НГТУ НЭТИ

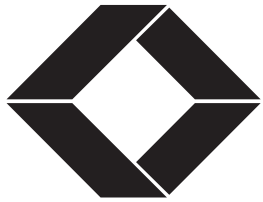
ОПОРНЫЙ ВУЗ

В. В. БИРЮКОВ
Н. И. ЩУРОВ
А. А. ШТАНГ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ



СЕРИЯ УЧЕБНИКИ НГТУ



УЧЕБНИКИ
НГТУ

Серия основана в 2001 году

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
СЕРИИ «УЧЕБНИКИ НГТУ»

д-р техн. наук, проф. (председатель) *А. А. Батаев*
канд. техн. наук, доц. (зам. председателя) *В. В. Янпольский*

д-р техн. наук, проф. *С. В. Брованов*
д-р техн. наук, проф. *А. Г. Вострецов*
д-р техн. наук, проф. *А. А. Воевода*
д-р физ.-мат. наук, проф. *В. Г. Дубровский*
д-р филос. наук, проф. *В. И. Игнатьев*
д-р техн. наук, проф. *Н. В. Пустовой*
д-р филос. наук, проф. *М. В. Ромм*
д-р техн. наук, проф. *Ю. Г. Соловейчик*
д-р физ.-мат. наук, проф. *В. А. Селезнев*
д-р техн. наук, проф. *А. А. Спектор*
д-р техн. наук, доц. *В. С. Тимофеев*
д-р техн. наук, проф. *А. Г. Фишов*
д-р экон. наук, проф. *М. В. Хайруллина*
канд. экон. наук, доц. *С. С. Чернов*
д-р техн. наук, проф. *А. Ф. Шевченко*
д-р техн. наук, проф. *Н. И. Щуров*

В. В. БИРЮКОВ,
Н. И. ЩУРОВ, А. А. ШТАНГ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ



НОВОСИБИРСК
2022

УДК 621.33(075.8)
Б 649

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *В. Н. Аносов*
д-р техн. наук, профессор *Д. Л. Калужский*
д-р техн. наук, доцент *О. В. Нос*

Бирюков В. В.
Б 649 Основы электрической тяги : учебник / В. В. Бирюков, Н. И. Щуров, А. А. Штанг. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. – 332 с. – (Учебники НГТУ).

ISBN 978-5-7782-4760-4

Рассматриваются процессы реализации сил тяги и торможения на подвижном составе, оснащённом электрическим приводом с электродвигателями постоянного и переменного тока.

Учебник предназначен для студентов бакалаврского цикла обучения по направлению подготовки «Энергетика и электротехника» и может представлять интерес для магистрантов, аспирантов и научных работников для систематизации знаний в области использования электроэнергии на транспорте.

УДК 621.33(075.8)

DOI 10.17212/978-5-7782-4760-4
ISBN 978-5-7782-4760-4

© Бирюков В. В., Щуров Н. И., Штанг А. А., 2022
© Новосибирский государственный технический университет, 2022

ВВЕДЕНИЕ

Вплоть до начала XIX века для приведения в движение транспортных средств использовались конная тяга и паросиловые установки. Успехи, достигнутые в области электротехники в начале XIX столетия, привели к тому, что появился конкурент паросиловым установкам – электрическая машина.

Так, в 1828 г. венгр Йедлик Аньош изобрёл ранний тип электрического мотора и создал миниатюрную модель автомобиля, приводимого в движение при помощи нового двигателя (рис. В1). Конечно, настоящую машину такой мотор передвигать бы не мог, но это был первый шаг к использованию электрического привода.

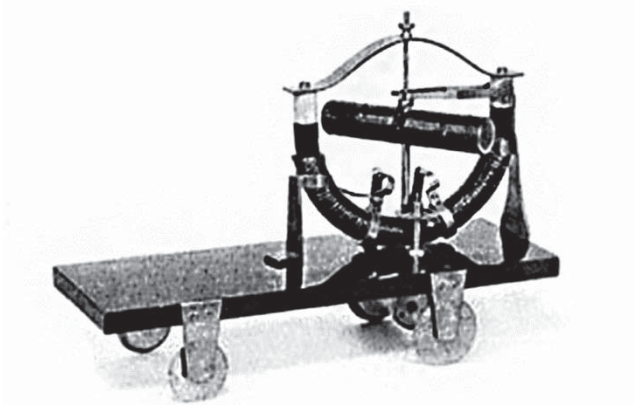


Рис. В1

В 1834 г. изобретатель первого электрического мотора постоянного тока Томас Дэвенпорт, кузнец из штата Вермонт, установил свой мотор в маленькую модель машины, которой он управлял на кольцевом электрифицированном треке. В 1835 г. голландский профессор Сибрандус Стрэтин из города Гронингена и его помощник Кристофер

Беккер создали небольшую электрическую машину, приводимую в движение неперезаряжаемыми первичными гальваническими элементами. В 1838 г. шотландец Роберт Дэвидсон разработал электрический локомотив, который достигал скорости 6 км/ч (4 мили в час).

Приблизительно в период между 1832 и 1839 гг. (точный год неизвестен) гражданин Шотландии Роберт Андерсон изобрёл первую грубую электрическую карету, приводимую в движение неперезаряжаемыми первичными гальваническими элементами.

Все эти разработки стали предвестниками появления нового вида тяги – электрической.

В 80-х гг. XIX века Ральф Уорд запустил в Лондоне линию движения электрических омнибусов (предтеча современных автобусов). Первый электрический автобус двигался со скоростью около 11 км/ч. В 1901 г. производство электрических самоходных омнибусов началось в Москве.

Однако в России и Америке вплоть до конца XIX века об электромобилях упоминалось лишь в публикациях журналистов. Только в 1898 г. Ипполит Романов, русский инженер-изобретатель, представил на обозрение свой двухместный электромобиль, который мог ехать со скоростью до 37,4 км/ч. В 1899 г. им были разработаны четырёхместный электромобиль и омнибусы, рассчитанные на 17 и 24 пассажира (рис. В2).



Рис. В2

Дальнейшее развитие электротехники привело к появлению новых видов электрических машин, которые развивали бóльшую мощность и могли использоваться на транспортных средствах большей грузоподъёмности.

В 1880 г. Ф. А. Пироцкий осуществил пуск электрического трамвая в Санкт-Петербурге по линии конной железной дороги. В качестве трамвайного вагона использовали железнодорожный вагон, к раме которого был подвешен электродвигатель, вращавший ведущие колеса через зубчатую передачу.

В 1882 г. в Германии на пригородной линии Берлин – Шпандау появился первый опытный образец безрельсового экипажа с электрическим двигателем, получающим питание от контактных проводов, – прообраз троллейбуса. Долгое время троллейбус не имел широкого распространения, что было связано главным образом с недостатками токосъёма посредством каретки, которую позднее заменили на роликовый штанговый токоприёмник. Развитие троллейбусов началось в Англии и Чехословакии после изобретения троллейбусных токосъёмных штанг с роликовым, а позднее со скользящим контактом, обеспечившим более высокую надёжность токосъёма при достаточно высоких скоростях движения.

С 1883 г. линия трамвая длиной 9,6 км действовала в Портуме (Ирландия). В 1884 г. было открыто движение электрических трамваев в Англии и Германии. Первый электрический трамвай в Российской империи был пущен в Киеве в 1892 г., затем в 1894 г. – в Казани, в 1896 г. – в Нижнем Новгороде, в 1897 г. – в Екатеринославле и Курске, в 1898 г. – в Орле и Севастополе, в 1899 г. – в Москве и других городах.

