, а также различных колебаний.

*На начальной стадии изучения процесса движения поезда рассматривают только его полезное перемещение, используя при этом номинальные характеристики установившихся режимов работы электроподвижного состава и системы электроснабжения.*

*Однако в процессе реализации сил тяги и торможения проявляется совокупность сложных механических, электромагнитных и электромеханических процессов, происходящих в системе – контактная сеть – электроподвижной состав – рельсовый путь – тяговая подстанция.*

*Поэтому тяговые и тормозные свойства электроподвижного состава отличаются от номинальных расчетных и в ряде случаев – значительно от приведенных в технических паспортах, соответствующих идеальным статическим режимам работы.*

*При движении поезда на процесс реализации сил тяги и торможения электроподвижного состава накладываются изменения нагрузок его узлов. Это вызвано прежде всего случайными и периодическими колебаниями электроподвижного состава, как электромеханической системы со многими степенями свободы.*

*Динамические нагрузки, возникающие в результате случайных и периодических колебаний вызывают появление изменяющихся во времени механических напряжений прежде всего в рельсах и неподрессоренных узлах электроподвижного состава – колесных парах, буксах, рессорном подвешивании, а при индивидуальном приводе с опорно – осевым подвешиванием – в раме, тяговых двигателях и электрооборудовании.*

*Взаимодействие подвижного состава и пути заметно осложняется в весенний и зимний периоды года, когда путь становится особенно неравноупругим вследствие неравномерного оттаивания и замерзания полотна. Именно в эти периоды возникает наибольшее количество повреждений и отказов оборудования подвижного состава и контактной сети.*

*Изменения нагрузок колесных пар, являющиеся следствием динамики движения не только отражаются на прочности узлов подвижного состава, но и неблагоприятно сказываются на его тяговых и тормозных свойствах – ухудшаются условия сцепления колес с рельсами, нарушается реализация условий тяги и торможения, растет неравномерность распределения токов между параллельно работающими тяговыми двигателями, а следовательно – увеличивается разница температур нагрева их обмоток, снижается долговечность и надежность наиболее нагруженных из них.*

*По мере увеличения срока службы подвижного состава, в результате износа изменяются диаметры его колесных пар, возникает разница диаметров колес по кругу катания. Эти факторы так же вызывают изменения тяговых и тормозных свойств подвижного состава, особенно имеющего групповой привод.*

*В процессе движения поездов меняется их взаимное положение на участке, нагрузка (ток) тяговых двигателей и скорости поездов, каждый из которых находится в данный момент на элементе профиля, оказывающем свое сопротивление движению. В зависимости от профиля участка одни поезда могут следовать в режиме тяги, другие – в режиме торможения.*

*Вследствие этого меняются нагрузки тяговых подстанций, а поэтому и уровень напряжения в контактной сети до токоприемников каждого вагона. Это напряжение подводится к тяговым двигателям, следовательно влияет на работу электроподвижного состава.*

*Связь режимов работы подвижного состава и устройств электроснабжения проявляется не только во взаимном влиянии напряжений, но и в условиях токосъема при движении поезда.*

*Токосъем должен быть непрерывным и безыскровым, а значит, всякое изменение нажатия токоприемника на контактный рельс может снизить качество токосъема.*

*В тех случаях, когда все же происходит отрыв токоприемника от контактного рельса, в электрических цепях подвижного состава, в первую очередь – постоянного тока, которые непосредственно питаются напряжением контактной сети, возникают **неустановившиеся процессы**, приводящие не только к дополнительным потерям электроэнергии, но и в ряде случаев к повреждению оборудования, срабатыванию защиты на электроподвижном составе и на тяговой подстанции.*

*Отключение защиты на вагоне при движении его в составе поезда, иными словами прекращение его питания от контактной сети вызывает оттяжку подвижного состава, т.е. продольный удар по автосцепке вагона, тем больший по силе, чем больше масса состава и меньше скорость его движения.*

Таким образом, процессы, происходящие в системе электрической тяги, характеризуются при движении поезда с одной стороны, механикой его движения, с сопутствующими явлениями, с другой – электромагнитными и электромеханическими взаимодействиями электроподвижного состава и систем электроснабжения.

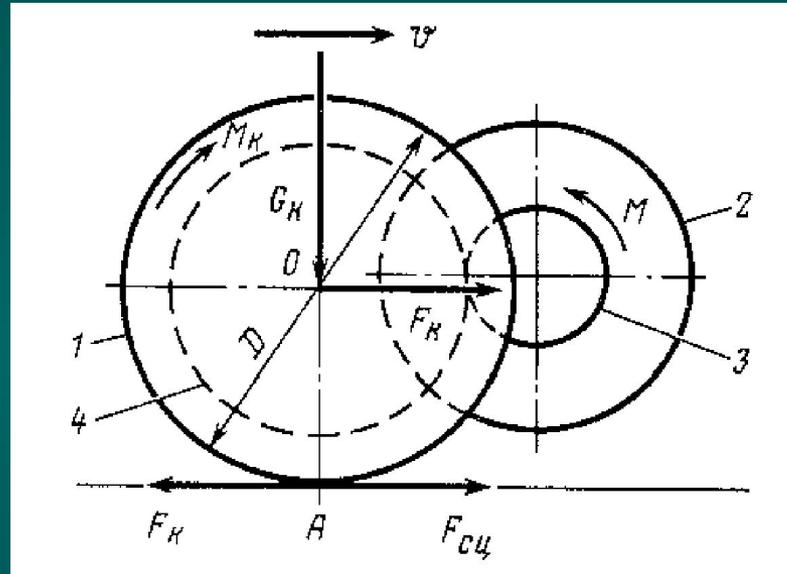
Взаимодействие этих двух групп факторов, изменяющееся по времени, определяет в конечном итоге тяговые, тормозные и энергетические свойства подвижного состава и энергетику работы системы электроснабжения, т.е. электрической тяги в целом.

2.

**Вопросы теории  
ЛОКОМОТИВНОЙ  
ТЯГИ ДЛЯ  
МАШИНИСТОВ  
электропоездов.**

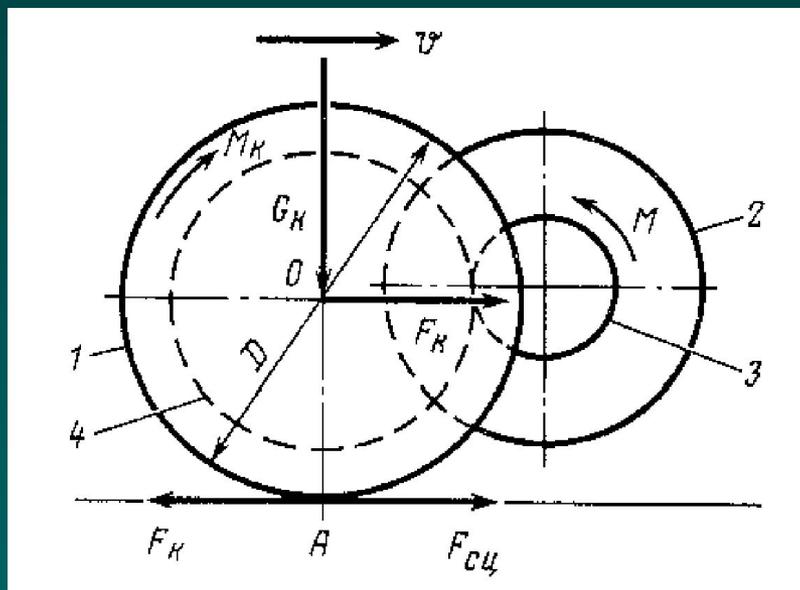
# Образование силы тяги при абсолютно жестком колесе и рельсе.

*Современный электроподвижной состав имеет индивидуальный тяговый привод, применительно к которому и рассмотрена поставленная задача об образовании силы тяги.*



*На рисунке изображена колесная пара с индивидуальным приводом. Ее правое и левое колеса совмещены в одной плоскости. Условимся называть это изображение просто колесом. Цифрами обозначены: 1-колесная пара с индивидуальным приводом; 2-тяговый двигатель; 3-шестерня; 4-большое зубчатое колесо. Силу нажатия ( $G_k$ ) колеса на рельс будем считать постоянной.*

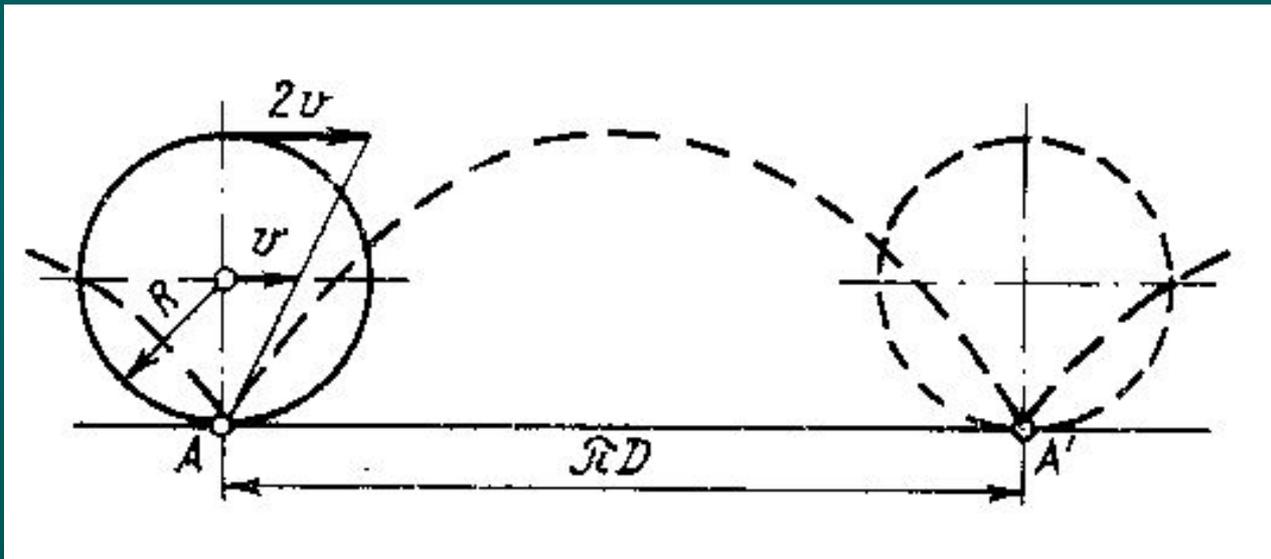
*Рассмотрим действие на колесо вращающего момента ( $M_{вр}$ ) тягового двигателя, реализуемого на его валу при неравномерном движении.*



Часть этого момента ( $M_{тр}$ ) затрачивается на преодоление сил трения в тяговом электроприводе, другая часть ( $M_{ин}$ ) на преодоление момента инерционных сил вращательного движения колеса и деталей тягового привода. Поэтому на колесо будет действовать вращающий момент, определяемый следующим образом:  $M_k = M - M_{тр} - M_{ин}$ . Представим этот момент в виде пары сил ( $F_k, F_k$ ), с плечом  $D/2$ . Одна из них, сила  $F_k$ , направленная против движения колеса, приложена к опорной точке  $A$  и направлена против движения колеса. Как реакция на эту силу, в опорной точке колеса возникает под действием нажатия колеса на рельс внешняя по отношению к колесу сила ( $F_{сц}$ ), направленная по движению колеса. Эта сила препятствует перемещению точки ( $A$ ) вдоль рельса; точка ( $A$ ) является мгновенным центром вращения колеса.

Другая сила ( $F_k$ ) приложенная в точке  $O$  и направленная по движению колеса, передается через буксы на раму тележки и на кузов, вызывая перемещение Э.П.С. В направлении движения.

- ◆ Пока сила ( $F_k$ ), приложенная к точке ( $A$ ) и зависящая от вращающего момента тягового двигателя, устанавливаемого машинистом, не превышает предельного для данных условий значения ( $F_{cu}$ ), опорная точка ( $A$ ) является мгновенным центром вращения колеса. Распределение поступательных скоростей точек колеса при его повороте вокруг мгновенного центра и траектория точки ( $A$ ), являющейся в данный момент опорной, представлены на рисунке. В последующие моменты в соприкосновение с рельсом приходят все новые точки окружности колеса, оказывающиеся мгновенными центрами его вращения.



- ◆ Таким образом, вследствие действия внешней силы ( $F_{cu}$ ), в опорной точке колеса на рельс, мгновенный центр его вращения непрерывно перемещается вдоль рельса, а геометрический центр колеса получает при этом поступательную скорость ( $V$ ), являющуюся скоростью движения поезда.

- ◆ Следовательно, внешняя по отношению к колесу сила ( $F_{си}$ ) является той силой, благодаря которой вращающий момент тягового двигателя реализуется в виде силы тяги ( $F_k$ ), сообщающей поступательное движение колесу, а с ним и всему поезду.
- ◆ Сила тяги ( $F_k$ ) передается полностью через подшипники и буксы на раму и кузов Э.П.С. Только в том случае, если геометрическая ось колеса и ось якоря расположены на одном уровне. В конструкциях Э.П.С. Эти оси расположены на разных уровнях (предыдущий рис.), поэтому часть силы тяги передается на раму и кузов через подшипники и буксы, а часть – через крепления тяговых двигателей. Однако во всех случаях сумма этих составляющих равна силе тяги и действует по направлению движения.
- ◆ При установившемся режиме движения Э.П.С. Силу тяги колесной пары ( $F_k$ ) можно выразить через вращающий момент  $M$  на валу тягового двигателя. Где:  $m$  – передаточное число тяговой передачи,  $\eta_{пер}$  – КПД тяговой передачи с учетом трения в подшипниках;  $D$  – диаметр колеса по кругу катания, м.

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

# Принципы оценки сил

## взаимодействия колеса и рельса в месте контакта.

- ◆ До сих пор мы предполагали, что колесо и рельс являются абсолютно жесткими, т.е. никаких механических напряжений при их взаимодействии не возникает. В действительности же материалы рельса и бандажа, являясь упругими, испытывают под действием нажатия колеса на рельс в месте его опоры **контактные (местные)** напряжения. При движении колеса в контакт вступают все новые и новые участки поверхности бандажа и рельса, а вышедшие из зоны контакта – восстанавливают свои первоначальные форму и объем. **Следовательно, при движении колеса контактные напряжения изменяются во времени.**
- ◆ Происходящие при этом явления чрезвычайно сложны. В основном они определяются силой нажатия колеса на рельс, скоростью движения, упругостью материалов бандажа и рельса, а так же фактической площадью их взаимодействия.

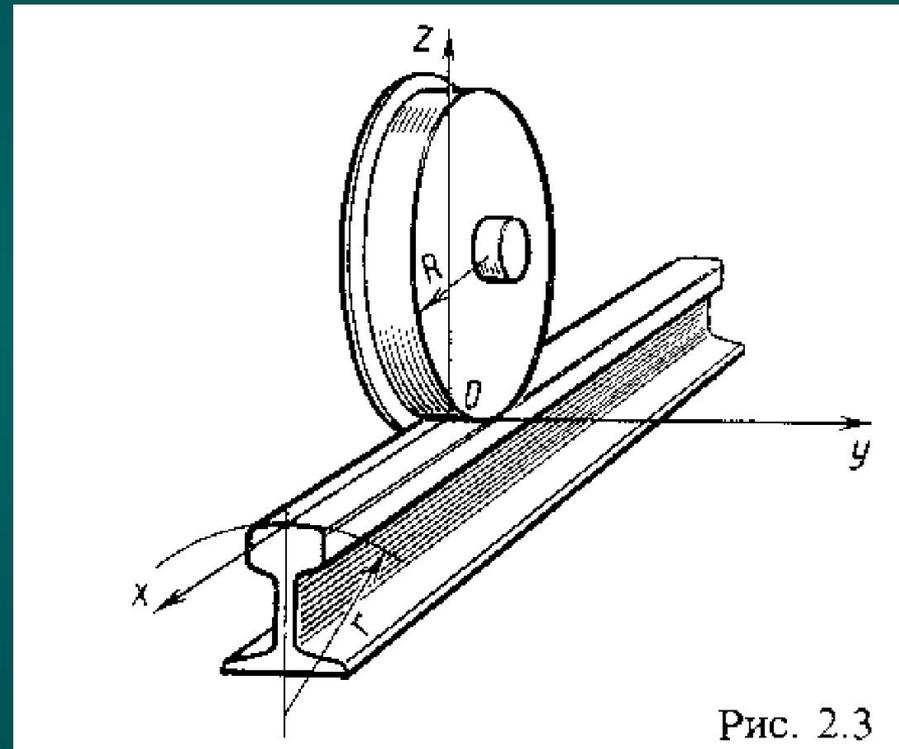
- ◆ *Вследствие деформаций, возникающих при взаимодействиях колеса и рельса, колесо в действительности опирается на рельс не в одной точке, как мы считали до сих пор, а по некоторой поверхности. Форма и размеры этой поверхности, а так же закон распределения давлений определены теоретически только для простейших сочетаний профиля бандажа и рельса. Основу решения этих задач составляют работы выдающегося физика **Г. Герца (1882 г.)** о распределении давлений и напряжений по поверхности взаимодействия двух гладких упругих тел (**сферы и цилиндры**) при их статическом сжатии.*
- ◆ *Однако методы определения напряжений и деформаций в области силового контакта твердых, а тем более – движущихся шероховатых тел все еще недостаточно разработаны. Трудности, возникающие при анализе напряженного состояния бандажа и рельса заключаются в основном в установлении закона распределения касательных напряжений по опорной поверхности конического бандажа на рельсе, имеющем **поперечный уклон (подуклонку)** на горизонтальном пути. Наиболее обстоятельное решение этой задачи принадлежит **Н.М. Беляеву**, предложившему в **20-х годах XX столетия** для аналитического решения специальные функции.*

- ◆ Примерно в то же время **Ф. Картер** основываясь на положении теории упругости, рассмотрел двухмерную задачу для бесконечной упругой среды: продольную (касательную) составляющие силы упругого взаимодействия – **силу сцепления** – Картер считал пропорциональной относительному смещению (относительному скольжению) материалов бандажа и рельса. Эта теория имеет сейчас наибольшее распространение.
- ◆ Известна и другая принципиальная точка зрения на напряженное состояние материалов бандажа и рельса в зоне контакта (**Ф. Фредерикс и др.**), отрицающая наличие зон сцепления и упругого смещения на опорной площадке. При этом предполагают, что упругое смещение существует на всей опорной площадке. Под действием вращающего момента тягового двигателя происходит только перемещение эллипсоида напряжений со скоростью движения колеса.
- ◆ Следует отметить, что при наиболее неблагоприятном режиме – **срыве сцепления** – результаты обеих теорий, как предельные случаи – совпадают – **контактная площадка превращается в точку.**
- ◆ Ограничимся рассмотрением идеализированного случая упругого контактного взаимодействия бандажа и рельса, полагая их материалы изотропными (**физические свойства во всех направлениях одинаковы**), исходные очертания – соответствующими расчетным геометрическим размерам; влияние конструкции ЭПС и пути не учитываем.

