

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ТОМ I

Г. К. Гетьман

ТЕОРИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

ТОМ I



Г. К. ГЕТЬМАН



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И СВЯЗИ УКРАИНЫ

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА

Г. К. ГЕТЬМАН

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

В двух томах

Том 1

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА
2010

УДК 621.33.01(075.8)

Г44

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *В. А. Браташ*

д-р техн. наук, проф. *В. Ф. Далека*

д-р техн. наук, проф. *Я. В. Щербак*

Рекомендовано к печати ученым советом

Днепропетровского национального университета

железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

(*протокол № 9 от 06.05.2010*)

Гетьман Г. К.

Г44 Теория электрической тяги: Монография: в 2 т. / Г. К. Гетьман. – Д.: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та железн. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2010. – Т. 1. – 450 с.

Рос. мовою.

ISBN (полное собрание)

ISBN (том 1)

В Т. 1 монографії розглянуто основні питання теорії електричної тяги: теорія руху поїзда, умови реалізації сил тяги та гальмування, сили опору руху, характеристики тягового і гальмівних режимів тягових засобів існуючих систем електричної тяги.

Книга розрахована на студентів спеціальності «Електричний транспорт», а також інженерно-технічних робітників підприємств, які здійснюють розробку, створення і експлуатацію тягових засобів електричного транспорту.

Іл. 225. Табл. 27.

В Т. 1. монографии рассмотрены основные вопросы теории электрической тяги: теория движения поезда, условия реализации сил тяги и торможения, силы сопротивления движению, характеристики тягового и тормозных режимов тяговых средств существующих систем электрической тяги.

Книга рассчитана на студентов, обучающихся по специальности «Электрический транспорт», а также инженерно-технических работников предприятий, осуществляющих разработку, создание и эксплуатацию тяговых средств электрического транспорта.

Ил. 225. Табл. 27.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	5
Глава 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА	27
1.1. Постановка задачи об управляемом движении поезда	27
1.2. Вывод уравнения движения поезда.....	28
1.3. Уравнение движения поезда как уравнение движения несвободной материальной точки	31
1.4. Коэффициент инерции вращающихся масс	33
1.5. Размерности физических величин и практические формы представления уравнения движения	35
Глава 2. РЕАЛИЗАЦИЯ СИЛЫ ТЯГИ.....	39
2.1. Физические основы образования силы тяги	39
2.2. Определение силы тяги движущей оси	46
2.3. Классификация понятий о силе тяги двигателя и локомотива	47
2.4. Физическая природа сцепления, явление крипа и характеристика сцепления	52
2.5. Устойчивость процесса реализации силы тяги. Основной закон локомотивной тяги	58
2.6. Влияние конструкции и условий эксплуатации на тяговые свойства электроподвижного состава	62
2.7. Расчетный коэффициент сцепления	73
2.8. Способы повышения сцепных свойств локомотивов	82
2.8.1. Основные способы улучшения условий контактирования колес с рельсами	83
2.8.2. Повышение степени использования силы сцепления	87
2.8.3. Мероприятия по снижению последствий превышения силы сцепления	89
Глава 3. СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ	98
3.1. Сущность и классификация сил сопротивления движению	98
3.2. Основное сопротивление движению	100
3.3. Сопротивление движению от уклонов и кривизны пути.....	115
3.4. Добавочное сопротивление движению.....	124
3.5. Определение общего сопротивления движению поезда	132
3.6. Меры по снижению сопротивления движению	134

Глава 4. ТОРМОЗНАЯ СИЛА	137
4.1. Назначение тормозов и их классификация	137
4.2. Механизм образования тормозной силы	139
4.3. Коэффициент трения тормозных колодок.....	142
4.4. Условия реализации тормозной силы.....	145
4.5. Расчет тормозной силы поезда	151
4.6. Дисковые и барабанные тормоза.....	155
4.7. Электромагнитные рельсовые тормоза.....	157
4.8. Вихретоковый тормоз.....	160
4.9. Механическая устойчивость при торможении	162
Глава 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА	164
5.1. Основные уравнения и электромеханические характеристики	164
5.1.1. Основные уравнения для двигателя постоянного тока.....	164
5.1.2. Электромеханические характеристики.....	166
5.2. Электротяговые характеристики	171
5.3. Свойства электротяговых характеристик при различных способах возбуждения.....	176
5.4. Тяговые характеристики. Жесткость тяговых характеристик	181
5.5. Регулирование скорости двигателей постоянного и пульсирующего тока.....	186
5.5.1. Регулирование скорости изменением приложенного напряжения	186
5.5.2. Регулирование скорости изменением магнитного потока.....	193
5.6. Сравнение тяговых двигателей различных систем возбуждения.....	202
Глава 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВОГО РЕЖИМА ЭПС ПОСТОЯННОГО ТОКА С КОНТАКТНО-РЕЗИСТОРНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ	213
6.1. Регулирование скорости в режиме тяги	213
6.2. Общие принципы пуска.....	215
6.3. Реостатный пуск. Потери электроэнергии в пусковых резисторах.....	218
6.4. Коэффициент пусковых потерь.....	224
6.5. Ступенчатый реостатный пуск	229
6.6. Полные электротяговые, тяговые и токовые характеристики	235
6.7. Характеристики электроподвижного состава для измененных параметров тяговой передачи	242
Глава 7. РЕКУПЕРАТИВНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ЭПС ПОСТОЯННОГО ТОКА	245
7.1. Общие сведения	245
7.2. Основные уравнения и требования к системам рекуперации	246