Следует упомянуть также о таком «экзотическом» виде транспорта с электроприводом, как монорельсовый. Впервые он был использован для перевозок пассажиров ещё в 1901 г. в городе Вуппертале и эксплуатируется по настоящее время.

Появление электрической тяги коренным образом расширило перспективы развития метрополитенов. Перевод их с паровой тяги на электрическую значительно улучшил санитарное состояние станций и тоннелей, позволил повысить скорость движения поездов и увеличить глубину заложения тоннелей, так как электрическая тяга исключает необходимость усиленной вентиляции. В свою очередь, глубокое заложение тоннелей обеспечило возможность наиболее удобной трассировки линий метрополитенов независимо от уличной сети. Первый отечественный метрополитен был открыт в Москве в 1935 г.

Таким образом, можно считать, что зарождение периода электрической тяги относится к концу XIX в. На электрическую тягу начали переводить трамваи и метрополитены, появились первые троллейбусы и электропоезда.

В настоящее время электрический привод используется и на таких транспортных средствах, как канатные дороги, фуникулёры, эскалаторы, движущиеся тротуары и др.

Для перевозки пассажиров на внутригородских и междугородных линиях используются такие виды транспорта на электрической тяге, как электромобили, электробусы, дуобусы и т. д. Наращивание мощности двигателей требовало повышения уровня питающего их напряжения. Централизованная система электроснабжения рельсового транспорта на первых этапах развития электрической тяги обеспечивала питание двигателей посредством рельсов, один из которых присоединялся к плюсовому выводу источника, а второй – к минусовому. Требование соблюдения электробезопасности в условиях повышения питающего напряжения привело к необходимости отказа от такого способа питания и поднятия плюсового питающего провода над поверхностью земли. Так появился ещё один элемент системы централизованного электроснабжения – контактная сеть. На рис. В3 показан вариант системы централизованного электроснабжения железнодорожного транспорта от угольной теплоэлектростанции.

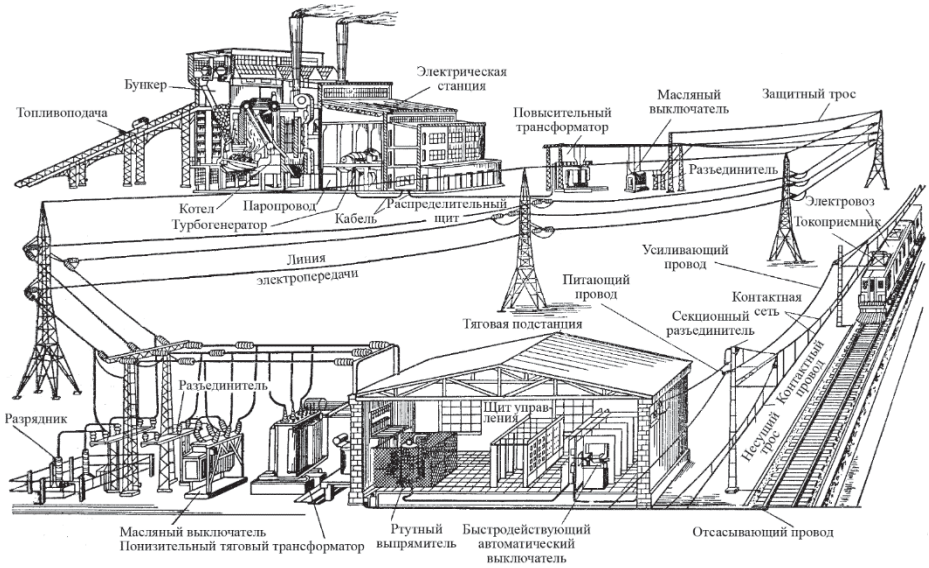


Рис. В3

На протяжении всей истории развития транспорта с тягой на постоянном токе наблюдается тенденция к неуклонному повышению напряжения на электрифицированных линиях со 120…220 до 600 В, а затем на железной дороге до 1,5 кВ и позже – до 3 кВ. Кроме того, был построен участок железной дороги с напряжением 6 кВ.

В настоящее время большинство железных дорог России на постоянном токе использует напряжение 3000 В.

Появление переменного тока привело к использованию его для нужд электрической тяги. В качестве примера реализации привода на однофазном переменном токе промышленной частоты можно привести железные дороги России, запитанные от источника напряжением 25 кВ, а также железные дороги Италии, питающиеся напряжением 15 кВ с частотой $16^2/_3$ Гц.

Наличие двух источников питания, работающих на постоянном и переменном токе, и большое разнообразие электрических машин привело к появлению различных сочетаний этих элементов в тяговых приводах подвижного состава. Электроснабжение на постоянном токе позволяет на современном уровне развития электротехники использовать для нужд тяги электрические машины как постоянного, так и переменного тока. Электроснабжение на переменном токе может обеспечивать электроэнергией тяговые двигатели как переменного, так и постоянного тока. Каждый вариант исполнения сочетания «источник питания – тяговый двигатель» обладает своими достоинствами и недостатками, которые в конечном итоге и определяют рациональность его применения на конкретном подвижном составе.

Обоснование целесообразности применения на железнодорожном транспорте в нашей стране постоянного тока высокого напряжения со статическими преобразователями было сделано ещё в 30-х гг. XX столетия Н. Н. Сидоровым и М. М. Ситниковым. Начатые в этом направлении исследования не привели к практическим результатам из-за несовершенства существовавших в то время вентилей.

Появление в конце 1950-х гг. тиратронов дало импульс разработке статических преобразователей постоянного тока на транспорте. В 1957–1959 гг. на кафедре электрического транспорта Московского энергетического института (МЭИ, в настоящее время – НИУ МЭИ) был разработан и испытан преобразователь мощностью 240 кВт, а затем мощностью 1440 кВт, ставший основой для переоборудования электровозов ВЛ8 и ВЛ10 на напряжение 6 кВ.

Однако существенный прорыв в области создания преобразователей начался с появлением управляемых сильноточных полупроводниковых приборов – тиристоров. Так, в 1965 г. Тбилисским

электровозостроительным заводом совместно с НИУ МЭИ был разработан и в 1966 г. внедрён преобразователь для двухсекционного электровоза ВЛ8^{в} на напряжение 3000 и 6000 В. В 1968 г. Рижским вагоностроительным заводом совместно с Прибалтийской железной дорогой и Рижским филиалом Всесоюзного научно-исследовательского института вагоностроения был создан тиристорный преобразователь для контактно-аккумуляторного моторного вагона.

С начала 1970-х гг. в нашей стране стали разрабатываться преобразователи для подвижного состава трамвая, троллейбуса и метрополитена. Наибольших успехов в этом направлении добилась научная школа доктора технических наук, профессора И. С. Ефремова, в которую входили Г. В. Косарев, О. А. Коськин, Н. Е. Ершов, В. И. Стратий, В. К. Пуриков, Н. И. Щуров, В. А. Глушенков и др.

Значительный вклад в развитие теории преобразовательной техники на магистральном транспорте и её популяризацию внёс коллектив научной школы доктора технических наук, профессора В. Е. Розенфельда, которую представляли Г. П. Долаберидзе, В. В. Шевченко, Ш. Э. Циклаури, И. М. Хевсуриани и др.

Работы в области систем «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» связаны с именами отечественных учёных И. Я. Браславского, Л. П. Петрова, Т. А. Глазенко, В. И. Хрисанова, В. И. Капинос и др.

Исследованию систем собственных нужд отечественных электровозов переменного тока посвящены труды О. А. Некрасова, Р. И. Мирошниченко, Н. Н. Горина, В. И. Бочарова, В. И. Рахманинова, Н. А. Ротанова, И. В. Скогорева, В. Н. Ляпустина, А. М. Рутштейна и других учёных.