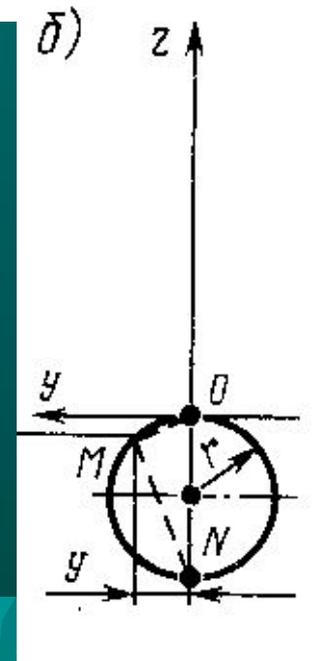
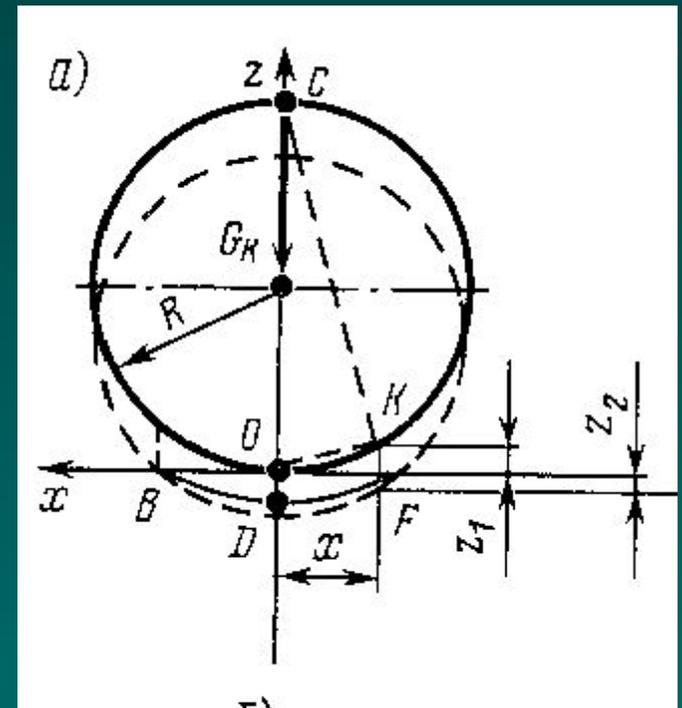
# *Рассмотрим сначала идеализированное упругое силовое статическое взаимодействие колеса и рельса при неподвижном колесе.*

*Предположим, что сила ( $G_k$ ) нажатия колеса на рельс неизменна.*

*Так как центральная часть головки стандартного рельса железных дорог имеет в поперечнике радиус **300 мм**, рассмотрим колесо и рельс как два бесконечных цилиндра с перпендикулярными осями, подверженных сжатию силой, действующей от колеса на рельс.*



- ◆ Проекция на площадь колеса (плоскость  $XOZ$ ), представлена на рисунке (а), на плоскость поперечного сечения рельса (плоскость  $YOZ$ ), представлена на рисунке (б). Упругая деформация колеса, соответствующая координате  $X$ , обозначена через  $Z1$ ; деформация рельса, соответствующая координате  $Y$ , обозначена через  $Z2$ .
- ◆ Суммарное значение упругого сжатия обоих цилиндров предполагаем постоянным в любой точке поверхности соприкосновения.



$$z_1 + z_2 = \Delta = \text{const на дуге } BDF .$$

◆ Текущие координаты  $X$  и  $Y$  опорной поверхности цилиндрического колеса на рельсе связаны уравнением эллипса. Поверхность распределения давлений  $P_{xy}$  по опорной площадке имеет форму эллипсоида.

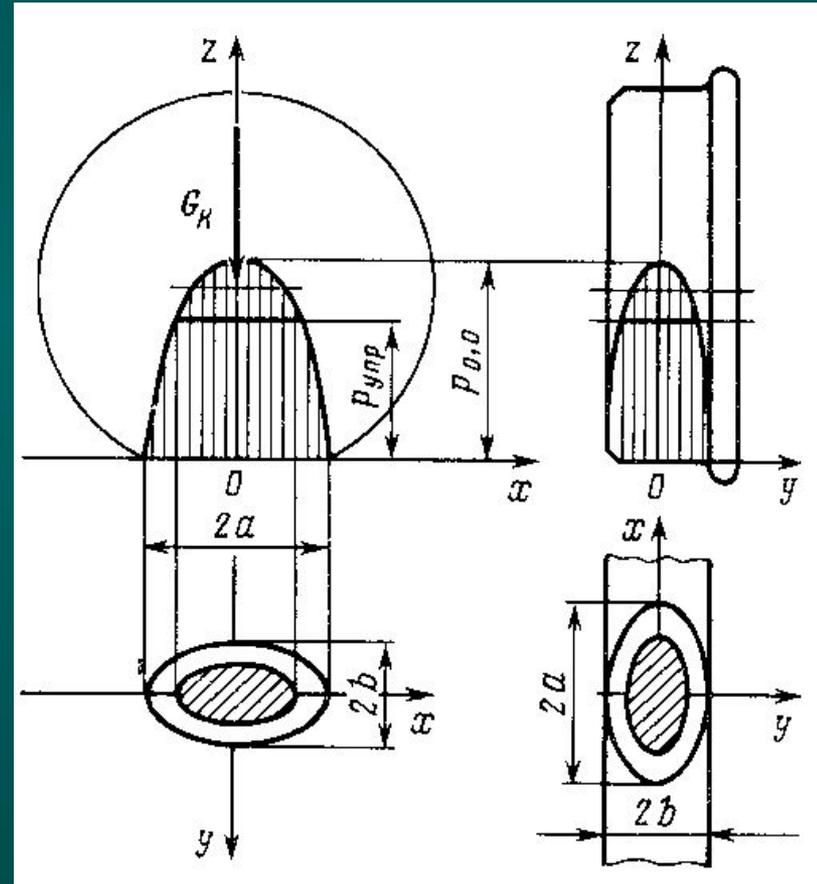
$$p_{x,y} = p_{0,0} \sqrt{1 - x^2/a^2 - y^2/b^2},$$

Где:  $P_{00}$  – давление в центре эллипса;  $a$  – большая полуось эллипса;  $b$  – малая полуось эллипса.

В центре эллипса, где  $x=y=0$  – давление максимально и равно:  
где  $G_k$  – сила нажатия колеса на рельс.

$$p_{0,0} = \frac{3}{2} G_k / (\pi ab).$$

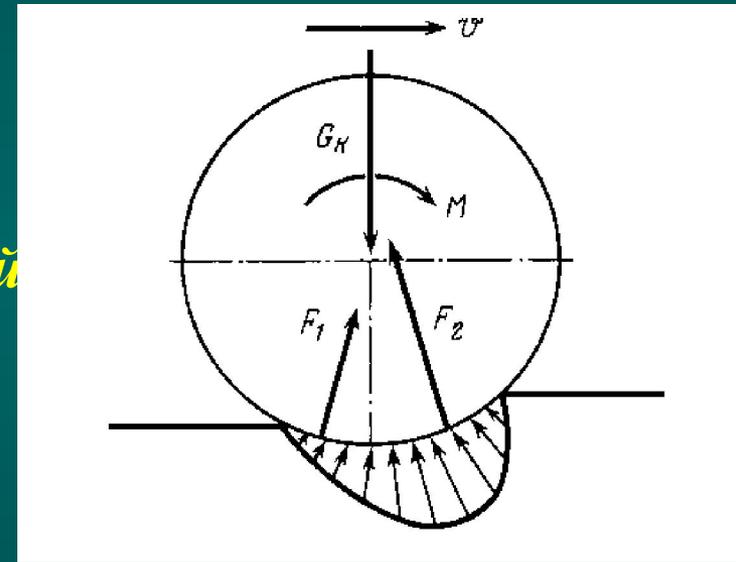
◆ Это значит, что давление в центре опорной площадки в полтора раза выше среднего значения. Иными словами, в центре и около него происходят упруго – пластические деформации материалов колеса и рельса (косая штриховка), на внешней части опорной поверхности деформации упругие. По контуру опорной поверхности давление равно нулю.



- ◆ *Распределение давлений по опорной поверхности бандажа схематически показано на рисунке вертикальной штриховкой. Распределение давлений в рельсе представляет зеркальное отображение показанного на рисунке.*
- ◆ *Коническое очертание профиля бандажа и поперечный уклон рельса сильно осложняют решение задачи. Приблизительно считают, что опорная поверхность конического бандажа на рельсе так же имеет форму эллипса, площадь которого колеблется в пределах от 400 до 600 мм<sup>2</sup>, в зависимости от диаметра колеса, силы нажатия колеса на рельс и свойств материала колеса и рельса. Меньшие значения площади соответствуют малым диаметрам колес и малым силам.*
- ◆ *Ориентация эллипса и его размеры зависят от степени проката бандажа: при отсутствии проката большая полуось эллипса направлена вдоль рельса, малая – поперек. По мере нарастания проката и связанного с ним искажения очертания профиля бандажа – угол между продольными осями рельса и эллипса увеличивается. Как следствие – меняются очертания опорной поверхности. При изношенном бандаже и рельсе опорная поверхность принимает уже форму, близкую к прямоугольнику, продольная ось которого расположена поперек рельса.*

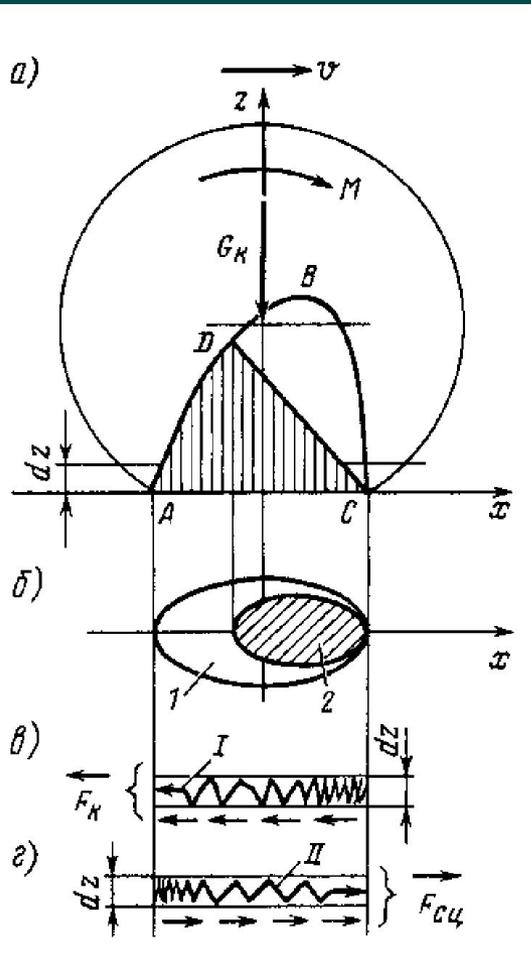
# Перераспределение сил в месте контакта под действием вращающего момента тяговых двигателей

- В режиме тяги, под действием вращающего момента колесо испытывает упругий подпор со стороны рельса, как это схематично представлено на рисунке равнодействующими силами  $F_1$  и  $F_2$ . Вследствие этого нарушается представленная выше на рисунке симметрия распределения напряжений по опорной поверхности при неподвижном колесе. Набегающие на опорную поверхность воображаемые волокна материала бандажа испытывают сжатие, волокна рельса – растяжение. Таким образом происходит упругое смещение волокон материала бандажа относительно рельса и, следовательно, образуется касательная сила трения между ними.



- Эпюра нормальных напряжений  $p$  бандажа представлена кривой  $ABC$ , касательных напряжений – кривой  $ADC$  на **рис.(а)**. На опорной площадке **рис.(б)** различают зону **1** – упругого смещения материалов бандажа и рельса и зону **2** – их взаимного прилипания, или сцепления. В зоне **1** касательная сила  $f$ , создаваемая вращающим моментом тягового двигателя, превышает силу трения  $Mp$  волокон, где  $M$  – коэффициент трения и происходит взаимное смещение  $U$  волокон бандажа и рельса. В зоне **2** касательная сила  $f$  меньше силы трения  $Mp$ , а следовательно, не в состоянии сместить волокна бандажа и рельса друг относительно друга: их удерживает избыток силы трения. Упругого смещения во всех точках бандажа и рельса в зоне **2** не происходит. Этому на эпюре касательных напряжений (см.**рис.а**) соответствует незаштрихованная площадь  $DVC$ . Общее упругое смещение волокон бандажа на опорной поверхности равно  $U$ .

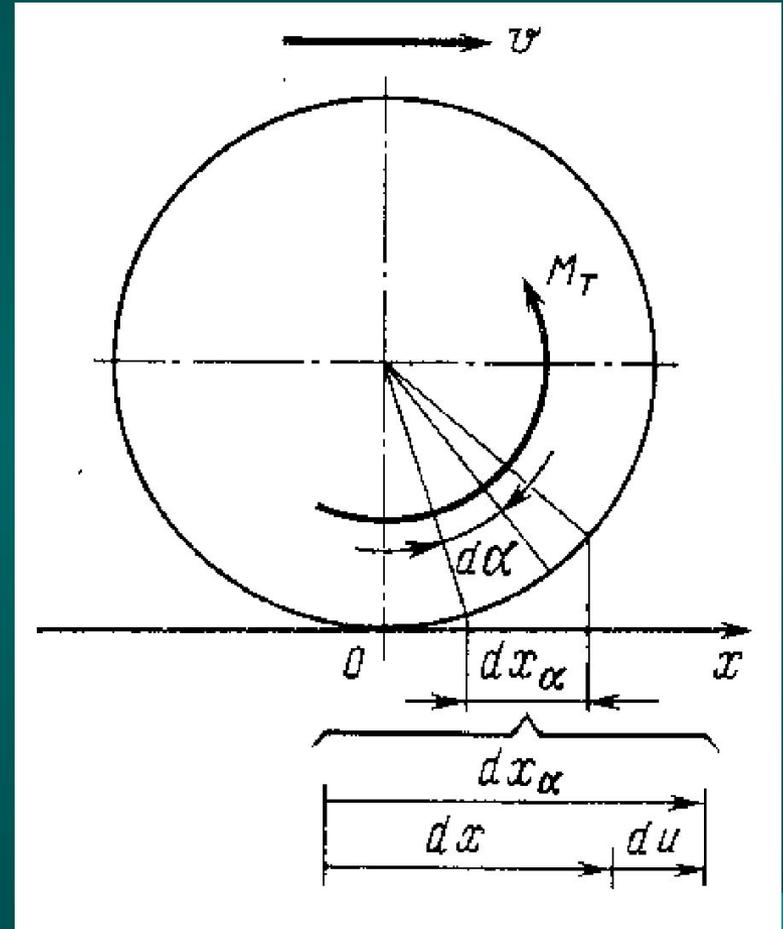
По мере дальнейшего движения колеса, сжатые в набегающей части опорной поверхности волокна бандажа, выходя из зоны зацепления, стремятся возвратиться в недеформированное состояние. Разжимаясь, они стремятся в сторону, противоположную поступательному движению колеса. Условно это смещение волокон бандажа показано стрелкой **I** на **рис.(в)** Равнодействующая всех элементарных касательных сил равна силе  $F_k$ .



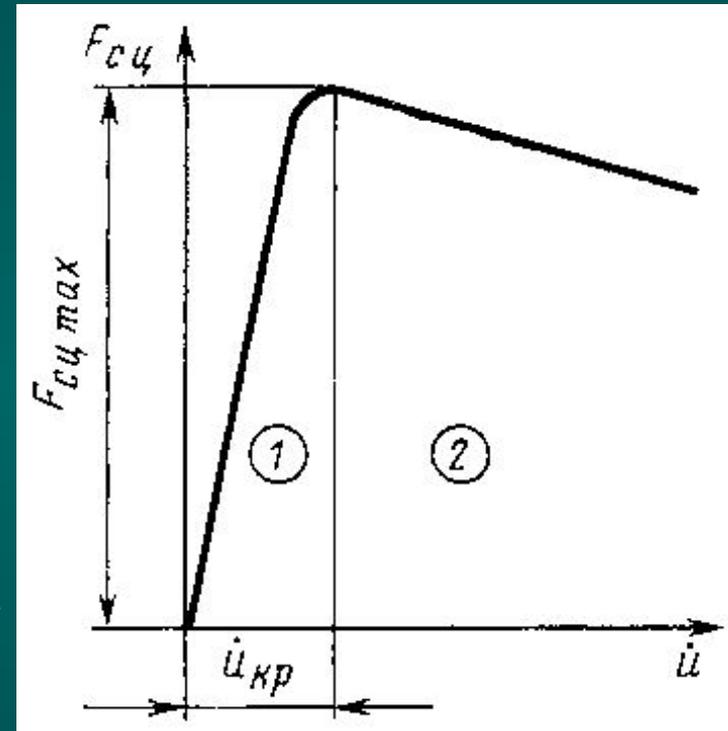
- Реакцией рельса на перемещения волокон бандажа, являются перемещения волокон рельса в обратном направлении, как это показано стрелкой **II** на **рис.(г)** Возникающая при этом равнодействующая сил трения, направленная от рельса к колесу будет внешней для колеса силой – силой сцепления  $F_{сц}$ .