7.3. Принципиальные схемы рекуперативного торможения при дискретном регулировании тока возбуждения	253
7.4. Рекуперативные характеристики.....	256
7.5. Автоматическое регулирование тормозной силы	262

Глава 8. РЕОСТАТНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ЭПС ПОСТОЯННОГО ТОКА.....

8.1. Реостатное торможение при последовательном возбуждении	265
8.1.1. Особенности процесса самовозбуждения.....	265
8.1.2. Характеристики реостатного торможения	267
8.1.3. Регулирование тормозной силы и ее ограничения	269
8.1.4. Схемы реостатного торможения с самовозбуждением при работе генератора на общий тормозной резистор	271
8.2. Реостатное торможение при независимом возбуждении	275
8.3. Рекуперативно-реостатное торможение	280

Глава 9. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПС ОДНОФАЗНО-ПОСТОЯННОГО ТОКА

9.1. Техничко-экономические преимущества электрификации железных дорог на переменном токе	285
9.2. Регулирование мощности тяги и особенности работы тяговых двигателей	287
9.3. Характеристики тяговых выпрямителей	291
9.3.1. Основные электромагнитные соотношения для идеального выпрямителя	291
9.3.2. Влияние коммутации тока на характеристики выпрямителя	294
9.3.3. Влияние пульсации выпрямленного тока на характеристики преобразователя	300
9.3.4. Внешняя характеристика выпрямителя	307
9.4. Электроподвижной состав переменного тока с плавным регулированием мощности тяги	316
9.4.1. Преимущества плавного регулирования мощности тяги	316
9.4.2. Особенности фазового регулирования напряжения.....	318
9.4.3. Зонно-фазовое регулирование напряжения.....	323
9.5. Характеристики тягового режима	327
9.5.1. Электромеханические характеристики	327
9.5.2. Электротяговые характеристики	330
9.5.3. Пусковые и тяговые характеристики	332
9.5.4. Коэффициент полезного действия электровоза	336
9.5.5. Токвые характеристики	339
9.6. Характеристики реостатного торможения	345
9.7. Характеристики рекуперативного торможения.....	350
9.7.1. Особенности осуществления рекуперативного торможения	350

9.7.2. Внешняя характеристика тягового инвертора	356
9.7.3. Характеристики рекуперативного торможения	360

Глава 10. ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОЙ СОСТАВ С БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ..... 362

10.1. Предпосылки для создания электроподвижного состава с бесколлекторными тяговыми двигателями.....	362
10.2. Электроподвижной состав с асинхронным тяговым приводом.....	364
10.2.1. Основные уравнения связи параметров асинхронного тягового двигателя	364
10.2.2. Образование вращающегося магнитного поля при питании асинхронного двигателя от статического преобразователя частоты	367
10.2.3. О возможности реализации асинхронным тяговым приводом режимов нагружения, требуемых условиями эксплуатации ЭПС	374
10.2.4. Схемы питания и структура систем управления асинхронным тяговым приводом	383
10.2.5. Особенности расчета тяговых и тормозных характеристик электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом	390
10.2.6. Схема замещения управляемой частотой асинхронной машины	393
10.2.7. Расчет рабочих характеристик.....	401
10.2.8. Расчет электромеханических характеристик	404
10.2.9. Расчет и построение U-образных характеристик.....	405
10.2.10. Расчет токовых характеристик	408
10.2.11. Составляющие электромагнитного момента и добавочные потери в асинхронной машине при питании от статического преобразователя.....	410
10.3. Характеристики электроподвижного состава с вентильными тяговыми двигателями	416
10.3.1. Общие замечания	416
10.3.2. Анализ особенностей работы коллекторной машины обращенной конструкции	416
10.3.3. Принцип действия вентильного тягового двигателя.....	420
10.3.4. Реакция якоря.....	425
10.3.5. Основные электромеханические соотношения.....	432
10.3.6. Расчет электромеханических характеристик	437
10.3.7. Условия пуска вентильного тягового двигателя.....	443

ВВЕДЕНИЕ

В.1. Электрическая тяга на железных дорогах Украины

В транспортной системе Украины ведущее место занимают железные дороги, поскольку ими выполняется более половины грузооборота всех видов транспорта.