Теоретический и практический материал, наработанный на начальном этапе развития теории электрической тяги на транспорте, а также практическая реализация основных положений теории и схемотехнических решений вплоть до настоящего времени послужили основой для написания этого учебника.

Структурно учебник состоит из пяти разделов, в четырёх из которых излагаются основные положения теории, а в пятом приводятся примеры решения задач.

Авторы выражают благодарность рецензентам – докторам технических наук, профессорам В. Н. Аносову и Д. Л. Калужскому и доктору технических наук, доценту О. В. Носу за ценные советы и пожелания, которые были учтены при подготовке окончательного варианта книги.

1. ТЕОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

1.1. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Любое транспортное средство, будь то однокузовной подвижной состав или поезд, состоящий из нескольких вагонов, представляет собой сложную систему, при движении которой различные её элементы совершают поступательное и вращательное движение [1, 2]. Связь элементов между собой может осуществляться посредством как упругих, так жёстких связей, ограничивающих их перемещения относительно друг друга [3, 4]. Каждый элемент обладает присущими физическим телам массой и моментом инерции. Как известно, любое перемещение физического тела в пространстве характеризуется таким показателем, как накопленная им кинетическая энергия, которая в соответствии с теоремой Кёнига определяется выражением

$$A_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2} + \sum_{i=1}^{n} J_i \frac{\omega_i^2}{2},$$

где m – сумма масс элементов, входящих в систему; v – скорость транспортного средства; n – количество элементов системы, совершающих вращательное движение; J_i – момент инерции i-го элемента системы; ω_i – угловая скорость вращения i-го элемента системы.

Применительно к транспортному средству, помимо поступательного движения, вращательное совершают все элементы тягового привода, начиная от вала якоря (ротора) электрической машины и заканчивая колесом [5, 6]. При этом в зависимости от схемы привода часть его элементов вращается с угловой скоростью вращения вала двигателя, часть – со скоростью вращения колеса, остальные (элементы редуктора) – с некоторыми промежуточными угловыми скоростями.

Поскольку для описания движения системы элементов необходимо составлять уравнения для каждой массы, то математическая модель подвижного состава получается довольно сложной. Для упрощения модели суммарную энергию вращательного движения элементов приводят к энергии поступательного движения со скоростью подвижного состава (v) некоторой эквивалентной массы ($m_{\text{экв}}$), т. е.

$$\frac{m_{\text{экв}}v^2}{2} = \sum_{i=1}^{n} J_i \frac{\omega_i^2}{2}.$$

Тогда кинетическая энергия поступательного движения транспортного средства будет определяться как

$$A_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{m_{\text{экв}}v^2}{2} = \frac{mv^2}{2}\left(1 + \frac{m_{\text{экв}}}{m}\right) = (1+\gamma)\frac{mv^2}{2},$$

где γ – коэффициент инерции вращающихся масс; $(1+\gamma)m = m_{\text{ПС}}$ – приведённая масса подвижного состава.

Коэффициенты инерции некоторых типов подвижного состава приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Тип подвижного состава	γ
Электровозы	0,20…0,40
Моторные вагоны пригородных поездов	0,08…0,12
Пассажирские вагоны и прицепные электропоездов	0,04…0,05
Грузовые четырёх- и шестиосные вагоны:	
порожние	0,08…0,09
гружёные	0,03…0,04
Грузовые двухосные вагоны:	
порожние	0,10…0,12
гружёные	0,04…0,06
Трамвайные вагоны	
моторные	0,09…0,15
прицепные	0,05…0,08
Троллейбусы	0,15…0,20

Основными режимами движения транспортного средства с электрическим приводом по перегону являются: режим *тяги*, или движение под током; режим *выбега*, или движение по инерции за счёт накопленной за время движения под током кинетической энергии, и режим *торможения*. В зависимости от профиля пути, длины перегона и заданной скорости движения на перегоне возможен повторный пуск и подтормаживание, при котором скорость подвижного состава снижается до допустимого значения.

В режиме тяги, а также повторного пуска потребляемая от источника энергия расходуется на создание крутящего момента на валу тягового двигателя, который преобразуется в тяговое усилие на ободе колеса. Поскольку любое тело при движении преодолевает сопротивление движению и приобретает кинетическую энергию, то величина тягового усилия $F_т$ должна быть больше сил сопротивления W, т. е.

$$F_т > F - W,$$

где F – усилие, создаваемое крутящим моментом на ободе колеса; W – полное сопротивление движению.

В процессе разгона усилие, создаваемое крутящим моментом на ободе колеса, преодолевает не только силы внутреннего и внешнего сопротивления движению, но и инерционную нагрузку $F_{ин}$, обусловленную наличием массы подвижного состава и придаваемым ему ускорением. Поэтому для режима пуска справедливо соотношение

$$F_т > F_{ин} + W,$$

Изменение кинетической энергии подвижного состава равно работе приложенных к нему сил, поэтому справедливо соотношение [1, 6]

$$d\frac{(1+\gamma)mv^2}{2} = F_т ds,$$

где ds – отрезок пути, на котором произошло изменение кинетической энергии, откуда

$$F_т = (1+\gamma)mv\frac{dv}{ds}. \qquad (1.1)$$

Для нахождения соотношения между скоростью движения v транспортного средства и временем t в уравнение (1.1) следует подставить выражение для скорости $v = ds / dt$ тогда

$$F_{\text{т}} = (1+\gamma)m\frac{dv}{dt}. \tag{1.2}$$

Равенства (1.1) и (1.2) называют соответственно *первой* и *второй формой уравнения движения транспортного средства*.

Тяговые расчёты удобнее выполнять, пользуясь *удельными* значениями тяговых усилий $f_{\text{т}}$, для чего составляющие уравнений (1.1) и (1.2) делят на вес подвижного состава $G_{\text{ПС}}$ или его массу m:

$$f_{\text{т}} = (1+\gamma)\frac{dv}{dt}; \tag{1.3}$$

$$f_{\text{т}} = (1+\gamma)v\frac{dv}{dt}. \tag{1.4}$$

где $f_{\text{т}} = F_{\text{т}} / m_{\text{ПС}}$.

Инерционная составляющая сил сопротивления движению безрельсового транспорта в формулах (1.1)–(1.4) определяется как и для рельсового, с той лишь разницей, что слагаемые в скобках рассчитываются по формуле

$$1k + \gamma = 1,04 + k_{\text{авт}} i_{\text{ред}}^2,$$

где $k_{\text{авт}} = 0,03...0,05$ для легковых автомобилей и 0,05...0,07 для грузовых; $i_{\text{ред}}$ – передаточное число редуктора.

1.2. ТЯГОВЫЕ И ТОРМОЗНЫЕ УСИЛИЯ И СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ

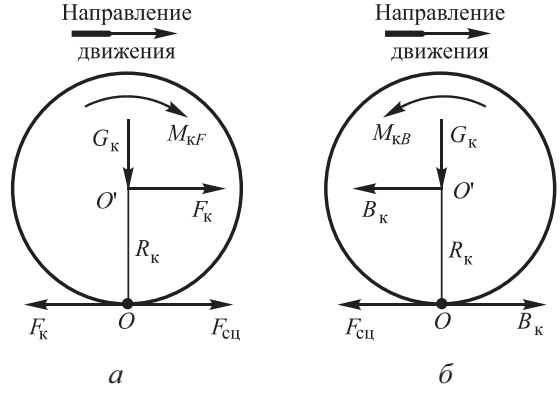
В режиме пуска тяговое усилие, как упоминалось ранее, идёт на преодоление инерционной нагрузки, зависящей от массы транспортного средства, сообщаемого ему ускорения, внутренних и внешних сил сопротивления движению.