# В режиме торможения.

- ◆ **Вращающий момент  $M_T$** , действующий на колесную пару имеет направление, обратное по отношению к режиму тяги, а распределение сил и деформаций материалов бандажа и рельса на опорной площадке в первом приближении является зеркальным отображением существующего в режиме тяги.
- ◆ **Набегающие волокна бандажа** испытывают растяжение, вследствие чего фактический путь колеса при торможении  
$$dx_{\alpha} = R d\alpha + du.$$
- ◆ Поэтому относительная скорость упругого смещения материала бандажа при торможении положительна и направлена в сторону движения колеса.



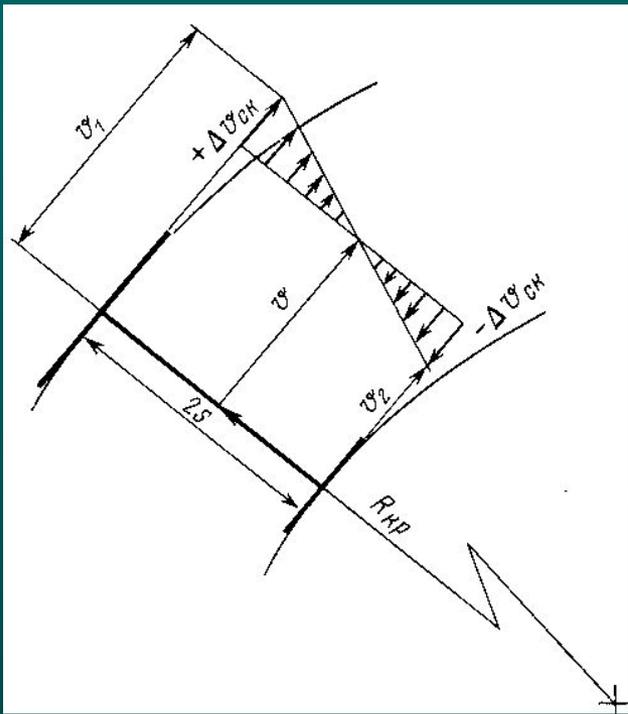
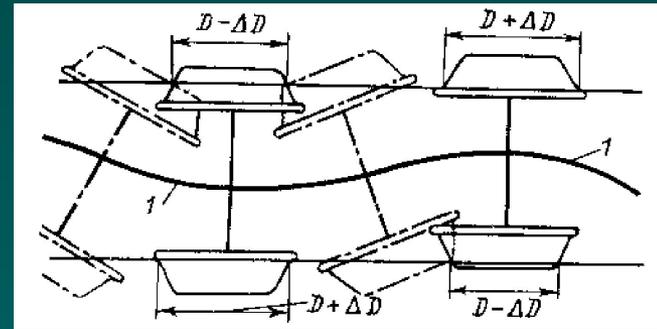
- ◆ По мере увеличения момента тягового двигателя, т.е. приближения силы тяги к максимально возможной по условиям сцепления, пропорциональность нарушается и увеличение упругого смещения уже не приводит к заметному росту силы тяги. При этом зона сцепления на опорной площадке уменьшается: силы сцепления уже не хватает для сдерживания взаимного смещения волокон материалов бандажа и рельса, зона упругого скольжения растет, зона сцепления уменьшается.
- ◆ Как только сила тяги  $F_k$ , определяемая моментом тягового двигателя окажется больше силы сцепления  $F_{сц\ max}$ , зона сцепления на опорной площадке станет равной нулю и на упругое смещение наложится действительное скольжение колеса на рельсе – наступит срыв сцепления, поэтому – для обеспечения нормальных условий режима тяги сила  $F_k$  не должна превышать максимального значения  $F_{сц}$ , действующей в опорной площадке колеса на рельсе.



# Кинематическое

## проскальзывание колес.

На рассмотренное выше упругое смещение материала колес накладывается их кинематическое проскальзывание, вызываемое изменяющимся по времени положением колесной пары в рельсовой колее вследствие двух основных причин: виляния колесной пары при движении на прямом участке пути и прохода кривой постоянного радиуса.



Известно, что для устранения местного проката и облегчения прохода кривых бандажи локомотивов обычно обтачиваются на конус  $1/20$  в средней части поверхности. Такое очертание бандажей приводит к вилянию (извилистому движению) колесной пары на прямых участках пути. Диаметры кругов катания колес периодически меняются от максимального  $D_{max} (D + \Delta D)$  до минимального  $D_{min} = (D - \Delta D)$ , что приводит к взаимному проскальзыванию колес.

Кроме того, кинематическое проскальзывание колес возникает и при проходе кривых. Оно обусловлено тем, что даже при одинаковых диаметрах колес, путь, проходимый внешним колесом всегда будет больше пути, проходимого внутренним колесом.

# Причины неустойчивости тягово-цепных свойств Э.

## П.С.

- ◆ *Эксплуатация и испытания ЭПС убеждают в том, что фактические значения силы тяги каждого ЭПС и их характеристики имеют разбросы относительно расчетных значений. Чем тяжелее условия движения и больше нагрузки ЭПС, тем влияние этих разбросов или неустойчивость свойств ЭПС становятся все более ощутимыми. Поэтому не каждый электровоз может нормально реализовывать расчетную силу тяги и весовую норму поезда.*

*Неустойчивость тягово-цепных свойств ЭПС вызывается двумя группами причин – к первой относятся т.н. внешние причины, ко второй – внутренние.*

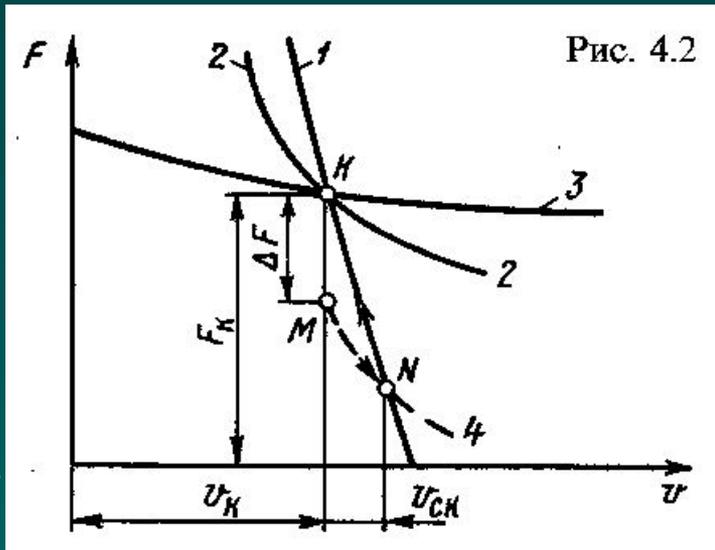
- ◆ *К внутренним причинам относятся: качество изготовления и ремонта; техническое содержание каждого электровоза или электропоезда; особенности конструкции механической части ЭПС данного типа; схема электрических цепей и устройство электрооборудования. Например, от качества изготовления и ремонта зависит разница характеристик колесно-моторных блоков ЭПС, конструкция механической части ЭПС определяет изменения сил нажатия колеса на рельсы и, следовательно, сил сцепления. Система тока и электрическое оборудование определяют случайные изменения вращающего момента тяговых двигателей, распределение их между колесными парами. Схема соединения тяговых двигателей, система их возбуждения так же влияют на реализацию сил тяги и использование силы сцепления.*
- ◆ *Внешними причинами являются метеорологические условия в каждой поездке, состояние пути на участке обращения ЭПС, квалификация локомотивной бригады и ее действия по управлению движением ЭПС (поезда).*

*Более подробно следует рассмотреть действие внутренних причин и мероприятия, компенсирующие их в известной мере.*

# Влияние внутренних причин на нестабильность тягово-цепных свойств ЭПС.

- ◆ 1. Разность диаметров колес колесных пар ЭПС и частот вращения тяговых двигателей. Обычно считают, что величина силы тяги  $F_{\Sigma}$  локомотива, имеющего  $N$  колесных пар с индивидуальным приводом, равна силе тяги  $F$  одной колесной пары, умноженной на число колесных пар, т.е.  $F_{\Sigma} = FN$ . Однако – это идеальный случай, при котором характеристики всех колесно–моторных блоков совершенно идентичны. В действительности, характеристики колесно-моторных блоков более или менее отличаются одна от другой, так и от номинальной по двум причинам:
  - ◆ Возникающая в процессе изготовления и сборки тяговых двигателей разница их электромеханических характеристик, т.е. зависимости  $M(n)$ - вращающего момента от частоты вращения вала якоря. Техническими условиями предусмотрена допустимая разница частот вращения якорей, равная  $\pm 3\%$ , однако в условиях эксплуатации возможны любые сочетания разности частот вращения якоря, вплоть до предельных  $6\%$ . Таким образом, разница в частоте вращения тяговых двигателей означает, что такие колесные пары работают на разных характеристиках, что приводит к недоиспользованию тяговых свойств ЭПС.
  - ◆ Разность диаметров колес колесных пар, возникающая например, при выкатке и замене отдельных колесных пар, установленная нормами разница диаметров колес колесных пар для одной тележки не должна превышать  $10$  мм. При одном и том же вращающем моменте тягового двигателя увеличение диаметра колес приводит к уменьшению силы тяги колесной пары. Колесные пары ЭПС с разными диаметрами будут иметь неодинаковую силу тяги.
- ◆ 2. Влияние соединения тяговых двигателей. На последовательном соединении тяговых двигателей, характеристики которых совпадают, токи всех двигателей одинаковы. Каждый из них развивает ЭДС, сумма которых уравнивает напряжение контактной сети. Расхождение же характеристик двигателя в эксплуатации приводит к тому, что у наиболее быстроходного из них, развивающего большую ЭДС, чем включенные и ним последовательно, будет уменьшаться ток, по мере развития процесса на него будет приходиться все большая доля напряжения, в результате уменьшится ток остальных двигателей и сила тяги ЭПС в результате окажется недоиспользованной. Еще более неблагоприятно последовательное соединение тяговых двигателей в случае начала боксования одного из них: ток остальных двигателей уменьшится, сила тяги снизится, нормальный режим работы ЭПС становится невозможным.
- ◆ На параллельном соединении тяговых двигателей, напряжение, приходящееся на каждый из них, уравнивается его ЭДС практически независимо от других двигателей. Поэтому разница характеристик двигателей, определяемая частотой их вращения, нарушает равномерное распределение токов между ними, из-за чего возникает неравенство силы тяги колесных пар, и сила тяги колесных пар и сила тяги ЭПС оказывается недоиспользованной.

Рис. 4.2



3. Влияние жесткости характеристик тяговых двигателей. На рис.4.2 кривые 1 и 2 представляют соответственно жесткую и мягкую характеристики двигателей, 3 – зависимость силы сцепления колесной пары от скорости движения, 4 – изменение силы сцепления при боксовании. Нормальная реализация сила тяги осуществляется при режиме, соответствующем точке K. Если, например, из-за масляного пятна на рельсе сила сцепления снизится на  $\Delta F$ , то начнется боксование колесной пары (точка M), т.к. сила тяги окажется больше предельной силы сцепления. Скорость боксующей колесной пары будет равна сумме скорости  $v_k$  поступательного движения и скорости  $v_{сн}$  – скольжения колеса по рельсу.

Сила сцепления снижается по кривой 4, определяемой зависимостью  $F_{сц}(v)$  в области скорости скольжения, большей критической. При боксовании колесной пары, имеющей двигатель с жесткой характеристикой, сила сцепления при скорости, отвечающей точке N, окажется равной силе тяги, наступит новое положение равновесия, скольжение колесной пары прекратится. Если сила сцепления восстановится до исходного значения, то сила тяги окажется меньше силы сцепления. Скольжение колесной пары уменьшится и при скорости, соответствующей скорости K восстановится исходный режим реализации сил тяги.

В отличие от этого, возникшее боксование колесной пары, имеющей мягкую характеристику, будет развиваться и стремиться перейти в разносное. Как видно из рис.4.2 по мере увеличения скорости скольжения колесной пары разность между силой тяги (кривая 2) и силой сцепления (кривая 4) будет все возрастать. Для прекращения боксования необходимо повысить силу сцепления, например, путем применения песка, или уменьшения силы тяги. Поэтому при мягкой характеристике тягового двигателя восстановить сцепление более трудно. Так как сцепление колесной пары, имеющей двигатель с жесткой характеристикой восстанавливается при малых скоростях скольжения, сила тяги уменьшится незначительно, что обеспечивает более высокое использование силы сцепления, чем при двигателе, имеющем мягкую характеристику.

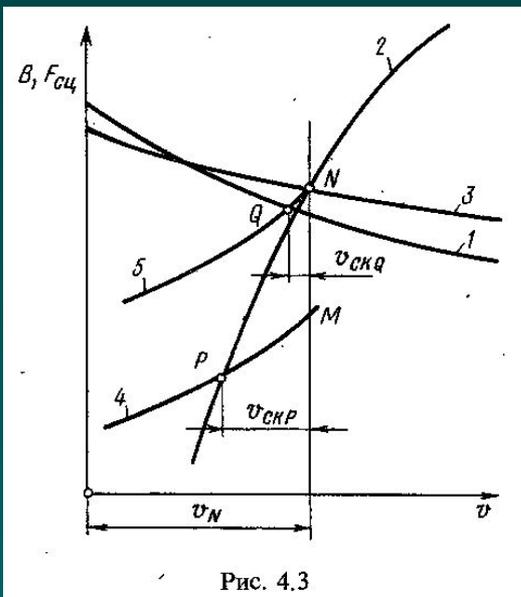


Рис. 4.3

- ◆ Рассмотрим теперь влияние жесткость тормозных характеристик на использование силы сцепления. На рис.4.3 представлены тормозные характеристики, имеющие положительную (2) и отрицательную (1) жесткость и ограничение силы сцепления (3). Тормозная характеристика, имеющая отрицательную жесткость, соответствует механическому торможению, имеющая положительную жесткость – электрическому.
- ◆ Допустим, что скорость движения  $V_{п}$  колесной пары соответствует началу юза, возникшего в результате случайного снижения силы сцепления на величину, которой соответствует отрезок  $NM$ . Скорость скольжения отложим влево от  $NM$ , поскольку при юзе скорость колесной пары уменьшается. Кривая 4 – изменение силы сцепления колесной пары в процессе юза. При отрицательной жесткости тормозной характеристики по мере увеличения скольжения, тормозная сила растет (кривая 1), сила сцепления уменьшается (кривая 4)

и следовательно, начавшийся юз уже не прекратится.

- ◆ Значительно легче восстанавливается сцепление при тормозной характеристике с положительной жесткостью. В этом случае точка  $P$  пересечения тормозной характеристики и зависимости от силы сцепления колесной пары при юзе соответствуют проскальзыванию относительно  $v_{скр}$ . При восстановлении сцепления до прежнего значения, сила сцепления в процессе юза (кривая 5) окажется больше тормозной силы (кривая 2), скорость скольжения колесной пары уменьшится и юз автоматически прекратится.
- ◆ На характер процесса юза при электрическом торможении оказывает влияние и соединение тяговых двигателей. Наиболее трудными условия восстановления сцепления оказываются при последовательном соединении тяговых двигателей, т.к. ток и тормозная сила, создаваемая двигателем заклиненной оси, поддерживаются за счет ЭДС других двигателей, включенных с ним последовательно.
- ◆ При параллельном соединении тяговых двигателей такого явления не может быть.
- ◆ 4. Влияние типа привода. При индивидуальном приводе каждое колесо или колесная пара может боксовать независимо друг от друга. При групповом приводе возможно боксование только всех связанных друг с другом колесных пар.

3.

**Силы,  
действующие  
на поезд.**

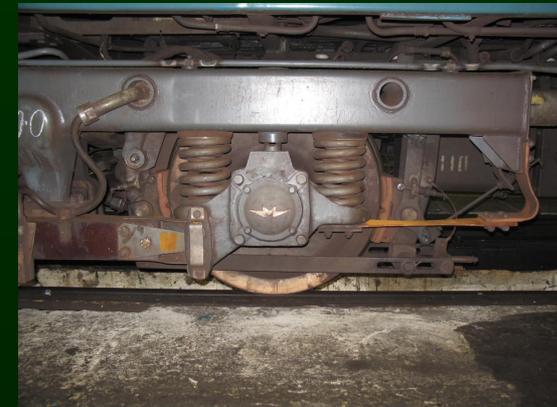




*Пассажирский поезд на железнодорожном мосту через р. Шуя. 1915г.*

# Сцепление колес с рельсами

- ◆ Движение вагона совершается под действием вращающего момента, развиваемого тяговыми двигателями. Этот момент передается через зубчатую передачу на колесные пары и реализуется в виде силы, приложенной к бандажу.
- ◆ Для движения вагона необходимо, чтобы его колеса кроме вращательного движения, одновременно и имели перемещение вдоль пути. Для этого требуется, чтобы колеса в местах касания их с рельсами имели какие-либо опорные точки, около которых они могли бы вращаться и, как бы отталкиваться.
- ◆ Такими опорными точками являются мельчайшие шероховатости на поверхности рельсов и бандажей колесных пар. Впадинки и выступы, имеющиеся на них, при сцеплении одни с другими, образуют как бы зубчатое зацепление. Если бы поверхности касания бандажей с рельсами были идеально гладкими и сцепление между ними отсутствовало, то колесные пары вагона, не имея опорных точек, потеряли бы возможность поступательного перемещения и могли бы только вращаться. В этом случае вращающий момент двигателей не смог бы быть реализован для движения вагона.



# Силы, действующие на поезд.

- ◆ На движущийся поезд действуют следующие силы: сила тяги ( $F$ ), сила сопротивления движению ( $W$ ), тормозная сила ( $B$ ).
- ◆ Эти силы действуют в следующих сочетаниях: разгон –  $F$  и  $W$ , выбег –  $W$ , торможение –  $B$ .
- ◆ В основе действия этих сил лежат силы трения и сцепления.



$B$

$F$

$W$

# Сила трения

*Сила трения — это сила, возникающая в месте соприкосновения тел и препятствующая их относительному движению. Причины возникновения силы трения:*

- ◆ *1) Шероховатость соприкасающихся поверхностей.*
- ◆ *2) Взаимное притяжение молекул этих поверхностей.*

*Сила трения прямо пропорциональна весу тела ( $P$ ) и силе нормальной реакции ( $N$ ) и зависит от того, насколько сильно тела прижаты друг к другу.*

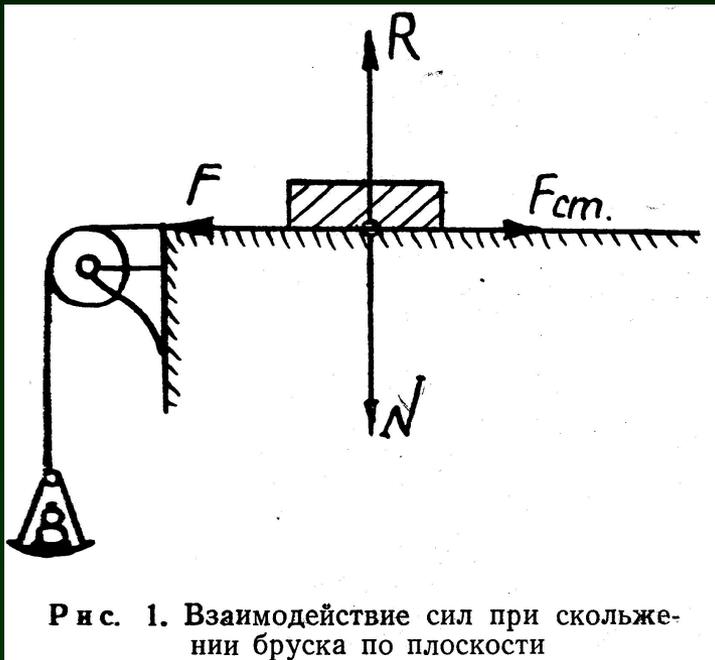
- ◆ **Трение качения** — сопротивление движению, возникающее при перекатывании тел друг по другу т.е. сопротивление качению одного тела (катка) по поверхности другого.
- ◆ **Причина трения качения** — деформация катка и опорной поверхности.
- ◆ **Проявляется**, например, между элементами подшипников качения, между шиной колеса автомобиля и дорожным полотном.
- ◆ **В большинстве случаев величина трения качения гораздо меньше**

# При наличии относительного движения двух контактирующих тел силы трения, возникающие при их взаимодействии, можно подразделить на:

- ◆ **Трение скольжения** — сила, возникающая при поступательном перемещении одного из контактирующих/взаимодействующих тел относительно другого и действующая на это тело в направлении, противоположном направлению скольжения.
- ◆ **Трение качения** — момент сил, возникающий при качении одного из двух контактирующих/взаимодействующих тел относительно другого.
- ◆ **Трение покоя** — сила, возникающая между двумя контактирующими телами и препятствующая возникновению относительного движения. Эту силу необходимо преодолеть для того, чтобы привести два контактирующих тела в движение друг относительно друга. Возникает при микроперемещениях (например, при деформации) контактирующих тел. Она действует в направлении, противоположном направлению возможного относительного движения.

## В физике взаимодействия трение принято разделять на:

- ◆ **Сухое**, когда взаимодействующие твёрдые тела не разделены никакими дополнительными слоями/смазками (в том числе и твердыми смазочными материалами) — очень редко встречающийся на практике случай. Характерная отличительная черта сухого трения — наличие значительной силы трения покоя;
- ◆ **Граничное**, когда в области контакта могут содержаться слои и участки различной природы (окисные плёнки, жидкость и так далее) — наиболее распространённый случай при трении скольжения.
- ◆ **Смешанное**, когда область контакта содержит участки сухого и жидкостного трения;
- ◆ **Жидкостное (вязкое)**, при взаимодействии тел, разделённых слоем твёрдого тела (порошком графита), жидкости или газа (смазки) различной толщины — как правило, встречается при трении качения, когда твёрдые тела погружены в жидкость, величина вязкого трения характеризуется вязкостью среды;
- ◆ **Эластогидродинамическое (вязкоупругое)**, когда решающее значение имеет внутреннее трение в смазывающем материале. Возникает при увеличении относительных скоростей перемещения



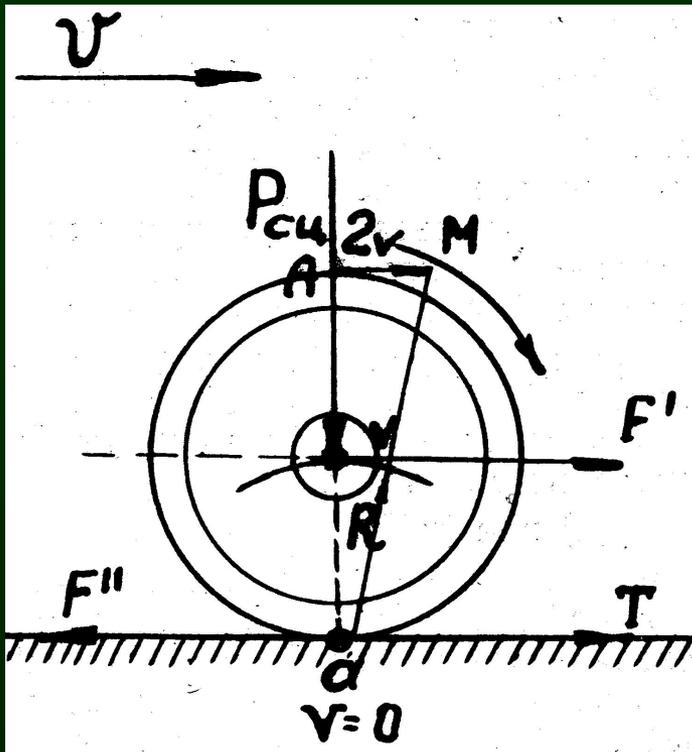
**Сила трения возникает на поверхности двух соприкасающихся тел и препятствует их относительному перемещению. Трение бывает статическим и кинематическим.**

**Кинематическое трение подразделяется на трение скольжения и трение качения.**

**F** - сила, стремящаяся сдвинуть брус  
**F<sub>ст</sub>** - сила статического трения, препятствующая движению бруса  
**N** - сила давления бруса на поверхность  
**R** - реакция давления плоскости на брусок (численно равна силе **N**)

- ◆ Сначала рассмотрим статическое трение (трение покоя). Если на плоской поверхности лежит неподвижное тело (в нашем случае - брус) и к нему приложена горизонтальная сила **F**, стремящаяся сдвинуть брус с места, то как бы мала она ни была, брус под её действием сдвинется с места, если сила **F** не будет уравновешена никакой другой силой. Такой силой является сила **F<sub>ст</sub>** - сила статического трения, препятствующая движению бруса. Если увеличить силу **F**, добавляя гири на чашку, то одновременно будет возрастать и **F<sub>ст</sub>**.
- ◆ Однако, в определённый момент **F<sub>ст</sub>** не сможет больше уравновешивать силу **F** и брус начнёт двигаться, так как сила давления бруса на поверхность **N** окажется недостаточной для удержания бруса. То есть, существует прямая зависимость между силами **F<sub>ст</sub>** и **N**, которую можно выразить формулой: **F<sub>ст</sub> = f<sub>0</sub> N**, где **f<sub>0</sub>** - это коэффициент трения в состоянии покоя (далее - коэффициент сцепления), зависящий от материала бруса и поверхности, с которой брус соприкасается. Коэффициенты сцепления различных материалов приводятся в специальных таблицах, которые используют для тяговых расчётов.
- ◆ В случае, когда брус движется, между **F<sub>ст</sub>** и **N** есть также прямая зависимость, но теперь трение покоя превратится в трение скольжения, которое всегда чуть меньше трения покоя: **F<sub>ст</sub> = f N**, где **f** - коэффициент трения скольжения.

Тяговые двигатели вагона создают вращающие моменты, которые передаются на оси колёсных пар, но если колёсная пара будет подвешена в воздухе, то никакого поступательного движения не будет. Как только колёсная пара коснётся поверхности рельса, то возникнет внешняя сила, направленная в сторону, противоположную движению, и стремящаяся оттолкнуть рельсы назад. Это и есть сила сцепления  $T$ . Рассмотрим следующий рисунок:



- ◆ Когда силы  $F'$  и  $T$  уравновешивают друг друга, то их равнодействующая будет равна нулю (точка  $a$ ), но сила  $F'$  окажется неуравновешенной, - это и будет сцепная сила тяги, численно равная значению силы  $T$ . Именно эта сила будет двигать вагон (поезд). Сила  $T$  будет зависеть от сцепного веса поезда ( $P_{сц}$  в килограммах) и от коэффициента сцепления колеса с рельсом ( $\psi$ ):  $T = P_{сц} \times \psi$ . При этом поступательное движение будет возможно, если сила тяги будет равна или меньше силы сцепления.

$F'$  - сила, приложенная через буксу к раме тележки (направлена по движению)

$F''$  - сила, приложенная к рельсу (направлена против движения)

$T$  - сила сцепления - ответная продольная реакция рельса

# Расчетный и реализуемый коэффициент сцепления

- ◆ В реальных условиях колеса и рельсы в месте соприкосновения деформируются. Эта деформация называется упругой, т.к. после окончания действия сил форма колеса и рельса восстанавливается.
- ◆ Площадь касания имеет форму эллипса, причём при качении колеса он постоянно деформируется, то сжимаясь в набегающей части, то увеличиваясь в сбегающей части, т.е., площадь соприкосновения колеса с рельсом не является постоянной, следовательно и коэффициент сцепления будет тоже изменяться.
- ◆ В лабораторных условиях установлено, что при качении колеса из-за вышеуказанных деформаций происходит незаметное для глаза проскальзывание колеса. При этом путь, проделанный колёсной парой при включённых и отключённых двигателях отличаются примерно на 2%. Однако, на коэффициент сцепления  $\Psi$  показывают влияние множество других факторов.
- ◆ Так, например, при движении колёсная пара постоянно «виляет», перемещаясь в поперечном направлении от рельса к рельсу. Величина этого разбега колеблется от 13 мм. при движении по прямому участку до 60 мм. в кривой (при изношенных гребнях), таким образом, коэффициент сцепления при движении в кривой снижается почти на 15%.
- ◆ Также на коэффициент сцепления влияет состояние поверхности и твёрдость стали колеса и рельса. Он больше при гладких поверхностях колеса и рельса, а также при увеличении твёрдости их стали.

*Наконец, на коэффициент сцепления влияют стрелки, крестовины, стыки, и превышение одной нити над другой (допускается до 4 мм. на прямой и до 120 мм. в кривой). Зависимость коэффициента сцепления от скорости представлена на следующем графике:*

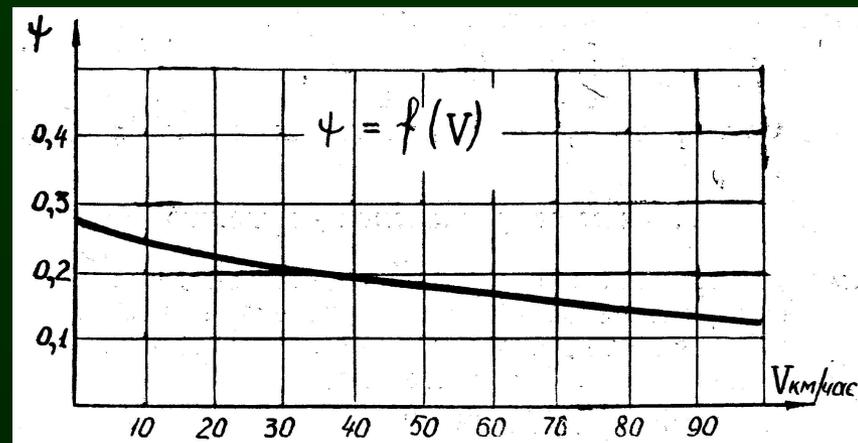
*Также следует учитывать, что коэффициент сцепления для всего поезда всегда меньше, чем для одного вагона и, тем более, для одной колёсной пары. Это вызвано перераспределением нагрузок между осями под действием силы тяги. Например, в тяговом режиме наименьшая нагрузка, а, следовательно, наименьший коэффициент сцепления приходится на первую колёсную пару. Вот почему именно она начинает боксовать первой.*

*Коэффициент сцепления можно выразить в удельном виде - в килограммах на тонну веса:*

*При  $\Psi = 0,22$  максимальная сила тяги будет равна  $0,22 \times 1000 = 220 \text{ кг/т}$*

*При  $\Psi = 0,18$  -  $180 \text{ кг/т}$*

*Следует отметить, что на коэффициент сцепления особенно влияет состояние поверхности рельсов, ведь смазка и грязь, естественно, переносятся на поверхность катания. Особенно коэффициент сцепления падает на открытых участках в начале дождя, когда на поверхности образуется ещё не смытая обильным дождём грязная плёнка.*



# Коэффициент сцепления.

- ◆ *Коэффициент сцепления колеса с рельсом представляет собой коэффициент трения покоя. Его величина зависит от ряда факторов. Наибольшее его значение достигается при сухих, чистых рельсах. Влага, грязь, масло сильно снижают значение коэффициента сцепления. Однако обильная промывка колеса и рельсов чистой водой даже несколько улучшает сцепление, что объясняется вымыванием сильной струей воды грязи и масла, могущих быть во впадинах шероховатой поверхности.*
- ◆ *Большое влияние на коэффициент сцепления так же оказывает твердость материала рельсов и бандажей.*
- ◆ *Величина коэффициента сцепления зависит от скорости движения вагона и, с увеличением скорости падает.*
- ◆ *При движении вагона в кривых участках пути коэффициент сцепления так же падает.*
- ◆ *При хорошем состоянии рельсов, при малых скоростях может быть реализован коэффициент сцепления порядка 0,25 в среднем же, при расчетах коэффициент сцепления принимается равным 0,18.*

# Условие нормального

## ДВИЖЕНИЯ.

*Максимальная сила тяги не должна быть больше предельной силы сцепления.*

- ◆ *Решим задачу. Возникнет ли боксование при следующих условиях:*

*$F_t = 1400$  кгс (сила тяги)*

*$P_{сц} = 8000$  кгс (сцепной вес)*

*$\psi = 0,12$  (коэф. сц.)*

-----

- ◆  *$T = P_{сц} \psi = 8000 \times 0,12 = 960$  кгс, так как реализуемая сила тяги оказалась больше предельно допустимой. Расчитаем  $\psi$ , при котором возможно нормальное движение:  $\psi = P_{сц} : F_t = 1400 : 8000 = 0,175$ . Очевидно, что заданный  $\psi$  (0,12) меньше необходимого в данных условиях.*

# Природа и классификация сил сопротивления движению.

- ◆ *Поезд при движении испытывает противодействие многих сил, различных по причине возникновения, природе и величине. Некоторые из них изменяются медленно, другие – более быстро, вплоть до импульсного действия. Многие из этих сил взаимосвязаны, многие – случайны. Принято оценивать суммарный эффект от всех сил, противодействующих движению, как сопротивление движению поезда. В соответствии с этим, сопротивлением движению называют эквивалентную силу, приведенную к ободу колеса, на преодоление которой затрачивается такая же работа, как и на преодоление всех действительных сил, противодействующих движению.*
- ◆ *Сопротивление движению зависит от конструкции и технического состояния подвижного состава, верхнего строения пути, профиля и плана пути, от скорости движения поезда, а так же от скорости и направления ветра. Оно обусловлено наличием трения в узлах подвижного состава, трением колеса о рельсы, деформациями пути и элементов подвижного состава, сопротивлением воздушной среды, а так же составляющими силы тяжести на уклонах.*
- ◆ *Энергия, затраченная на преодоление силы трения – невозвратима. Она расходуется на истирание деталей электроподвижного состава, пути и превращаясь в тепло, рассеивается в окружающей среде. Невозвратима и энергия, направленная на преодоление сопротивления воздушной среды. Энергия, направленная на преодоление подъемов, может быть частично, а в некоторых случаях, например на крутых спусках, почти полностью возвращена в контактную сеть и использована для преодоления сопротивления движению поездов, движущихся на подъем.*

# Сопротивление движению условно делят на две составляющие: **1. Зависящую от типа подвижного состава и скорости его движения; 2. Зависящую от плана и профиля пути, а так же от особых условий движения.**

- ◆ *Первую составляющую называют «Основным сопротивлением движению»  $W_0$ ; оно представляет собой сопротивление движению подвижного состава данного типа на прямолинейном и горизонтальном открытом участке пути при любой скорости подвижного состава, в том числе и при  $V=0$ . Эта составляющая обусловлена наличием внутреннего трения в узлах подвижного состава, сопротивлением, возникающим при взаимодействии подвижного состава и пути, а так же сопротивлением воздушной среды (при отсутствии ветра).*
- ◆ *Вторую составляющую называют «Дополнительным сопротивлением движению»  $W_d$ ; оно представляет собой сопротивление от уклонов и кривых. Считают, что дополнительное сопротивление не зависит от скорости движения, и определяется только планом и профилем пути. Различают еще дополнительное сопротивление от ветра, сопротивление при движении в туннелях, а так же при температурах окружающего воздуха ниже  $-25$  градусов. Таким образом, сопротивление движению поезда*

$$W=W_0+W_d$$

*Или при нормальных температурах окружающего воздуха и отсутствии ветра*

$$W=W_0+W_i+W_r$$

*Где:  $W_i$  – сопротивление движению от уклонов и  $W_r$  – сопротивление движению от кривых.*

*Часто сопротивление движению поезда  $W$  представляют как сумму сопротивления движению локомотива  $W'$  и сопротивления движению состава  $W''$*

$$W=W'+W''$$

*Такое разделение является чисто условным, оно лишь приближенно отражает действительное соотношение сопротивление локомотива и состава в общем сопротивлении поезда, так как эти составляющие фактически неотделимы друг от друга.*

◆ **Основное сопротивление ( $W_0$ ).** Оно включает в себя трение в подшипниках букс, трение качения, потери кинетической энергии от ударов на стыках, стрелочных переводах и сопротивление воздуха при движении в тоннеле (ведь поезд при движении работает, как поршень, выталкивая воздушные массы впереди и увлекая их за собой позади). На практике машинист проверяет основное сопротивление путём отпуска тормозов на прямом участке пути с уклоном вперёд не более 3 ‰. Если поезд скатывается, то считается, что основное сопротивление не превышает конструктивную норму.