В режиме выбега на движущееся транспортное средство действует только сила сопротивления движению W, вследствие чего происходит замедление скорости подвижного состава.

В режиме торможения к силе сопротивления движению W добавляется тормозное усилие B, вследствие чего происходит более интенсивное замедление скорости подвижного состава вплоть до полной остановки.

Для тех видов транспорта, у которых движение осуществляется посредством передачи вращающих или тормозных моментов на колёса от двигателей или тормозных устройств, установленных на нём, образование силы тяги и тормозной силы происходит через *сцепление* колёс с путевой структурой.

Рассмотрим процесс образования силы тяги на примере отдельного колеса (рис. 1.1).



а *б*

Рис. 1.1

На рис. 1.1, *а* $G_к$ – усилие, создаваемое весом подвижного состава, приходящимся на колесо; $R_к$ – радиус колеса; $M_{кF}$ – крутящий момент на колесе, передаваемый от тягового двигателя; $F_к$ – сила тяги на ободе колеса; $F_{сц}$ – сила сцепления колеса с путевой структурой; O – точка соприкосновения колеса с путевой структурой; O' – ось колеса (буксовый узел).

Момент $M_{кF}$ стремится повернуть колесо вокруг его геометрической оси O'. Однако этому препятствуют силы трения, образующиеся под действием усилия $G_к$ в точке O соприкосновения колеса с путевой структурой.

Представим момент $M_{кF}$ парой сил $F_к$, приложенных в точках O и O' и находящихся друг от друга на расстоянии, равном радиусу колеса, т. е. $M_{кF} = F_к R_к$. Поскольку эта пара сил стремится

поворачивать колесо вокруг его оси O', сила тяги на ободе колеса $F_к$ будет стремиться создать проскальзывание поверхности колеса относительно путевой структуры в точке O. Однако этому препятствует усилие трения $F_{сц}$, также приложенное к колесу, но направленное в противоположную сторону. До тех пор, пока тяговое усилие на ободе колеса не станет больше силы трения, точка O станет мгновенным центром вращения для всех точек колеса, а буксовый узел (точка O') начнёт перемещаться в направлении, указанном вектором силы тяги, приложенной к нему. Это приведёт к перемещению колеса по путевой структуре.

В общем случае, когда движение колеса совершается с ускорением или замедлением, связь между силами тяги и сцепления определяется выражением

$$F_{сц} = F_к - \frac{J_к}{R_к}\frac{d\omega_к}{dt} - W_{внут},$$

где $J_к$ – момент инерции колеса и приведённых к нему частей моментов инерции вращающихся масс тягового привода и поступательно движущегося транспортного средства; $\omega_к = v_к / R_к$ – угловая скорость вращения колеса; $W_{внут}$ – сопротивление движению от трения в подшипниках буксового узла.

Процесс образования силы тяги был рассмотрен для абсолютно жёсткого колеса. В реальных условиях движения наблюдается деформация колеса в точке его соприкосновения с путевой структурой, поэтому точка соприкосновения превращается в пятно, процессы деформации в котором носят довольно сложный характер, поэтому их нельзя не учитывать. При этом радиус качения колеса становится меньше его радиуса. В качестве примера можно привести такой факт, что радиус колеса троллейбуса в свободном состоянии равен 570 мм, а под нагрузкой он уменьшается до 535 мм.

Процесс образования тормозной силы $B_к$ от момента $M_{кB}$ (рис. 1.1, *б*) аналогичен рассмотренному, с той лишь разницей, что сила $F_{сц}$ направлена навстречу движению и определяется выражением

$$F_{сц} = B_к + \frac{J_к}{R_к}\frac{d\omega_к}{dt} + W_{внут}.$$

Для заданных показателей (материал колёс и путевой структуры, состояние их поверхностей, удельные давления на поверхности соприкосновения и т. д.) предельная сила сцепления определяется как

$$F_{\text{сц}} = \psi G_{\text{к}},$$

где ψ – коэффициент сцепления колеса с путевой структурой.

Проведённые многочисленные экспериментальные исследования показали, что коэффициент сцепления достигает максимального значения при трогании с места. С увеличением скорости движения он уменьшается. В качестве примера на рис. 1.2 приведены результаты измерения коэффициента сцепления для различных видов рельсового транспорта [1, 2].

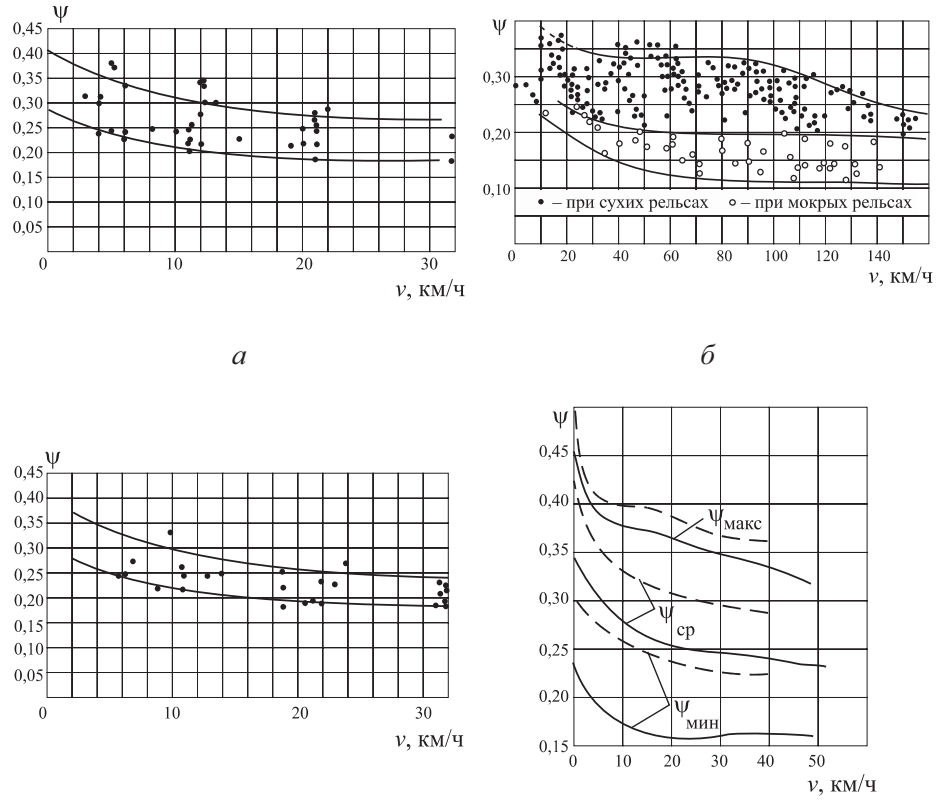


Рис. 1.2

На рис. 1.2, *а* и *б* показаны зависимости $\psi(v)$ трамвая при сухих и мокрых рельсах; на рис. 1.2, *в* – результаты определения коэффициента сцепления для электровоза переменного тока с коллекторными двигателями; на рис. 1.2, *г* – диапазон изменения коэффициента сцепления для электровоза однофазного тока, где штриховые линии соответствуют режиму движения с подсыпкой песка под колёса, а сплошные – без применения песка.

На основании полученных экспериментальных данных были определены аналитические зависимости коэффициента сцепления в функции тока для различных типов подвижного состава. В частности для электровозов постоянного тока зависимость имеет вид

$$\psi = 0,28 + \frac{3}{50 + 20v} - 0,0007v.$$

Зимой при гололёде, буране и подобных метеорологических условиях рекомендуется принимать коэффициент сцепления до 15 % ниже его значения при нормальных условиях.