◆ **Дополнительное сопротивление ( $W_d$ ).** К этой группе относятся:  
сопротивление от подъёма -  $W_i$   
сопротивление от прохождения кривой -  $W_r$   
сопротивление ветра на открытых участках (учитывается при морозе свыше 10С) -  $W_t$

Очевидно, что полное сопротивление движению поезда можно выразить формулой:

◆  $W_k = W_0 + W_d$  или  $W_k = W_0 + W_i + W_r + W_t$  (кг)

Пример 1. Определить сопротивление движению поезда при:

◆  $P = 400$  т (400 000 кг)

◆  $i = 25$  ‰

-----  
◆  $W_i = 400\,000 \times 0,025 = 10\,000$  кгс

◆ Пример 2. Определить полное сопротивление движению поезда при:

◆  $P = 350$  т

◆  $w_i = i = 25$  ‰

◆  $R = 250$  м

-----  
◆  $w_r = 750$  (константа) :  $250 = 3$  кг/т

◆  $W_k = P (2(\text{константа}) + i + w_r = 350 (2 + 25 + 3) = 10\,500$  кгс

# Мероприятия по уменьшению сопротивления движению.

- ◆ *Уменьшение сопротивления движению поезда снижает расход электроэнергии на тягу поездов и позволяет повысить скорость движения при той же мощности э.п.с. Для существующего подвижного состава мероприятия по снижению сопротивления движению сводятся в основном к следующему:*
- ◆ *Полновесная загрузка вагонов – снижается удельное сопротивление движению и сопротивление на 1т перевозимого груза (при этом полное сопротивление движению возрастает в значительно меньшей степени, чем снижается удельное сопротивление движению);*
- ◆ *Правильное формирование составов, в частности – сосредоточение порожних и не полностью загруженных платформ и полувагонов в конце состава – уменьшается количество открытых встречному потоку воздуха торцовых стенок крытых вагонов, что снижает сопротивление воздушной среды;*
- ◆ *Закрытие дверей и люков вагонов – улучшается обтекаемость поезда и уменьшается сопротивление воздушной среды;*
- ◆ *Периодическое регулирование тормозов – устранение трения колодок о бандажи при отпущенных тормозах;*
- ◆ *Сокращение времени стоянок – существенно облегчаются условия трогания поездов, особенно – в зимнее время;*
- ◆ *Надлежащее содержание верхнего строения пути, существенно влияющее на основное сопротивление движению.*

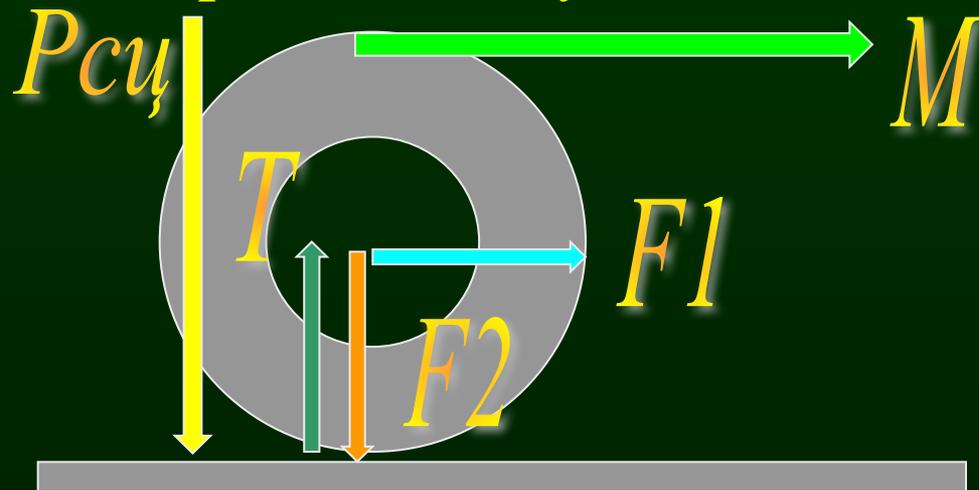
*Практика работы передовых машинистов убедительно показывает, что в результате систематического осуществления указанных мероприятий можно реально повысить массу поезда и скорость движения, обеспечив экономию электрической энергии.*

## ***К мероприятиям, осуществляемым при проектировании, модернизации и постройке подвижного состава новых типов относятся:***

- ◆ ***Уменьшение тары вагонов путем применения сварных конструкций и легких сплавов обеспечивающее снижение общего сопротивления движению и сопротивление на 1т полезного груза;***
- ◆ ***Перевод подвижного состава на роликовые подшипники;***
- ◆ ***Применение обтекаемой формы для подвижного состава для высоких скоростей, это относится не только к головным и хвостовым вагонам поезда, но и к оборудованию, расположенному на крыше подвижного состава;***
- ◆ ***Укладка бесстыкового пути, что уменьшает общее сопротивление движению, особенно при высоких скоростях;***
- ◆ ***Реконструкция пути (укладка щебеночного балласта, рельсов тяжелого типа, с соответствующим увеличением числа шпал на 1 км);***
- ◆ ***Изменение профиля и плана пути с целью снижения дополнительного сопротивления движению путем уменьшения крутизны уклонов и увеличения радиуса кривых;***

***Уменьшению сопротивления способствует поддержание хорошего технического состояния подвижного состава, его механической части, узлов трения и тормозной системы. Поэтому необходимо вести тщательное наблюдение за всеми узлами подвижного состава и своевременно производить их ремонт высокого качества.***

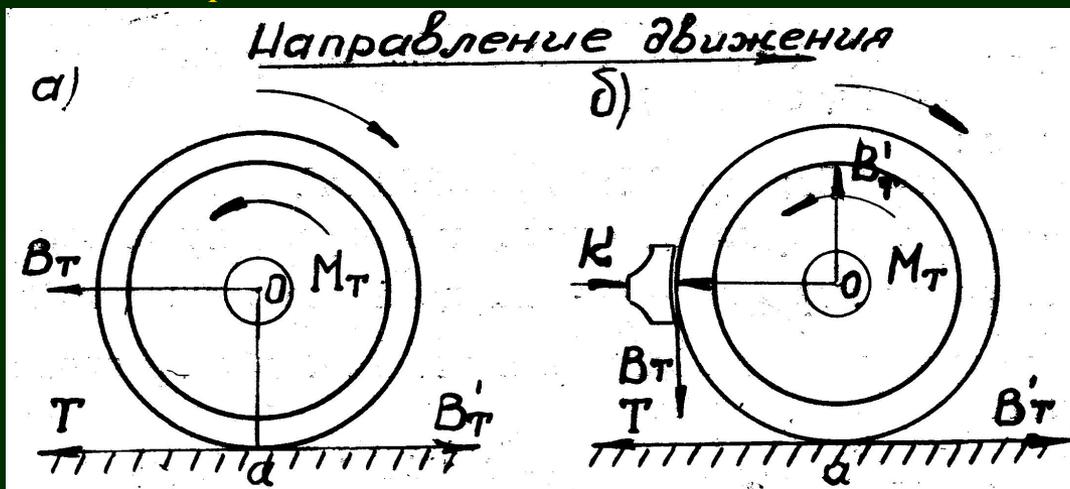
- ◆ *Вращающий момент якоря двигателя можно представить в виде пары сил, из которых  $F1$  приложена к оси колесной пары, а другая –  $F2$  приложена в точку касания колеса с рельсом.*
- ◆ *Поскольку колесная пара опирается на рельсы с силой  $R_{сц}$ , то под действием  $F2$  в точке касания колеса с рельсом возникает внешняя сила сцепления  $T$ , которая является горизонтальной реакцией рельса на  $F2$ .*
- ◆  *$F2$  и  $T$  равны по величине, но противоположны по направлению, поэтому они взаимно уравновешиваются. Остается неуравновешенной  $F1$ , которая и заставляет колесо совершать поступательное движение.*



СОСТАВ "СКИФ" НА ВОЛКОВСКОЙ ЛИНИИ. 18.03.2007  
РАБОТА Ю. СЫ

# Условие нормального торможения.

- ◆ Интенсивность тормозной силы, иначе говоря, величину и продолжительность её действия на поезд, выбирает и регулирует машинист, применяя торможение либо для подтормаживания (на затяжном спуске), либо для остановки.
- ◆ При работе тяговых двигателей в генераторном режиме возникает **тормозной момент ( $M_T$ )**, направленный против направления вращения колеса. Этот момент представлен в виде пары сил  $B_T$  и  $B'_T$  с плечом, равным радиусу колеса. Сила  $B'_T$  уравнивается силой  $T$  (продольная реакция рельса), но неуравновешенной остаётся сила  $B_T$ , - она то и оказывает сопротивление движению поезда.



Возникновение тормозной силы.

а) - при электрическом

б) - при механическом торможении

- ◆ Равнодействующая сил  $B_T$  и  $T$  в точке  $a$  должна быть равна нулю. Если в какой-то момент это равновесие прекратится, то колёсная пара прекратит вращение, то есть, пойдёт юзом, так как поступательное движение не прекратится. Иными словами - тормозная сила превосходит максимальную силу сцепления. Таким образом, **УСЛОВИЕ НОРМАЛЬНОГО ТОРМОЖЕНИЯ (без юза) можно выразить формулой:  $B_{T \max} \leq \mu \cdot P_{сц}$ , то есть, максимальная тормозная сила не должна быть больше предельной силы сцепления.**
- ◆ Сила трения  $B_T$  возникает при нажатии колодок на вращающееся колесо. Совместно с реакцией буксы  $B'_T$  образуется пара сил, аналогичная силам на рисунке а). Таким образом, реализация тормозного момента на колесе как при электрическом, так и при пневматическом торможении - одинаковая. Коэффициент трения тормозных колодок, от которого зависит величина тормозной силы, зависит от материала колодок, силы нажатия на колесо, скорости движения и температуры. Наиболее низкий коэффициент трения для композитных колодок приходится на диапазон скоростей от 60 до 70 км/ч, а наиболее высокий - от 25 до 35 км/ч.

# Колодочный тормоз

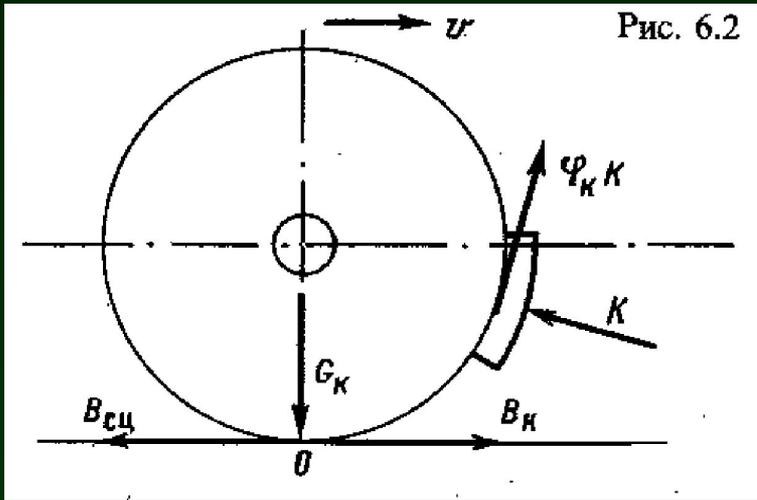


Рис. 6.2

- ◆ При **колодочном тормозе** тормозная сила создается в результате нажатия тормозных колодок на колеса. На железнодорожном подвижном составе для обеспечения тормозных устройств воздухом и дистанционного управления ими предусмотрена **однопроводная тормозная магистраль**, состоящая из трубопровода локомотива и последовательно включенных тормозных трубопроводов каждого вагона.
- ◆ В процессе торможения, который начинается при **установке рукоятки крана машиниста в соответствующее положение**, происходит падение давления в тормозной магистрали. Вследствие этого сжатый воздух из запасных резервуаров поступает через воздухораспределители в тормозные цилиндры, поршни которых приводят в действие тормозную рычажную передачу, прижимающую колодки к колесам и **создающие при этом тормозную силу**.
- ◆ При механическом торможении происходит последовательное включение вагонов в работу по длине поезда т.е. тормозная волна сравнительно медленно распространяется вдоль поезда. Из-за этого увеличивается время торможения и одновременно – эффективность действия тормозов.
- ◆ Для одновременного ввода в действие тормозов всех вагонов применяют электропневматическое торможение, при котором возбуждение вентилях воздухораспределителей осуществляется электрическим импульсом, посылаемым по специально проложенным проводам. Электропневматические тормоза обладают высокой эффективностью.

# Тормозная сила

- ◆ Если  $K$ -сила нажатия колодки на колесо, кН;  $\phi_k$  – коэффициент трения между колесом и колодкой; то тормозная сила- $B$ , развиваемая колодкой (рис 6.2)

$$B_k = 1000 K \phi_k.$$

- ◆ Тормозная сила  $B$  поезда равна сумме тормозных сил колодок состава и локомотива.

$$B = 1000 \Sigma K \phi_k.$$

- ◆ Удельная тормозная сила  $b$ /кН при массе  $m$  поезда –

$$b = 1000 \frac{\Sigma K \phi_k}{mg}.$$

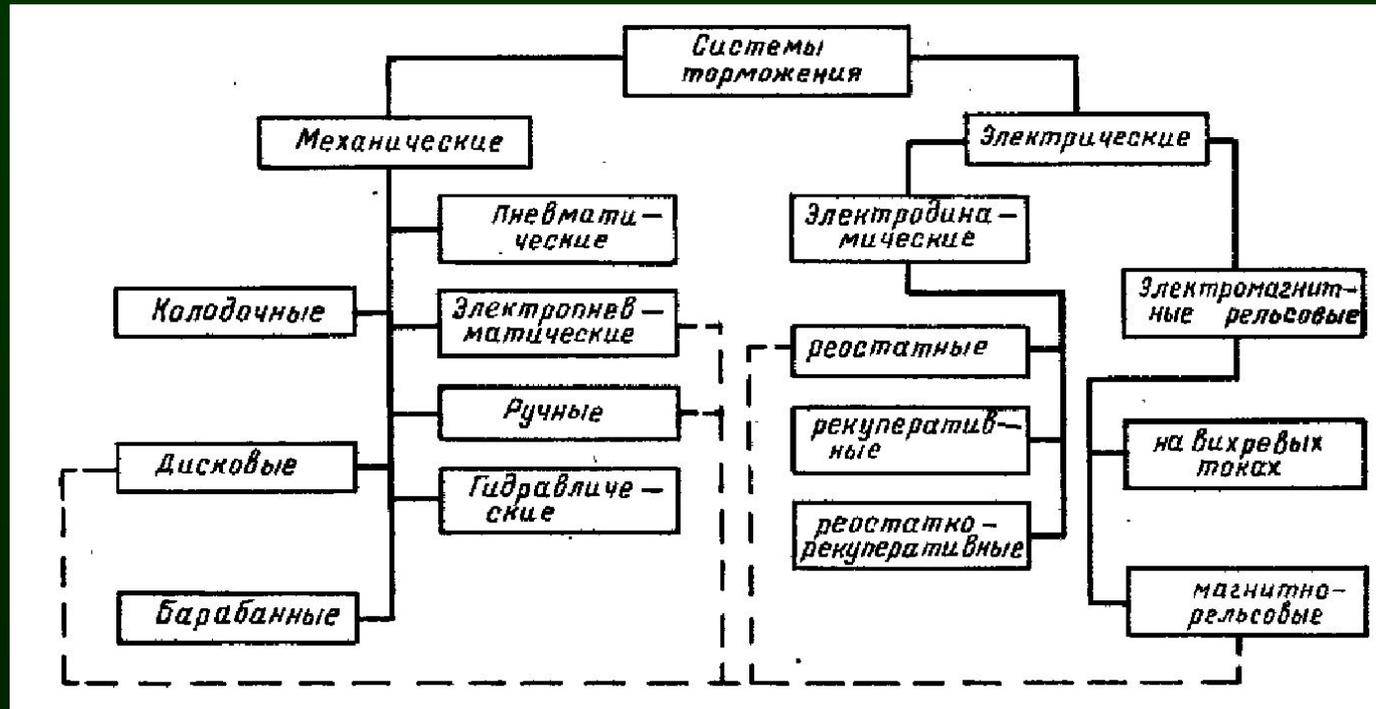
- ◆ При пневматических тормозах сила нажатия тормозной колодки  $K$  зависит от давления в тормозном цилиндре, диаметра цилиндра, передаточного числа рычажно-тормозной передачи, и КПД тормозной системы.
- ◆ Для повышения эффективности действия тормозов вагоны оборудованы автоматическими регуляторами режима торможения (авторегжим) предназначенными для изменения давления сжатого воздуха в зависимости от загрузки вагона, т.е. для изменения силы нажатия тормозных колодок на колесо.

# СИСТЕМЫ

## ТОРМОЖЕНИЯ

*В процессе движения машины не может возникнуть силы сопротивления движению, поскольку эти силы не по своей природе являются нерегулируемыми. Поэтому снизить скорость движения поезда и остановить его, а так же удержатъ поезд на спусках можно лишь только приложив к нему управляемую силу, направленную против движения. Эту силу, искусственно увеличивающую сопротивление движению, называют тормозной.*

*Если путь, проходимый поездом при трогании и разгоне не связан в нормальных условиях с безопасностью движения, то при торможении поезд должен быть остановлен по условиям безопасности движения на расстоянии не превышающем расчетную длину тормозного пути в зависимости от скорости движения и наличия тормозных средств в поезде. Поэтому – тормозная сила значительно больше силы тяги.*



# Классификация систем торможения

*Существуют механические и электрические системы торможения.*

- ◆ *В механических тормозах – колодочные, дисковые, барабанные – кинетическая энергия поезда превращается в работу трения, которая расходуется на истирание и нагревание трущихся поверхностей.*
- ◆ *При электрическом торможении (электродинамическом) – кинетическая энергия поезда, превращенная в электрическую или поглощается в резисторах подвижного состава и рассеивается в виде тепла в окружающем пространстве, либо возвращается в контактную сеть.*

*В первом случае электрическое торможение является реостатным, во втором случае – рекуперативным.*

# Общие требования

## к системам электрического торможения.

- ◆ *Электрическое торможение имеет ряд технико – экономических преимуществ по сравнению с механическим:*
- *Уменьшение износа тормозных колодок и бандажей колесных пар, расходов на содержание тормозного оборудования и колесных пар, экономия электроэнергии при рекуперативном торможении;*
- *Повышение скорости движения на затяжных спусках;*
- *Большая безопасность движения вследствие наличия дополнительной тормозной силы электроподвижного состава;*
- *Уменьшение загрязнения путей и оборудования электроподвижного состава металлической пылью, образуемой при истирании тормозных колодок и бандажей колесных пар, особенно нежелательной на метрополитене и в туннелях;*
- *Значительное упрощение управления торможением, возможность автоматического регулирования режимов торможения.*

*Применение электрического торможения связано с некоторым усложнением электрооборудования и электрических цепей подвижного состава.*

- ◆ **Системы электрического торможения подвижного состава должны отвечать следующим требованиям:**
  - **Обеспечивать тормозные характеристики для поддержания постоянной скорости поезда на спусках и торможения перед остановкой в пределах, допустимых по условиям сцепления и надежной работы тяговых двигателей (механическая устойчивость системы);**
  - ◆ **Обладать электрической устойчивостью;**
  - ◆ **Иметь минимально возможные расхождения токов двигателей, работающих параллельно на общую нагрузку, при нестабильности их характеристик;**
  - ◆ **Не допускать значительных колебаний тока и тормозной силы при переключении ступеней и кратковременных изменениях напряжения в контактной сети;**
  - ◆ **Обеспечивать высокую надежность работы и удобство управления режимом торможения.**

**Характеристики электрического торможения определяются параметрами генераторного режима тяговых двигателей, системой их возбуждения, нагрузкой, а так же системой управления тормозным процессом.**

*На современном электроподвижном составе поддержание тормозных характеристик, близких к предельным, удобство управления торможением обеспечивают системы бесконтактного автоматического регулирования на основе тиристорных преобразователей.*

*Большое значение приобретает электрическое торможение на высокоскоростном подвижном составе, где оно позволяет обеспечить высокую эффективность торможения во всем диапазоне изменения скорости.*

- ◆ *Электрическое торможение локомотивов и моторных вагонов применяют наряду с механическим, которое используют для служебного торможения для остановки поезда при низкой скорости движения, и совместно – для экстренного торможения. Реостатное торможение широко применяют на пассажирских электровозах как средство повышения безопасности движения поездов.*

4.

***Боксование и  
юз колесных  
пар.***





*Ретро-поезд на Great Central Railway (США) с паровозом GVR 5101*

◆ **При трогании с места и при торможении происходит перераспределение нагрузки от вагона на колесные пары. При трогании разгружаются передние колесные пары, а при торможении – задние.**

# Боксование

- ◆ — термин, применяемый на железнодорожном транспорте для обозначения явления проскальзывания колёсных пар (локомотива или моторвагонного подвижного состава) по отношению к поверхности рельса, при котором поверхность качения колёсной пары имеет линейную скорость выше, чем поверхность рельса, по которой колёсная пара катится.
- ◆ Боксование может быть устойчивым (вращение на одном месте) и прерывистым (с периодическим восстановлением сцепления).
- ◆ После срыва в боксование коэффициент трения между колесом и рельсом резко уменьшается, и самопроизвольно боксование прекратиться уже не может. Длительное не прекращающееся боксование называется разносным боксованием.



Износ рельса в результате боксования, видны характерные боковые "подтёки"

Современные словари сообщают о происхождении слова от нем. *Buchse*, «букса». По другим источникам, термин произошёл в паровозную эпоху от английского слова «*boxing*» — так как движение дышел паровоза при возникновении этого явления напоминает движение рук боксера.

# Последствия боксования

## Для тягового подвижного состава:

- ◆ При боксовании паровоза может произойти повреждение паровой машины.
- ◆ При боксовании тепловоза, электровоза или МВПС с электроприводом происходит резкое увеличение частоты вращения тяговых двигателей, что в первую очередь резко ухудшает коммутацию и может вызвать круговой огонь по коллектору.
- ◆ При разносном боксовании частота вращения якоря ТЭД резко увеличивается, увеличиваются центробежные силы, действующие на якорную обмотку, уложенную в пазах якоря, и может произойти размотка бандажа якоря, выдавливание клиньев, удерживающих обмотку, и петель самой обмотки из пазов. Тяговый двигатель повреждается в таком объёме, что требует капитального ремонта.

**В разнос тяговый двигатель начинает работать и при срыве кулачка карданной муфты. При этом работа двигателя в разнос определяется по характерному высокому звуку. На этом вагоне необходимо отключить цепи управления.**

## Для путевого хозяйства:

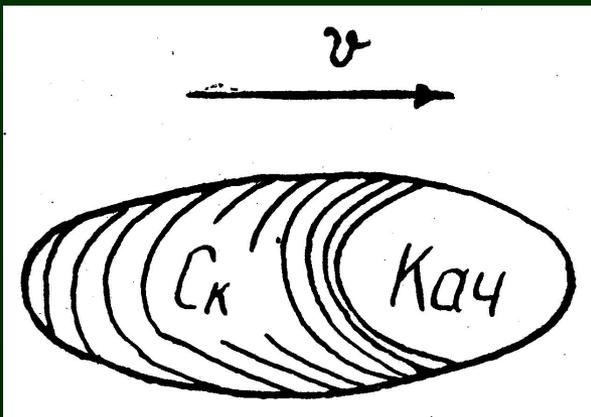
- ◆ Износ рельса в результате боксования, видны характерные боковые "подтёки"
- ◆ При боксовании на головке рельса образуются пропилы и волнообразный износ рельс. Известны случаи, когда в результате неграмотных действий машиниста образовывались пропилы, полностью «съедавшие» головку рельса. От сильного трения металл разогревается, в результате чего течёт в стороны под нагрузкой (как при ковке). Для ликвидации этих дефектов необходимо производить шлифовку рельсов, а в особо тяжёлых случаях — замену рельсов.
- ◆ Наиболее часто повреждаются пропилами горловины парков отправления сортировочных станций или станций смены локомотива, где очень часто локомотивы берут с места составы большого веса и длины.

Установлено, что опорная площадка в месте контакта колеса и рельса состоит из двух зон: зоны качения и зоны скольжения.

В зоне скольжения волокна стали колеса растягиваются, а в зоне качения волокна, стремясь вернуться в прежнее, недеформированное, состояние сжимаются. Такое проскальзывание называют упругим скольжением. Как отмечалось ранее, разница между расстоянием, пройденным колесом и фактическим (линейным) расстоянием составляет около 2%. Такой же эффект наблюдается и при торможении, но уже наоборот - тормозящая ось проходит путь меньше фактического. Именно это явление растяжения и сжатия лежит в основе природы боксования.

При боксовании колёсной пары быстрое и значительное повреждение «буксовины» получают рельсы, при этом повреждение колёсных пар гораздо меньше, оно выражается в виде равномерного проката по кругу катания. В момент боксования резко снижается сила тяги, а при боксовании всех колёсных пар поступательное движение прекращается вовсе. Это вполне естественно, ведь при боксовании коэффициент трения очень мал - не более 0,05.

- ◆ Боксование обычно наблюдается при выезде из депо на линию: в утреннюю росу, туман, в гололёд. Причем оно возникает, как правило, при подключении после остановки у светофора «Д». На открытых участках при неблагоприятных условиях коэффициент сцепления может снижаться до 0,1 и менее. При этом может возникать как устойчивое, так и прерывистое боксование («пробуксовка»).
- ◆ При возникновении боксования машинист должен либо прекратить вывод позиций РК, либо совсем отключить тягу. Устойчивое боксование опасно ещё и тем, что тяговые двигатели последовательного возбуждения, применяемые на вагонах метрополитена, при этом могут пойти «вразнос», что неминуемо приведёт к их разбандажировке и, в конечном итоге, к заклиниванию колёсных пар.



# Причины боксования и условия возникновения

*Боксование возникает на локомотиве или моторном вагоне МВПС вследствие превышения реализуемой колёсной парой силы тяги силы сцепления колеса с рельсом. Возникновению и развитию явления боксования способствуют:*

- ◆ *увлажнение поверхности рельса во время слабого дождя (сильный дождь, напротив, способствует очистке головки рельса и повышает сцепление);*
- ◆ *загрязнение поверхности рельса или поверхности катания бандажа колёсной пары маслянистыми жидкостями (масла, смазки, жир) (во французском анимационном телесериале «Вокруг света за 80 дней» поезд, на котором ехал Филеас Фогг, забоксовал, — мистер Фикс смазал ходовые рельсы жиром на подъеме по пути следования поезда);*
- ◆ *Увеличение силы тяги из-за проскакивания позиций РК, нарушения регулировки РУТ;*
- ◆ *разгрузка первой оси в каждой тележке ТПС ввиду момента, возникающего при реализации тягового усилия;*
- ◆ *наличие на колёсной паре большого проката, что уменьшает пятно контакта колеса и рельса;*
- ◆ *нахождение тягового подвижного состава в кривой малого радиуса (при этом неизбежно возникает проскальзывание, так как колесо, идущее по внешней нитке рельсового пути, проходит путь больший, чем колесо, идущее по внутренней нитке)*

## Методы предотвращения и прекращения боксования

*Для предотвращения используются системы, догружающие первую по ходу движения колёсную пару в каждой тележке, системы анализирующие разницу тока по двигателям одной тележки.*

*Для прекращения возникшего боксования используются следующие методы:*

- *подача в зону контакта колеса и рельса песка или другого абразивного материала – применяется на железнодорожном транспорте;*
- *уменьшение силы тяги, реализуемой тяговым двигателем, т.е. перевод главной рукоятки КВ в «Ход-1» и задержка вращения РК;*
- *Перевод главной рукоятки КВ в «О» и последующее применение ручного пуска.*

# Юз колесных пар

- ◆ **Юз** — скольжение по опорной поверхности (дороге, рельсам) колёс транспортного средства (автомобиля, трамвая, железнодорожного вагона), при котором линейная скорость поверхности колёс ниже скорости опорной поверхности относительно транспортного средства.
- ◆ **Юз** наблюдается при торможении, причиной юза является превышение тормозного усилия над силой сцепления колеса с опорной поверхностью.
- ◆ **Юз** возникает не только при блокировании колеса, но и при его вращении, когда колесо проскальзывает по дороге.
- ◆ Скольжение колес при разгоне — буксование (на железнодорожном транспорте боксование).
- ◆ Во избежание юза на современных автомобилях применяют антиблокировочные системы, снижающие тормозное усилие при возникновении юза.

**На железнодорожном транспорте для предупреждения юза применяется регулирование тормозного усилия в зависимости от загрузки с помощью грузового авторежима.**

Для рельсовых транспортных средств (трамваи, подвижной состав железных дорог и метро) движение юзом приводит к истиранию заблокированных колёс в месте их соприкосновения с рельсом и появлению на бандаже колеса плоского участка — так называемого ползуна.

Наличие ползунов (несимметричности колёс относительно оси вращения) приводит к повышению шумности (стук от последующих ударов образовавшейся лыски о рельс), вибрации (расстояние оси колёсной пары до поверхности рельса уже непостоянно при движении), неравномерному износу рельсов (так называемый волнообразный износ рельсового пути).

Для устранения этих вредных явлений колёсные пары с ползунами необходимо обтачивать, а рельсовые пути обрабатывать рельсошлифовальным вагоном. Бандажи, сточившиеся таким образом называют «квадратными».

- ◆ Юз - прямолинейное движение с невращающейся колёсной парой. Так как все оси вагонов метрополитена являются моторными, значит все они подвержены юзу. При юзе происходит неравномерный износ поверхности катания колеса, при этом снижается культура обслуживания пассажиров (равномерный стук), а также создаётся угроза безопасности движения, так как повреждённая колёсная пара производит сильные динамические удары, которые могут повредить как вагонное оборудование, так и ходовые рельсы (вызвать их излом). Именно поэтому при сдаче состава в депо машинист обязан обращать внимание на состояние поверхности катания колёс.

**Учитывая вышеизложенное, можно утверждать, что юз может возникнуть:**

- ◆ при снижении реализуемого коэффициента сцепления колёс с рельсами
- ◆ при повышении коэффициента трения тормозных колодок в зависимости от их нагрева и скорости поезда
- ◆ от чрезмерной силы нажатия колодок из-за неправильной регулировки РТП
- ◆ от превышения тормозного момента над вращающим при электрическом торможении.

- ◆ Главная опасность юза - это значительное увеличение тормозного пути! При этом коэффициент сцепления падает до 0,025 и ниже. Юз бывает устойчивый (вследствие механического заклинивания), длительный (на всё время торможения) и кратковременный. Самым опасным является устойчивый юз, так как при движении вагона с заклиненной колёсной парой на поверхности катания колеса образуется значительная «лыска», в результате сила трения скольжения значительно повышается, что может привести к расклиниванию. При этом сильнейшие динамические удары повреждённого колеса о рельс могут привести к непредсказуемым, тяжёлым, последствиям. Исходя из вышеизложенного следует, что при движении с заклиненной колёсной парой машинист должен постоянно наблюдать по зеркалу заднего вида за неисправным вагоном, и при расклинивании - вновь заклинить эту колёсную пару при помощи ручного (стояночного) или пневматического тормозов.
- ◆ При возникновении юза машинист должен перевести главную рукоятку КВ в положение Тормоз-1, чтобы вернуть ТРП на уставку №1 (во время тиристорного торможения), а при реостатном торможении - для остановки вала РК на достигнутой позиции. При этом снизится скорость поезда и ЭДС генераторов, а значит, уменьшится сила тока и тормозная сила. В результате сцепление колёс с рельсами восстановится и юз прекратится. Если юз не прекратился, то необходимо кратковременно перевести главную рукоятку КВ в «тормоз-1», а затем применить пневматическое торможение с минимальными ступенями.

# Ползун (лыска)

- повреждение поверхности катания колёс рельсовых транспортных средств (трамваев, подвижного состава железных дорог и метрополитена) относительно оси вращения, выражающееся в появлении на круговой поверхности катания плоского места. Наиболее распространённой причиной появления ползуна является блокирование колёс при движении (юз), что приводит к истиранию поверхности катания и образованию на ней плоского участка.



Основная опасность ползуна заключается в том, что из-за него на колесе создаётся несимметричность поверхности катания и при прохождении ползуна над рельсом колёсная пара словно молот бьёт с высоты ползуна по рельсовому пути, разрушая его. А также, сторона колёсной пары с ползуном начинает "отставать" от исправной стороны, что может привести к разрушению буксовых узлов и сходу состава.