На основании эксплуатационных данных значения коэффициента сцепления для различных видов подвижного состава могут приниматься в соответствии с рекомендациями, приведёнными в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Вид транспорта	Коэффициент сцепления
Трамвай:	
чистые рельсы	0,16…0,18
загрязнённые рельсы	0,12…0,14
при неблагоприятных условиях (например, листопад)	0,06…0,08
на обособленном полотне	0,18…0,20
Троллейбус:	
на сухом полотне дороги	0,90…1,00
при гололёде	0,10…0,15
Электропоезда пригородного сообщения и метрополитена	0,20…0,22
Электровозы:	
грузовые и пассажирские	0,25…0,33
промышленного транспорта и открытых горных разработок	0,12…0,15

При расчёте тормозного режима коэффициент сцепления рекомендуется принимать на 15…20 % ниже, чем для режима тяги.

Если силы тяги или торможения, создаваемые на колёсах двигателями или тормозными механизмами, будут превосходить силу сцепления, то возникнет скольжение колёс. В режиме тяги этот процесс получил название *буксование*, в режиме торможения – *юз*.

С позиции эксплуатации транспортного средства юз колеса более опасен, чем буксование: на колесе возможно образование лысок и даже выбоин (при прохождении рельсовых стыков).

Силы сопротивления движению, присутствующие во всех режимах, условно разделяют на две составляющие: одна зависит от типа подвижного состава и скорости его движения, а другая – от плана и профиля пути, а также от особых условий движения.

Первую составляющую называют *основным* сопротивлением движению $W_{\text{о}}$, которое представляет собой сопротивление на прямолинейном и горизонтальном открытом участке пути при любой скорости движения: от нулевой до максимально допустимой (конструкционной). Эта составляющая обусловлена внутренними потерями в подвижном составе, сопротивлением, возникающим при взаимодействии его с путевой структурой, а также аэродинамическим сопротивлением воздушной среды (при отсутствии ветра).

Вторую составляющую называют *дополнительным* сопротивлением движению $W_{\text{доп}}$, которое представляет собой сопротивление при трогании $W_{\text{тр}}$, движении на подъёмах W_i, на кривых участках пути $W_{\text{кр}}$, в тоннелях $W_{\text{тон}}$, а также сопротивление от воздействия на подвижной состав ветра $W_{\text{вет}}$ и температур $W_{\text{темп}}$ ниже 25 °С.

Таким образом, сопротивление движению поезда можно представить в абсолютных единицах:

$$W = W_{\text{о}} + W_{\text{доп}}$$

или в относительных (приведённых к единице веса подвижного состава $G_{\text{ПС}}$):

$$w = w_{\text{о}} + w_{\text{доп}}.$$

Для поездов железнодорожного транспорта, состоящих из локомотива и прицепленных к нему вагонов, часто сопротивление

движению представляют как сумму сопротивления движению локомотива $W'_{\text{лок}}$ и вагонов $W''_{\text{ваг}}$:

$$W = W'_{\text{лок}} + W''_{\text{ваг}}.$$

Для удобства вычислений сопротивления движению состава, включающего в себя разнотипные вагоны, используют удельное сопротивление движению, определяемое по формуле

$$w = \frac{w'_{\text{лок}} m_{\text{лок}} + \sum_{j=1}^{N} w''_{j\text{ваг}} m_{j\text{ваг}}}{m},$$

где $m_{\text{лок}}$ – масса локомотива; N – количество типов вагонов в составе; $m_{j\text{ваг}}$ – масса вагона j-го типа; $m = m_{\text{лок}} + \sum_{j=1}^{N} m_{j\text{ваг}}$ – масса поезда.

Основное удельное сопротивление движению электропоездов определяют в зависимости от составности.

Основное сопротивление движению включает в себя такие составляющие, как силы трения в подшипниках подвижного состава, силы трения от качения и скольжения колёс по путевой структуре, силы сопротивления от деформации пути, ударов на стыках и неровностях, а также силы сопротивления воздушной среды. Величина удельного сопротивления от каждой из этих составляющих, кроме аэродинамической, лежит в пределах 0,2…0,6 Н/кН.

Основное сопротивление движению одного и того же транспортного средства существенно зависит от режима движения, что видно из расчётных формул, приведённых для некоторых типов подвижного состава в табл. 1.3.

Силы аэродинамического сопротивления обусловлены наличием воздушной среды и имеют три ярко выраженные составляющие: 1) лобовое сопротивление движению; 2) сопротивление сил трения на боковой поверхности (включая и крышу транспортного средства); 3) тормозные усилия, возникающие за хвостовой частью поезда или вагона из-за разряжения воздушной среды вследствие поршневого эффекта и завихрений (рис. 1.3).

Таблица 1.3

Тип подвижного состава	Основное удельное сопротивление движению, Н/кН (при v в км/ч и массе в т)
Электровозы:	
а) на звеньевом пути:	
– при тяге и электрическом торможении	$w'_o = 1{,}9 + 0{,}01v + 0{,}0003v^2$
– при выбеге и механическом торможении	$w'_o = 2{,}4 + 0{,}011v + 0{,}00035v^2$
б) на бесстыковом пути:	
– при тяге и электрическом торможении	$w'_o = 1{,}9 + 0{,}008v + 0{,}00025v^2$
– при выбеге и механическом торможении	$w'_o = 2{,}4 + 0{,}009v + 0{,}00035v^2$
Электропоезда ЭР1, ЭР2, ЭР9:	
а) на звеньевом пути:	
– при тяге	$w'_o = 1{,}1 + 0{,}012v + 0{,}000267v^2$
– при выбеге	$w'_o = 1{,}24 + 0{,}02v + 0{,}000267v^2$
б) на бесстыковом пути:	
– при тяге	$w'_o = 1{,}1 + 0{,}01v + 0{,}000227v^2$
– при выбеге	$w'_o = 2{,}4 + 0{,}018v + 0{,}000227v^2$
Четырёхосные гружёные грузовые вагоны	$w''_o = 0{,}7 + \dfrac{3 + 0{,}1v + 0{,}0025v^2}{m_{\text{ваг}} g}$
Цельнометаллические вагоны	$w''_o = 0{,}7 + \dfrac{8 + 0{,}18v + 0{,}003v^2}{m_{\text{ваг}} g / 4}$
Вагоны метрополитена:	
– под током	$w_o = 1{,}1 + 0{,}0092 S_{\text{экв}} v^2 / m_{\text{ваг}}$
– без тока	$w_o = 1 + 52 / m_{\text{ваг}} + 0{,}025v + 0{,}0092 S_{\text{экв}} v^2 / m_{\text{ваг}}$
Однокузовной трамвайный вагон:	
– при тяге	$w_o = 2{,}5 + (30 + 0{,}04v^2)m$
– при выбеге и торможении	$w_o = 3 + (40 + 0{,}05v^2)m$
Поезд из двух моторных трамвайных вагонов:	
– при тяге	$w_o = 2{,}5 + (30 + 0{,}03v^2)m$
– при выбеге и торможении	$w_o = 3 + (40 + 0{,}04v^2)m$
Поезд из моторного и прицепного трамвая:	
– при тяге	$w_o = 2 + (20 + 0{,}03v^2)m$
– при выбеге и торможении	$w_o = 2{,}25 + (30 + 0{,}035v^2)m$
Троллейбус (при скорости в м/с)	$w_o = 12 + 0{,}04v^2$