# *Торможение короткозамкнутым контуром*

- ◆ *Для торможения короткозамкнутым контуром необходимо перевести реверсивную рукоятку КВ в положение «назад», а главную - в положение «тормоз-1». Такой способ торможения можно применять только при движении по деповским путям, то есть, при отсутствии контактного рельса и невозможности применить торможение противотоком. При этом скорость начала торможения должна быть не более 5 км/ч!*
- ◆ *Совершенно недопустимо применять такой вид торможения при большей скорости, так как в результате возникнет «опрокидывание» группы генераторов, то есть, они перейдут в двигательный режим и колёса начнут вращаться в противоположную сторону. При этом изменится направление тока в обмотках возбуждения, что вызовет не только размагничивание машины, но и нарушение баланса ЭДС в узловых точках тормозного контура, и, как следствие, резко возрастет тормозной ток, что приведёт к серьёзным повреждениям двигателей и механического оборудования.*

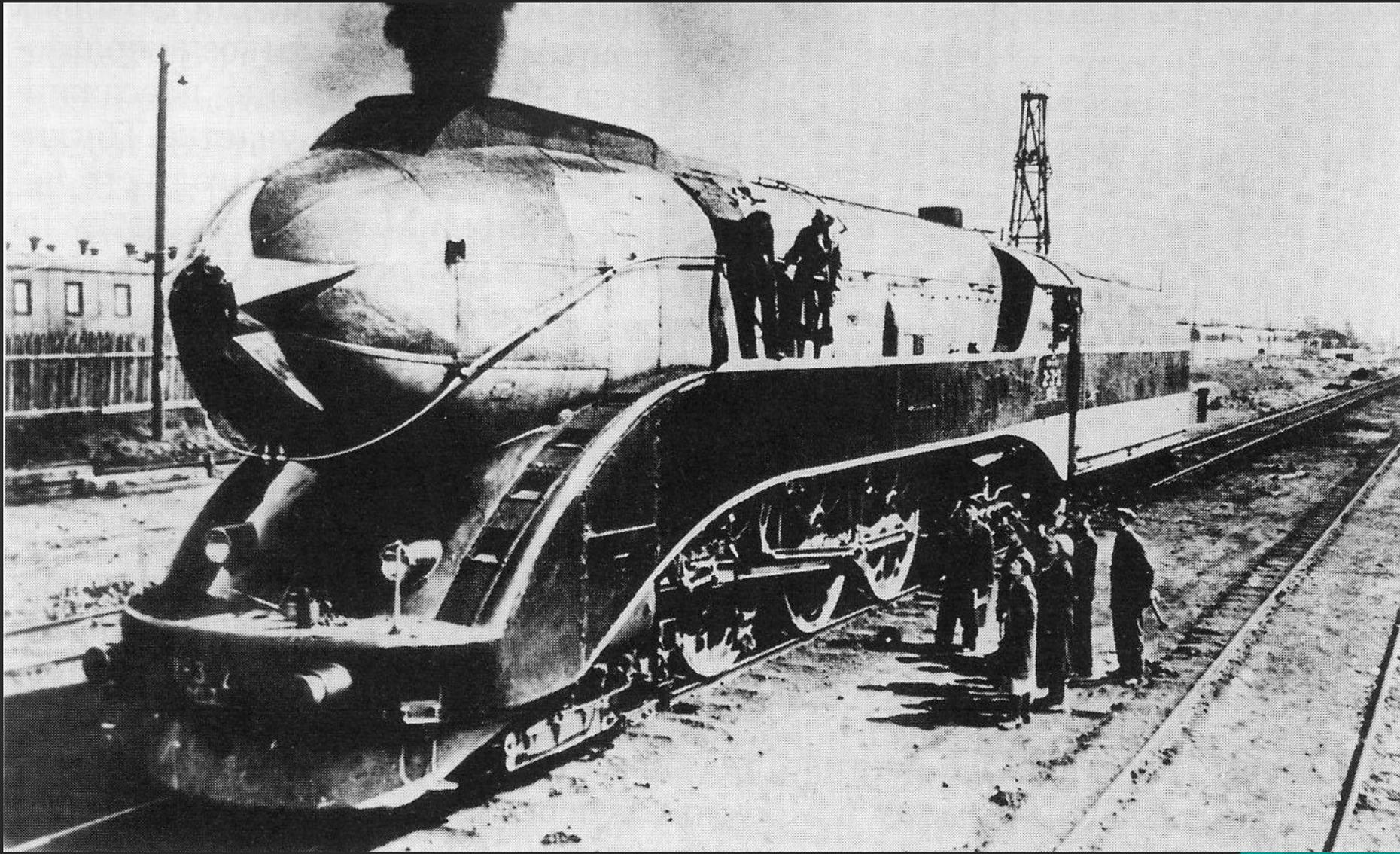
# *Торможение противотоком.*

- ◆ *В случае отказа электрического и пневматического тормозов при наличии напряжения на контактном рельсе и при скорости не более 15 км/ч машинист должен применить торможение противотоком. Для этого необходимо перевести реверсивную рукоятку КВ в положение «назад», а главную - в положение «ход-1». При этом двигатели начинают работать, как генераторы, соединённые последовательно с сетью. Возникший в якорях ток будет больше тока нормального пуска 1й позиции РК, так как он будет определяться, исходя из суммы напряжений контактного рельса и ЭДС двигателей (генераторов). Следовательно, при таком торможении также недопустимо производить вывод позиций РК.*

5.

# Тяговые расчеты.





*Скоростной паровоз № 6998*

# Уравнение движения поезда

- ◆ Существуют три режима движения поезда: режим тяги, выбега и торможения, и для каждого из них можно определить равнодействующую силу.
- ◆ **Режим тяги:**  $F_y = F_k - W_k$ , где:  $F_k$  и  $W_k$  -- силы тяги и сопротивления движению  $F_y$  - результирующая сил.
- ◆ **Режим выбега:**  $F_y = \pm W_k$  (- на спуске и + на подъёме или площадке)
- ◆ **Режим торможения:**  $F_y = -(B_T + W_k)$ , где  $B_T$  - тормозная сила. Если  $(B_T + W_k) > 1$ , то скорость поезда при торможении снижается, если  $(B_T + W_k) = 0$ , то скорость (на спуске) постоянная, то есть, происходит подтормаживание.
- ◆ Уравнение движения поезда вытекает из формулы, известной по школьной программе физики:
- ◆  $F = ma$ , где  $m$  - масса тела,  $a$  - ускорение. Расчётным методом установлено, что...
- ◆ для режима тяги:  $a = f_k - w_k$
- ◆ для режима выбега:  $a = - w_k$
- ◆ для режима торможения:  $a = - (w_k + b_T)$

**На самом деле уравнение движения поезда является дифференциальным.**

# Расчет тормозной силы ручного тормоза

- ◆  $В_{р.т} = n \cdot \varphi \cdot P_{р.т}$  где:
- ◆  $n$  – передаточное число ручного тормоза = 1000
- ◆  $\varphi$  – коэффициент трения колеса о колодку = 0,4
- ◆  $P_{р.т}$  – усилие на рукоятке ручного тормоза = 20 Кгс
- ◆ Таким образом:  $В_{р.т} = 1000 \cdot 0,4 \cdot 20 = 8000$  Кгс

## *Решим задачу:*

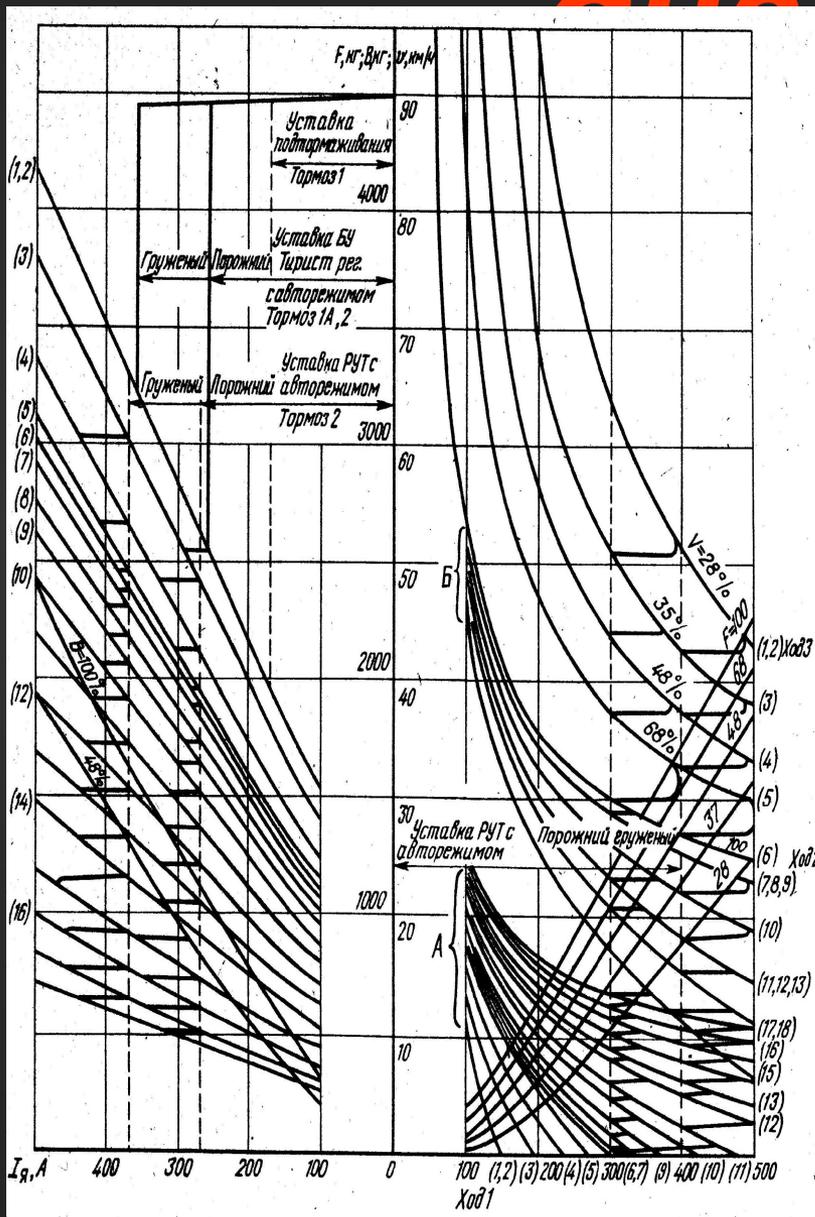
- ◆ Сколько вагонов необходимо затормозить ручным тормозом, чтобы удержать состав из 8 гружёных вагонов типа Еж-3 на уклоне 20‰ ?
- ◆  $W_i = 20$  Кгс/Тс (на вагон)
- ◆  $W_o = 2$  Кгс/Тс
- ◆  $P = 32,5т + 20Кгс/Тс = 52,5$  Тс для 1 вагона или 420 Тс для 8 вагонов
- ◆  $W_i = (W_i - W_o) \cdot P = (20 - 2) \cdot 420 = 7560$  Кгс

*Учитывая, что сила для удержания 1 вагона составляет 8000 Кгс, следовательно, в данном случае достаточно затянуть ручной тормоз одного вагона.*

# Расчет тормозной силы стояночного тормоза

- ◆  $В_{ст.т} = n \cdot \varphi \cdot P_{пр} \cdot \eta$  где:
- ◆  $n$  – передаточное число стояночного тормоза = 6,56
- ◆  $\varphi$  – сила нажатия пружины стояночного тормоза = 1000 Кгс
- ◆  $P_{пр}$  – сила (давление) прижатия колодки = 0,5
- ◆  $\eta$  – КПД стояночного тормоза = 0,8
- ◆  $В_{ст.т} = 6,56 \cdot 1000 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 2624$  Кгс (на 1 блок – тормоз); для вагона  $2624 \cdot 2 = 5248$  Кгс

# Пуско - тормозная диаграмма



- Пусковая диаграмма показывает изменения скорости и силы тяги в зависимости от силы тока, а тормозная - зависимость тормозной силы от силы тока для одного двигателя.
- Скоростные характеристики строятся по числу позиций РК для последовательного соединения групп тяговых двигателей, параллельного и режима ослабления поля.
- Скоростные характеристики подразделяются на реостатные и ходовые (безреостатные, с полностью выведенными сопротивлениями). Они представлены в виде пилообразной кривой.
- Кроме этого в диаграмме слева - направо отображаются и тяговые характеристики зависимости силы тяги от силы тока. Они расположены одна под другой. Самая верхняя характеристика соответствует 100% полю, а нижняя - 28%.

**Пример:** по заданной скорости движения определим позицию РК, силу тока и силу тяги (см. рис.).

1. На оси ординат (вертикаль) находим заданное значение скорости.
2. От этой точки проводим горизонтальную прямую до пересечения со скоростной характеристикой пилообразной кривой и находим номер позиции РК.
3. От этой точки опускаем вертикальную прямую до оси абсцисс и определяем силу тока.
4. От этой точки проводим вверх вертикальную прямую до пересечения с тяговой характеристикой соответствующего поля.
5. От точки пересечения этих линий проводим горизонтальную прямую влево и узнаём силу тяги.

6.

# Испытания подвижного состава



*Скоростной поезд «Сапсан»*



- ◆ *Тяговые испытания прежде всего проходят опытные образцы новых серий локомотивов, чтобы уже по результатам оценки параметров этих образцов можно было дать право на запуск серийного производства.*

*Также испытаниям подвергаются и модернизированные локомотивы, у которых была изменена масса и скорость движения.*

*Испытания как правило проводятся после заводской наладки и установленного пробега, также могут быть частью приёмочных испытаний.*

- ◆ Помимо собственно тяговых испытаний, локомотивы также проходят и тягово-теплотехнические (тепловозы, газотурбовозы) или тягово-энергетические (электровозы) испытания. В ходе них на различных скоростях определяются следующие параметры: СИЛА ТЯГИ Помимо собственно тяговых испытаний, локомотивы также проходят и тягово-теплотехнические (тепловозы, газотурбовозы) или тягово-энергетические (электровозы) испытания. В ходе них на различных скоростях определяются следующие параметры: сила тяги, её ограничения, сопротивление движению локомотива как повозки, касательная МОЩНОСТЬ Помимо собственно тяговых испытаний, локомотивы также проходят и тягово-теплотехнические (тепловозы, газотурбовозы) или тягово-энергетические (электровозы) испытания. В ходе них на различных скоростях определяются следующие параметры: сила тяги, её ограничения, сопротивление движению локомотива как повозки, касательная мощность, при наличии ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ проверяют его эффективность.
- ◆ Для тепловозов также определяют общий КПД на разных скоростях при различных режимах работы тяговой передачи и отбор мощности дизеля на служебные нужды, расход топлива дизелем и эффективность работы системы охлаждения, экономичность тяговой передачи.

7.

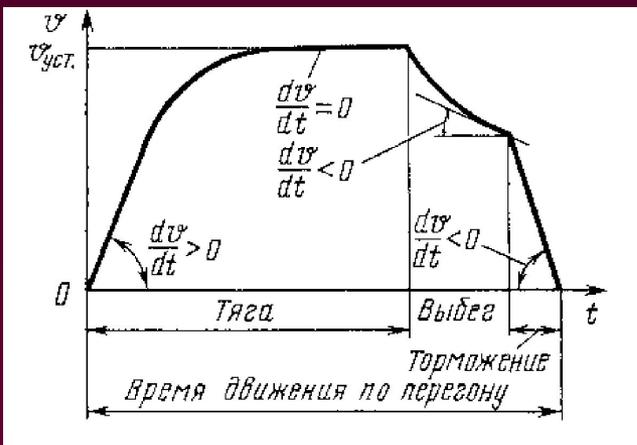
**Техника  
вождения  
поездов.**





*Французский скоростной поезд TGV - А*

# Кривая движения поезда.



**В нормальных условиях эксплуатации возможны три режима ведения поезда: тяга, выбег и торможение.**

**В режиме тяги торможение не применяют, поэтому  $B(v)=b(v)=0$ , при тяге, когда  $f(v)>w(v)$  поезд движется ускоренно, если в режиме тяги  $f(v)=w(v)$ , то поезд движется с установившейся скоростью. При  $f(v)<w(v)$  поезд движется замедленно.**

**В режиме выбега режим движения поезда определяется силой сопротивления его движению на выбеге. Однако при следовании на выбеге на крутых спусках составляющая веса поезда может превышать силу сопротивления движению. Разность этих сил направлена по движению поезда, поэтому поезд ускоряет свое движение.**

**Каждый из возможных режимов ведения поездов рассчитывают исходя из поставленных технических требований.**

**В момент пуска тягового двигателя, когда его противо - ЭДС равна нулю, к нему нельзя подводить номинальное напряжение. Если представить, что к неподвижному двигателю, сопротивление которого весьма мало, подвести номинальное напряжение, то через двигатель начнет протекать ток, величина которого в сотни раз превысит максимально допустимый. В результате электродинамические силы либо вырвут обмотку якоря из пазов, либо приведут к образованию кругового огня по коллектору из-за недопустимой плотности тока под щетками и искажения магнитного потока между полюсами. И то и другое приведет к выходу из строя тяговых двигателей.**

**По условиям плавного пуска и отсутствие ударов в составе пусковое ускорение поездов метрополитена не должно превышать  $1,0 - 1,2$  м/с<sup>2</sup>. По мере разгона поезда, исходя из графика, его ускорение уменьшается. Это происходит с одной стороны, из-за снижения тока, а следовательно и вращающего момента тяговых двигателей, а с другой стороны – из-за увеличения сопротивления движению поезда.**

**Установившаяся скорость движения поезда, когда  $f(v)=w(v)$ , зависит от ряда факторов: мощности двигателей, массы поезда, профиля пути и организации движения поездов. Режим постоянства скорости является с точки зрения использования оборудования системы электроснабжения предпочтительным, т. к. обеспечивается постоянство ее нагрузок, однако такой режим не соблюдается в реальных условиях движения поездов, из-за чего увеличивается расход электроэнергии в системе электроснабжения, и следовательно общий расход электроэнергии на движение поездов.**

- ◆ *В режиме выбега движение поезда осуществляется за счет накопленной им кинетической энергии, а на спусках – и потенциальной, расходуемой по мере движения на преодоление сопротивления движению, включая потери на трение в механическом оборудовании вагона, которые в режиме тяги покрываются энергией, забираемой им через контактную сеть от тяговой подстанции.*
- ◆ *Последующее за выбегом повторное подключение тяговых двигателей на ходу поезда, опасности не представляет, в обмотке якоря наведена ЭДС, пропорциональная частоте его вращения, уравновешивающее приложенное к нему напряжение и ограничивающая его ток.*
- ◆ *В режиме торможения с помощью механических колодочных, электрического реостатного или рекуперативного тормозов, осуществляется замедление поезда и, в требуемых случаях – его остановка. Интенсивность торможения устанавливает машинист, т.к. тормозная сила является регулируемой – при механическом торможении в зависимости от наполнения воздухом тормозных цилиндров, при электрическом – в зависимости от тока возбуждения и тока якоря тягового двигателя, работающего в генераторном режиме.*
- ◆ *Предельные режимы торможения устанавливаются исходя принципиально из требований, аналогичных предъявляемым к режиму пуска.*

# Способы изменения частоты вращения вала тягового двигателя.

(расчёты даны для 81-717.5м).

## **ХОД-1.**

Если подключить 4 последовательно соединённых двигателя непосредственно к контактному рельсу, то, учитывая суммарное сопротивление всех обмоток двигателей, в момент их пуска по СЦ прошёл бы ток :

$$I = 825В : 0,28 Ом$$

$$I = 2950 А$$

Это привело бы к выходу из строя электрического и механического оборудования (редуктор, карданная муфта). Чтобы избежать аварийного режима при пуске, в СЦ дополнительно вводят ПТР (пуско-тормозные резисторы) 4,176 Ом, поэтому сила тока в СЦ при полностью введённых сопротивлениях

будет равна :

$$I = 825В : (0,28 Ом + 4,176 Ом)$$

$$I = 190 А$$

Итак, все 4 двигателя соединены последовательно, РК находится на 1 позиции, замкнуты его кулачки РК3 и РК4. Это означает, что в СЦ введены все пуско-тормозные сопротивления. Включены КШ1 и КШ2 (замкнуты РК25 и РК26), поле тяговых электродвигателей ослаблено до 28%, а сила тяги составляет 440 кгс на вагон.

•Ослабление поля обмоток возбуждения на Ход-1 обеспечивает более плавный пуск !

•Для предотвращения перегрева пуско-тормозных резисторов (ПТР) запрещается следовать в режиме Ход-1 (маневровый режим) более 5 минут непрерывно !

**Для дальнейшего увеличения скорости машинист переводит главную рукоятку КВ в положение Ход-2.**

## ХОД-2.

При постановке главной рукоятки КВ в положение Ход-2 начинает вращаться СДРК. После ухода РК с первой позиции отключаются КШ1 и КШ2. Магнитное поле тяговых электродвигателей возрастает до 100% и сила тяги также увеличивается почти в 4 раза (до 1600 кгс на вагон), а это, в свою очередь, приводит к увеличению силы тяги и скорости. Когда якоря двигателей начинают вращаться, то в них наводится электродвижущая сила, - ЭДС. Она направлена всегда противоположно приложенному к якорю напряжению, поэтому её называют противо-ЭДС, её направление определяется по Правилу правой руки (см. материалы по электротехнике).

**Запомните: чем больше скорость вращения якоря, тем больше величина противо-ЭДС !**

Следовательно, сила тока (при вращении якоря) с учётом противо-ЭДС будет определяться по формуле, где:

$$I = \frac{U - E}{R + 4r}$$

*I* - сила тока

*U* - напряжение

*- E* - противо-ЭДС

*R* - сопротивление пуско-тормозных резисторов

*4r* - внутреннее сопротивление 4х двигателей.

Из формулы видно, что чем больше скорость вращения якорей (т.е. противо-ЭДС), тем меньше будет сила тока в силовой цепи, следовательно, будут падать сила тяги и ускорение. Следовательно, в какой-то момент увеличение скорости прекратится, поэтому для обеспечения постоянства силы тяги (а значит и силы тока) необходимо ступенчато уменьшать сопротивление в силовой цепи.

Для этого РК последовательно замыкает свои кулачки и тем самым, начиная с 3 по 15 позиции, ступенчато уменьшает сопротивление пуско-тормозных резисторов в силовой цепи (1 и 2 позиции сдвоены). Это приводит к увеличению силы тока и, следовательно, к увеличению силы тяги и скорости движения. На 15 позиции все пуско-тормозные сопротивления выведены. Позиции 16, 17 и 18 являются строеными, т.е. никаких изменений в силовой цепи на этих позициях не происходит (на вагонах 81-717.5м РК останавливается на 17 позиции !).

На 17 позиции замкнуты кулачки РК13 и РК19 в первой группе, и РК14 во второй группе двигателей. Сопротивление пуско-тормозных резисторов равно 0, скорость поезда 10-12 км/ч.

Для дальнейшего увеличения скорости группы двигателей переключаются с последовательного соединения на параллельное. При этом сразу в 2 раза увеличивается напряжение на каждом двигателе. Чтобы предотвратить сильный толчок после перехода на параллельное соединение групп двигателей, в СЦ вновь вводится сопротивление по 0,909 Ом в каждую группу двигателей. Так как РК в момент перехода с ПС на ПП не работал, то очевидно, что сопротивление ввелось в результате действия переключателя положений (сначала замкнулись ПП2 и ПП3, затем разомкнулся ЛК2). Так как после перехода на параллельное соединение все параметры силовой цепи изменились, то 17-я позиция РК последовательного соединения теперь соответствует 20 позиции РК параллельного соединения групп двигателей.

Далее опять начинает вращаться СДРК, но уже в обратном направлении. При этом последовательное замыкание кулачков РК снова приводит к уменьшению сопротивления в силовой цепи и увеличению силы тяги. На 32 позиции РК останавливается. Замкнуты его кулачки РК3 и РК4, то есть, сопротивление пуско-тормозных резисторов будет равно 0. Скорость поезда к моменту выхода на 32 позицию РК составляет примерно 25 км/ч.

Для дальнейшего увеличения скорости машинист переводит главную рукоятку КВ в положение Ход-3.

### ХОД-3.

При переводе ГРКВ в Ход-3 сразу включаются контакторы шунтировки КШ1 и КШ2 и параллельно обмоткам возбуждения двигателей (ОВ ТЭД) подключается цепь, состоящая из индуктивного шунта (ИШ) и реостата ослабления поля (ОП). Так как на 32 позиции РК в силовой цепи разомкнуты кулачки РК21-23-25 и РК22-24-26 в 1 и 2 группах двигателей соответственно, то в эту цепь полностью вводятся резисторы ослабления поля. С точки зрения электротехники это означает, что общее сопротивление в силовой цепи каждой группы двигателей уменьшается, так как общее сопротивление для двух параллельных цепей определяется по формуле:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Таким образом, введя сопротивление параллельно ОВ ТЭД, можно уменьшить общее сопротивление, а значит, повысить силу тока в якорях, то есть, увеличить силу тяги, а это, в свою очередь, приведёт к увеличению скорости движения поезда. Так как при постановке главной рукоятки КВ в Ход-3 вновь начинает вращаться СДРК, то на каждой следующей позиции последовательно замыкаются кулачки РК21-РК23-РК25 в первой группе двигателей и одновременно РК22-РК24-РК26 во второй группе двигателей. Иными словами, РК опять выводит (уменьшает) сопротивление в каждой группе двигателей, что приводит к дальнейшему увеличению скорости. На практике режим «ослабления поля» занимает около 75% всего времени разгона двигателей от 0 до 80 км/ч. Магнитное поле обмоток возбуждения тяговых электродвигателей по отношению к магнитному полю якоря изменяется следующим образом:

32 позиция - 70%,    33 позиция - 50%,    34 позиция - 37%,    35 и 36 позиции (сдвоены) - 28%

Таким образом, увеличение скорости вращения якорей ТЭД происходит за счёт увеличения силы тока в якорях, при этом магнитный поток обмоток возбуждения остаётся практически неизменным (он незначительно увеличивается за счёт того, что часть противо-ЭДС, наводимой в обмотках возбуждения (в главных полюсах), гасится в резисторах ослабления магнитного поля).

# Ослабление потока возбуждения двигателя.

Число оборотов двигателя постоянного тока равно:

$$\omega = \frac{U - IR}{C\Phi}$$

поэтому при уменьшении  $\Phi$  число оборотов растёт. Так как на электротранспорте возбуждение двигателей чаще всего последовательное, то для ослабления потока параллельно обмотке возбуждения подключаются резисторы или иные **шунтирующие** устройства — часть тока проходит по ним в обход обмотки возбуждения,  $\Phi$  снижается, противоЭДС якоря падает, якорный ток и частота вращения растут. Из-за ухудшения коммутации (повышения искрения) на коллекторе при работе на ослабленном возбуждении, особенно на переходных режимах, этот способ регулирования используется только тогда, когда диапазон других методов регулирования уже закончился — реостат выведен, а для перехода на следующее соединение слишком мала скорость либо соединение последнее.

Процент тока, проходящего по обмотке возбуждения, называется коэффициентом возбуждения:

если 36 % тока проходит по обмотке, а 64 % по шунтам, то это называется ослаблением возбуждения до 36 %.

На электровагонах метрополитена типа Е На электровагонах метрополитена типа Е, электропоездах ЭР2 На электровагонах метрополитена типа Е, электропоездах ЭР2, электровозах ослабление возбуждения (ОВ; старый термин — ослабление поля - ОП) используется на всех соединениях. На электровагонах 81-717/714 На электровагонах метрополитена типа Е, электропоездах ЭР2, электровозах ослабление возбуждения (ОВ; старый термин — ослабление поля - ОП) используется на всех соединениях. На электровагонах 81-717/714 ослабление используется лишь на параллельном соединении, аналогично на электропоездах переменного тока ЭР9 На электровагонах метрополитена типа Е, электропоездах ЭР2, электровозах ослабление возбуждения (ОВ; старый термин — ослабление поля - ОП) используется на всех соединениях. На электровагонах 81-717/714 ослабление используется лишь на параллельном соединении, аналогично на электропоездах переменного тока ЭР9 — только на согласном включении обмоток трансформатора На электровагонах метрополитена типа Е, электропоездах ЭР2, электровозах ослабление возбуждения (ОВ; старый термин — ослабление поля - ОП) используется на всех соединениях. На электровагонах 81-717/714 ослабление используется лишь на параллельном соединении, аналогично на электропоездах переменного тока ЭР9 — только на согласном включении обмоток трансформатора. В свою очередь, на электровозах ВЛ10 На электровагонах

- ◆ На электроподвижном составе постоянного тока для двигателей последовательного возбуждения изменение м.д.с. осуществляется в основном шунтированием обмотки возбуждения резистором (рис. 7.10). При шунтировании обмотки возбуждения, степень уменьшения тока возбуждения зависит от соотношения сопротивления  $r_B$  обмотки возбуждения двигателя и сопротивления  $R_{ш}$  шунта.
- ◆ Используя несколько шунтирующих цепей с разными сопротивлениями, или резистор  $R_{ш}$  с регулируемым сопротивлением, получают несколько ступеней регулирования скорости.
- ◆ Так называемое усиление возбуждения применяют на моторных вагонах для увеличения пусковой силы тяги, а следовательно – ускорения.
- ◆ В этом случае тяговые двигатели рассчитывают на нормальный режим не при максимальном, а при меньшем токе возбуждения, т.е. при шунтированной обмотке возбуждения.

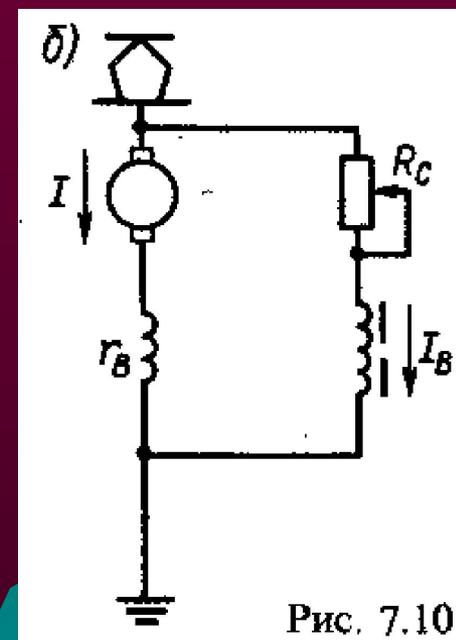
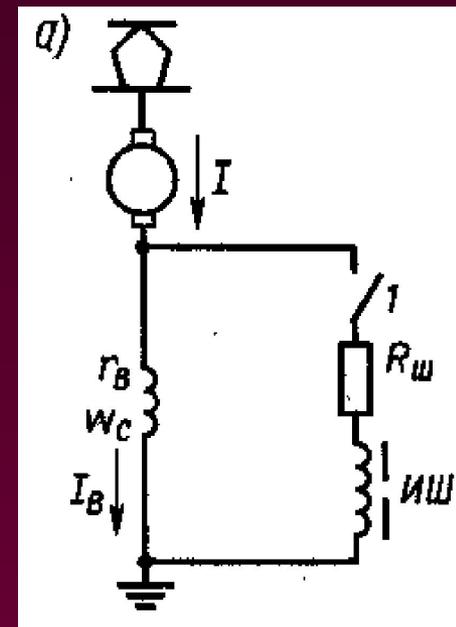


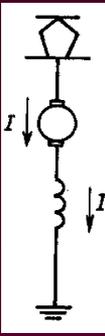
Рис. 7.10

# Электромеханические характеристики тяговых двигателей

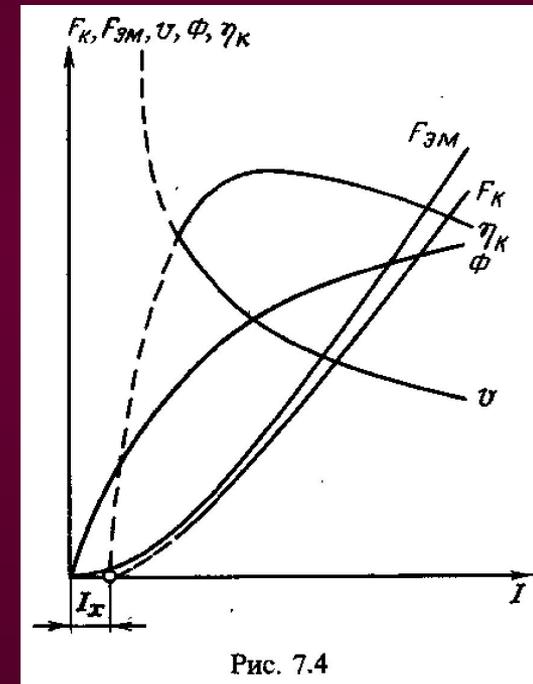
- ◆ В процессе работы каждого тягового двигателя происходит взаимное однозначное изменение его параметров – напряжения, э.д.с. и тока. Соотношения его параметров, представленные в табличной или графической форме, служат **характеристиками тягового двигателя**.
  - ◆ В электрической тяге используются три основные зависимости, рассчитанные при проектировании и отнесенные к валу тягового двигателя:
    - $n(I)$  – частоты вращения якоря от его тока, при заданном напряжении питания тягового двигателя;
    - $M(I)$  – вращающего момента тягового двигателя от тока якоря тягового двигателя, с учетом к.п.д. тягового двигателя;
    - $\eta(I)$  – к.п.д. тягового двигателя от тока якоря.
- Эти три характеристики тягового двигателя называют **электромеханическими**, их проверяют после расчета при испытаниях на стенде завода – изготовителя.

# К.П.Д.

## тяговых двигателей последовательного возбуждения.



♦ Характеристика  $\eta(I)$  (к.п.д.) тягового двигателя последовательного возбуждения имеет форму, обычную для машин постоянного тока. При малых нагрузках к.п.д. резко снижается (см. рис. 7.4) из-за больших механических потерь. При токе  $I_x$  приведенная к двигателям мощность затрачивалась бы в основном на преодоление механических потерь и к.п.д. был бы равен нулю. По мере нарастания нагрузки к.п.д. резко увеличивается вследствие снижения значений механических потерь. В области нагрузок двигателя, близких к номинальным к.п.д. достигает максимума, а затем – снова уменьшается, поскольку увеличиваются электрические потери, пропорциональные  $I^2$ . При нагрузке, намного превышающей максимально допустимую, падение напряжения могло бы стать равным приведенному напряжению  $U$  и скорость  $V=(U-rI)/c\Phi$ , а следовательно – мощность и к.п.д. упали бы до нуля. Этот предельный режим соответствует короткому замыканию двигателя, при котором вся подведенная мощность  $UI$  расходуется на электрические потери  $rI^2$ .



# Рациональный режим ведения поезда.

*Знать основы теории тяги;*

*Знать особенности своей линии, расположение сигнальных знаков и их значение;*

*Знать план и профиль своей линии;*

*Следить за исправным состоянием подвижного состава;*

*Избегать применения экстренного, полного служебного, автоматического электрического торможения при: ведении первых поездов, неблагоприятных погодных условиях на открытых участках;*

*При следовании при неблагоприятных погодных условиях на открытых и приравненных к ним участках, а так же за дефектоскопом - применять ручной пуск и ручное (байпасное) торможение;*

*Избегать неоправданных повторных подключений;*

*При отправлении со станции применять автоматический пуск тяговых двигателей;*

*Не допускать задержки отправления со станции при разрешающем показании светофора, при самообороте, соблюдать графический интервал между поездами;*

*Осуществлять включение и отключение тяговых двигателей согласно установленного режима вождения поездов;*

*При наличии запаса времени – расходовать его равномерно на всех станциях;*



*Ретропоезд на станции «Воробьевы горы»*