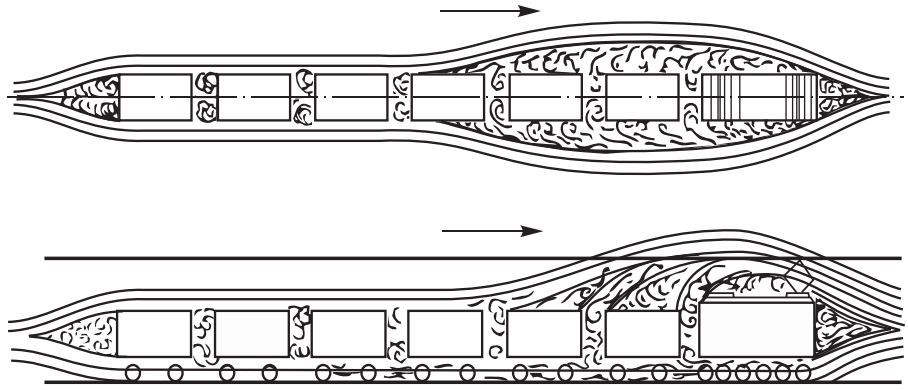


Рис. 1.3

На основании проведённых аэродинамических исследований движения тела неизменяемой формы в воздухе установлено, что при постоянной скорости движения сила сопротивления воздушной среды $W_{в.с}$ приблизительно пропорциональна произведению квадрата скорости на площадь поперечного сечения $S_{п/п}$. С учётом коэффициента обтекаемости $\alpha_в$ расчётная формула для определения аэродинамического сопротивления приобретает вид

$$W_{в.с} = \alpha_в S_{п/п} v^2. \qquad (1.5)$$

В частности, коэффициент обтекаемости локомотива (или головного вагона электропоезда) $\alpha_в = 0,07$, а для пассажирских вагонов в составе поезда $\alpha_в = 0,009$.

Исследования показали также значительное влияние конфигурации головной и хвостовой части кузова на величину аэродинамического сопротивления транспортного средства (рис. 1.4).

Поэтому для уменьшения сопротивления воздушной среды транспортным средствам придают обтекаемую форму.

Анализ формул в табл. 1.3 показывает, что для аналитических расчётов основное удельное сопротивление движению можно представить в виде полинома

$$w = a + bv + cv^2,$$

где каждому типу транспортного средства соответствуют свои значения коэффициентов *a*, *b* и *c*.

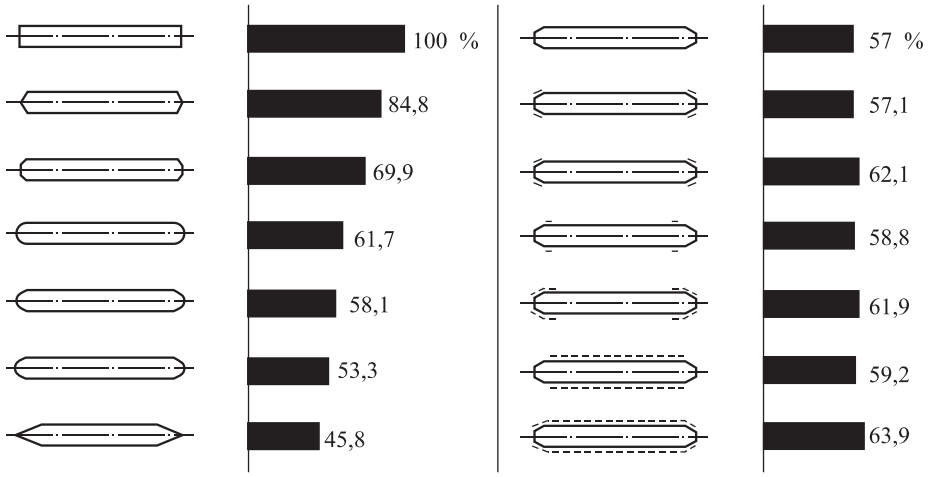


Рис. 1.4

Пневмоколёсный транспорт в отличие от рельсового имеет большее количество конструктивных исполнений, продиктованных функциональным назначением и сферой его применения.

На движущееся транспортное средство с пневмошинами воздействуют те же внешние факторы, что и на рельсовый подвижной состав. Исключение составляет лишь воздействие центробежной силы: наличие в тяговой передаче редуктора с дифференциалом обеспечивает качение колёс по путевой структуре без проскальзывания, что исключает появление дополнительных сил трения в пятне контакта колёс. Вместе с тем само пятно контакта пневмошины значительно больше, чем на рельсовом транспорте, и требуются бóльшие затраты энергии на преодоление сил сопротивления качению колеса. Кроме того, при движении на криволинейных участках колёса с пневматическими шинами испытывают значительные деформации, что приводит к изменению пятна контакта и увеличению сил сопротивления движению.

Применительно к автомобилям силы сопротивления качению в пути рассчитываются как сумма сил, действующих на каждый мост автомобиля:

$$F_{\text{пут}} = \sum_{i=1}^{n} F_{\text{пут}i} = \sum_{i=1}^{n} f_i G_i,$$

где n – количество мостов транспортного средства; f_i – коэффициент сопротивления качению i-го моста; G_i – вес автомобиля, приходящийся на i-й мост.

Коэффициент сопротивления качению зависит, во-первых, от структуры пути (асфальт, бетон и т. д.) и, во-вторых, от состояния колёс (степени износа протектора, величины давления сжатого воздуха в пневмошине и т. д.). Поскольку разброс значений этих факторов трудно учитывать, то в расчётах обычно принимаются одинаковыми коэффициент сопротивления качению для всех колёс автомобиля и состояние колёс. При этих допущениях сила сопротивления качению рассчитывается как

$$F_{\text{пут}} = fG_{\text{ПС}}.$$

Величина коэффициента сопротивления качению зависит от скорости движения транспортного средства. Наиболее распространённые эмпирические выражения этой зависимости имеют вид

$$f = f_0(1 + 6,5 \cdot 10^{-4} v^2)$$

и

$$f = \begin{cases} 0,0165 & \text{при } v \le 14 \text{ м/с}; \\ 0,0165 + 3,6 \cdot 10^{-4}(v - 14) & \text{при } v \ge 14 \text{ м/с}, \end{cases}$$

где f_0 – коэффициент сопротивления качению при движении со скоростью 50 км/ч.

Значения коэффициента сопротивления качению для различных покрытий путевых структур приведены в табл. 1.4.

При одинаковой природе сил аэродинамического сопротивления движению рельсового и безрельсового транспорта физика процесса обтекания воздушной средой автомобиля существенно отличается. Объясняется это тем, что вагонная форма кузова транспортных средств для массовой перевозки пассажиров способствует более спокойному (без сильных завихрений) обтеканию подвижного состава воздухом.

Процесс обтекания воздухом грузового и легкового автомобилей представлен на рис. 1.5, *а* и *б* соответственно. На рис. 1.5, *б*

знаком «+» показана зона повышенного давления, знаком «–» – зона разряжения.

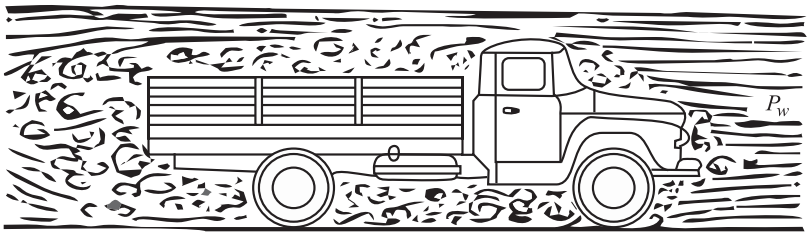
Таблица 1.4

Тип дороги	f_0
Цементо- или асфальтобетонное покрытие:	
в хорошем состоянии	0,012...0,018
в удовлетворительном состоянии	0,018...0,020
Щебёночное или гравийное шоссе:	
обработанное вяжущими органическими материалами	0,020...0,025
без обработки	0,030...0,040
Булыжная мостовая:	
в хорошем состоянии	0,023...0,030
с выбоинами	0,035...0,050
Грунтовые дороги после дождя	0,050...0,150
Песок:	
влажный	0,080...0,150
сыпучий	0,150...0,300
Снежные дороги укатанные и расчищенные	0,030...0,050

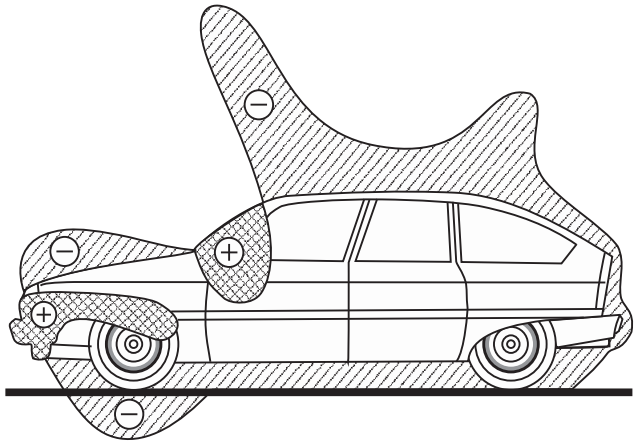
Наибольшая часть энергии при преодолении сопротивления воздуха затрачивается на образование воздушных вихрей.

Если всё сопротивление воздуха принять за 100 %, то на образование воздушных вихрей будет приходиться примерно 60 %. Около 25 % составляет сопротивление, создаваемое выступающими частями автомобиля (крылья, подножки и т. д.), а также сопротивление, возникающее при прохождении воздуха через радиатор. Около 15 % общего сопротивления воздуха приходится на трение поверхности автомобиля об обтекающие его слои воздуха. Сила сопротивления воздушной среды рассчитывается по формуле (1.5).

Средние значения коэффициента обтекаемости различных видов автомобилей, а также площади их миделевых (поперечных) сечений приведены в табл. 1.5. Применительно к легковым автомобилям значения коэффициента обтекаемости сильно разнятся в зависимости от формы кузова, что видно на примере автомобиля LADA (табл. 1.6).



а



б

Рис. 1.5

Таблица 1.5

Тип автомобиля	$\alpha_в$, Н·с^2/м^4	$S_{п/п}$, м^2
Тяжёлый грузовой	0,60...0,70	3,0...7,0
Автобус	0,25...0,50	4,5...7,0
Легковой	0,15...0,60	1,4...2,6
Гоночный	0,10...0,15	1,0...1,5

Таблица 1.6

Модель	$\alpha_в$
1. LADA Priora седан	0,320
2. LADA Priora универсал	0,340
3. LADA Kalina люкс	0,347
4. LADA Granta люкс	0,353

Окончание табл. 1.6

Модель	$\alpha_в$
5. LADA Granta норма	0,367
6. LADA Kalina норма	0,378
7. LADA Vesta	0,380
8. LADA Kalina-2 универсал	0,390
9. LADA Kalina-2 хэтчбек	0,418
10. LADA Largus	0,420
11. NIVA 4 × 4	0,536
12. LADA XRAY	Пока неизвестно

Площадь миделевого сечения для автомобилей рассчитывается по следующим формулам:

– для грузовых

$$S_{\text{п/п}} = B_{\text{кол}} H_{\text{г}};$$

– для легковых

$$S_{\text{п/п}} = 0,78 B_{\text{г}} H_{\text{г}},$$

где $B_{\text{кол}}$ – ширина колеи автомобиля; $H_{\text{г}}$ и $B_{\text{г}}$ – его габаритная высота и ширина соответственно.

Формула (1.5) может быть использована для расчёта силы сопротивления движению автопоезда, включающего в себя грузовой автомобиль и прицепы. В этом случае в формулу подставляется величина $S_{\text{п/п}}$ для элемента автопоезда, имеющего наибольшую площадь миделевого сечения, а коэффициент $\alpha_в$ определяется по тягачу и увеличивается на 25 % на каждый прицеп.

При движении транспортного средства на прямолинейном участке дороги на него могут воздействовать дополнительные силы от веса подвижного состава на переменном профиле пути, вызванные наличием подъёмов, уклонов и криволинейных участков. Подъёмы и уклоны (i) на путевой структуре электрического транспорта принято обозначать безразмерными единицами (‰), которые определяются отношением перепада высот к проекции пути длиной 1 км на горизонтальную линию (рис. 1.6).

Согласно рис. 1.6 уклон $i = bc / ac = \operatorname{tg}\alpha$.

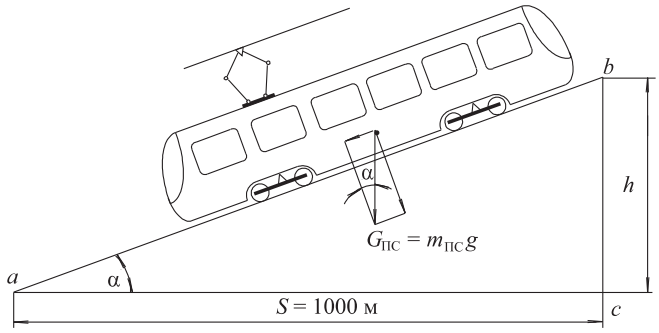


Рис. 1.6

Действующее при этом на подвижной состав ускоряющее или замедляющее (в зависимости от направления движения) усилие определяется выражением $F_i = G_{ПС} \sin\alpha \approx G_{ПС} \mathrm{tg}\,\alpha = iG_{ПС}$. Замена тангенса на синус правомерна в силу малости углов, которые на самых крутых подъёмах не превышают величины 2,5°. При подъёме это усилие суммируется с усилием основного сопротивления движению, а при спуске – вычитается. Приведённое к весу подвижного состава удельное сопротивление имеет вид $w_i = F_i / G_{ПС}$. Например, при уклоне 15 ‰ удельная сила сопротивления $w_i = 15$ Н/кН. Таким образом, сопротивление движению от подъёма (уклона) не зависит от скорости и типа подвижного состава.

На рельсовом транспорте возникает дополнительное сопротивление движению при прохождении кривых участков пути. Увеличение сопротивления движению обусловлено появлением, во-первых, сил трения реборд колёс о головку внешнего рельса вследствие воздействия на подвижной состав центробежной силы и, во-вторых, продольного и поперечного проскальзывания колёс ходовых частей относительно рельсов из-за разности кругов катания, а также в моменты входа и выхода из криволинейных участков пути.

Из-за сложности аналитического описания влияния всех факторов на величину потерь на практике используются эмпирические зависимости, отражающие влияние только одного фактора – радиуса кривой $R_{кр}$. Так, в частности, для магистральных железнодорожных путей приведённое удельное сопротивление рассчитывается по формуле

$$w_{кр} = 700 / R_{кр},$$

а для четырёхосных трамвайных вагонов

$$w_{кр} = 450 / R_{кр}.$$

Дополнительное аэродинамическое сопротивление возникает и под воздействием ветра. Наибольшего значения составляющая от ветровой нагрузки достигает при совпадении направлений векторов скоростей транспортного средства и ветра. При попутном ветре аэродинамическое сопротивление движению снижается, при встречном – возрастает. Поскольку влияние скорости ветра $v_в$ на сопротивление воздушной среды в пространстве между кузовом подвижного состава и полотном дороги сказывается меньше, её учитывают с поправочным коэффициентом 0,8. Для расчёта суммарного воздействия воздушной среды можно использовать выражение

$$W_{в.с+в} = \alpha_в S_{п/п} (v \pm 0,8 v_в)^2,$$

где $W_{в.с+в}$ – сопротивление воздушной среды и ветра.

Дополнительное сопротивление движению транспортного средства в тоннелях возникает из-за уплотнения воздушной среды, вызванного поршневым эффектом перед поездом и разряжением за последним вагоном.

Для оценки сил сопротивления движению в тоннеле $W_{в.с+тон}$ используется выражение, связывающее между собой сопротивление воздушной среды при движении на поверхности и в тоннеле посредством коэффициента $\beta_{тон}$, зависящего от габаритов тоннеля и очертания поезда:

$$W_{в.с+тон} = \beta_{тон} W_в .$$

В двухпутном тоннеле сопротивление воздушной среды ниже на 15…17 %, чем в однопутном, но выше на 30…35 %, чем на открытой местности. При изменении скорости движения в диапазоне от 1…2 до 60 км/ч при прохождении тоннеля удельное сопротивление движению воздушной среды увеличивается в 3–5 раз.

Влияние низких температур проявляется в повышенной плотности воздуха, вследствие чего возрастает аэродинамическая составляющая сопротивления движению. Исследования показали,

что понижение температуры от –30 до –50 °С при скорости движения 100 км/ч приводит к возрастанию сопротивления воздушной среды на 10…15 %.

Таким образом, удельное равнодействующее усилие в различных режимах может быть выражено:

– для режима тяги

$$f_{\text{т}} = f - w_{\text{о}} - w_i;$$

– для режима выбега

$$f_{\text{выб}} = -(w_{\text{о}} + w_i);$$

– для режима торможения

$$f_{\text{торм}} = -(b_{\text{о}} + w_{\text{о}} + w_i),$$

где f – удельная сила на ободе колеса за вычетом сил сопротивления в механической части привода; $b_{\text{о}}$ – основное удельное тормозное усилие.

1.3. КРИВЫЕ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Движение транспортного средства по перегону характеризуется изменением его пространственного положения и скорости во времени. Для их отражения используются зависимости $v(s)$ и $v(t)$, получившие в графическом изображении название *кривые движения*. Они, как правило, включают в себя режим движения под током, выбег и режим торможения. Продолжительность этих режимов зависит от величин сил тяги, сопротивления движению и торможения.

Тяговое усилие транспортного средства зависит от количества установленных на нём двигателей, а изменение его в процессе увеличения скорости движения определяется зависимостью $F(v)$, получившей название *тяговая характеристика*.

Тяговая характеристика двигателя зависит от его *электромеханических характеристик*, отражающих зависимость от тока таких показателей, как угловая скорость $\omega(I)$, вращающий момент $M(I)$, полезная мощность $P(I)$, КПД $\eta(I)$, коэффициент мощности $\chi(I)$ при условии постоянства питающего двигатель напряжения $U_{\text{пит}}$, электрическое сопротивление его обмоток $r_{\text{дв}}$ и частота тока f.

Для построения кривых движения транспортного средства используются электромеханические характеристики, приведённые к ободу колеса $v(I)$ и $F(I)$, получаемые путём пересчёта с использованием известных соотношений:

$$\left.\begin{aligned} v &= \omega R_{\text{к}} / i_{\text{ред}}; \\ F &= i_{\text{ред}} M / R_{\text{к}}; \\ P &= \omega M \eta; \\ P &= Fv; \\ P_{\text{пит}} &= P\eta; \\ \eta &= \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{пер}}, \end{aligned}\right\} \qquad (1.6)$$

где $R_{\text{к}}$ – радиус колеса; $i_{\text{ред}}$ – передаточное число редуктора; $\eta_{\text{дв}}$ – КПД двигателя; $\eta_{\text{пер}}$ – КПД передачи (трансмиссии) транспортного средства.

Тяговая характеристика транспортного средства строится графически путём исключения тока двигателя из электромеханических характеристик $F(I)$ и $v(I)$, как это показано на рис. 1.7.

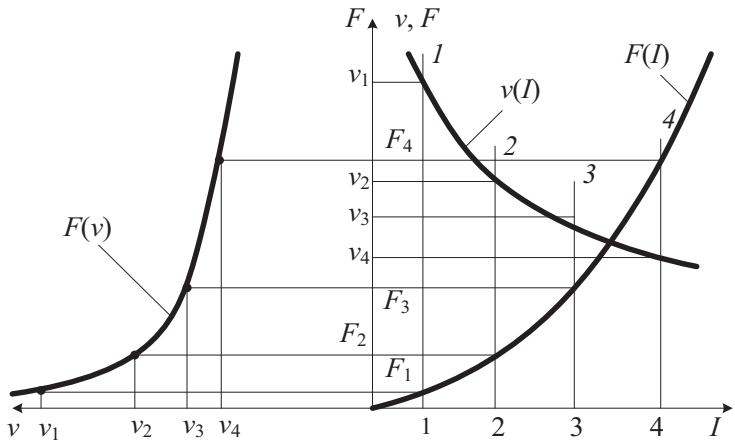


Рис. 1.7

Графическое построение результирующей тяговой характеристики (с учётом сил сопротивления движению) в удельной форме показано на рис. 1.8.

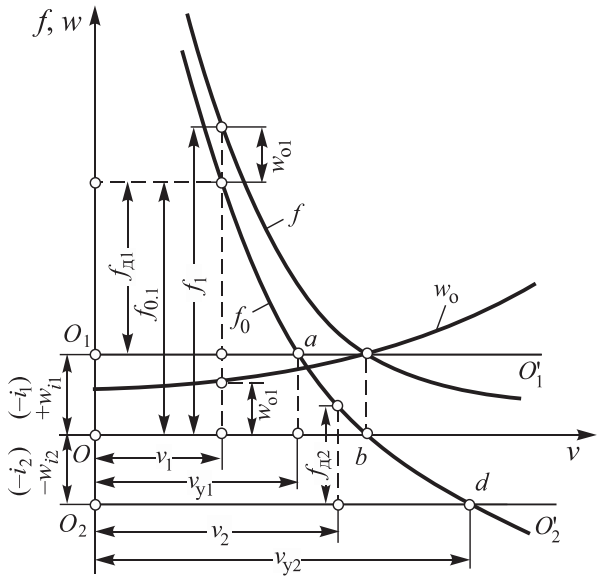


Рис. 1.8

По кривой $f_0(v)$ находят удельную равнодействующую силу $f_д$ для любого уклона и кривизны пути. Для этого нужно из f вычесть удельное сопротивление w_i, обусловленное уклоном, или $w_{кр}$, вызванное сопротивлением непрямолинейного участка, или оба эти фактора. Графически вычитание (сложение) производится переносом оси абсцисс на расстояние, соответствующее их значениям. Движение на подъёме увеличивает сопротивление движению, поэтому линия абсцисс поднимается вверх, занимая положение $O_1 - O_2$. При движении на спуске положение оси переходит в $O_2 - O_2'$.

В точках пересечения оси абсцисс с кривой $f_0(v)$ скорость транспортного средства достигает установившегося значения.

Зависимость тормозного усилия в функции скорости $B(v)$ называют *тормозной характеристикой*. При расчётах кривых торможения используют удельную замедляющую силу b_o, которая определяется как сумма удельных усилий тормозного механизма b и сопротивления движению w_o:

$$b_o = b + w_o.$$