Успешное функционирование железных дорог Украины обеспечивается рациональным сочетанием двух прогрессивных видов тяги – электрической и тепловозной.

История электрификации железных дорог Украины берет начало в 1935 году, когда на электротягу был переведен участок Запорожье-Никополь-Долгинцево (202 км) Приднепровской железной дороги.

Темпы электрификации железных дорог Украины определялись планами электрификации железных дорог СССР и до 1956 года были невысокими. Невысокими были также темпы внедрения тепловозной тяги. Так на конец 1950 года доля новых видов тяги составляла всего 5,4% в выполнении грузооборота СССР и 6,0% общей протяженности его железных дорог.

Вместе с тем, к этому времени в стране назрела необходимость и были созданы научно-технические предпосылки для замены паровой тяги более прогрессивными видами тяги – электрической и тепловозной.

Необходимость замены паровозной тяги более прогрессивными видами тяги определялась тем, что, пройдя 125-и летний путь развития, к середине прошлого столетия паровозы исчерпали возможности своего дальнейшего совершенствования в направлении повышения единичной мощности и эффективности использования топливно-энергетических ресурсов.

Увеличение мощности паровозов ограничивалось предельными нагрузками от оси на рельсы и невозможностью наращивания количества движущих осей по условиям вписывания в кривые. Строительство сочлененных паровозов оказалось неэкономичным и бесперспективным.

Паровозы последних выпусков обеспечивали вождение поездов массой всего 2000-2500 тонн на участках с расчетными подъемами 7-9 ‰. В то же время для тепловоза ТЭЗ (начало выпуска – 1953 г.) и электровоза ВЛ8 (начало выпуска – 1956 г.) критическая по силе тяги масса поездов для таких участков составляла соответственно 3300 и 4000 тонн.

Паровая тяга также существенно уступала новым видам тяги по эффективности использования топливно-энергетических ресурсов. Наибольшие значения к. п. д. паровозов, полученных при испытаниях, составляли 6,9÷9,2%. Однако в обычной эксплуатации к. п. д., как правило, не превышали 5%. В результате на нужды транспорта расходовалось огромное количество – свыше 30% добываемого в стране угля. Перевозка угля для нужд транспорта снижала и так недостаточные пропускные возможности дорог.

Темпы электрификации и внедрения тепловозной тяги возросли в ходе выполнения Генерального плана электрификации железных дорог СССР на 1956-1970 годы. Он предусматривал принцип рационального сочетания электрификации грузонапряженных железнодорожных линий и широкого внедрения тепловозной тяги. Такое сочетание видов тяги позволило ускорить замену паровозов и на базе электрификации осуществить техническое перевооружение хозяйства отраслевых линейных предприятий железных дорог с относительно невысокими капитальными затратами.

В результате выполнения плана электрификации железных дорог к 1980 году прогрессивные виды тяги обслуживали практически всю сеть железных дорог и выполняли свыше 95% маневровой работы. На конец 1990 года переход на прогрессивные виды тяги был завершен.

Согласно упомянутому выше плану электрификации железных дорог на электрическую тягу со середины 50-х годов были переведены наиболее грузонапряженные участки Приднепровской, Донецкой и Южной (на постоянном токе напряжении 3000 В), а в начале 60-х годов – Одесской и Юго-Западной (на однофазном токе промышленной частоты напряжением 25000 В) железных дорог. Электрификация Львовской железной дороги осуществлялась как на постоянном токе (выходы на западные границы), так и на однофазном токе промышленной частоты.

На момент обретения Украиной государственной независимости было электрифицировано 36,1% эксплуатационной длины её железных дорог. Доля электротяги в грузообороте составляла 67,1%.

Электрификация железных дорог Украины продолжается. На конец 2008 года протяженность электрифицированных железных дорог Украины составила 9752 км (44,3% эксплуатационной длины), а их удельный вес в общем объеме перевозок железных дорог достиг 85,6%.

Используются две системы тяги: на постоянном токе напряжением 3 кВ (5746 км) и на однофазном токе промышленной частоты напряжением 25 кВ (5006 км).

На ближайшие годы Укрзалізниця планирует электрификацию участков Знамянка-Долинская-Николаев и Николаев-Херсон-Джанкой.

В.2. Техничко-экономические преимущества электрической тяги

Более чем полувековой опыт эксплуатации железных дорог Украины подтвердил правильность принятого в 1956 году курса на преобладающее использование электрической тяги.

Ставка на электрификацию железных дорог экономически оправдывалась двумя основными предпосылками:

– преобладающее использование электрической тяги позволяет решить задачу интенсификации перевозок за счет повышения скоростей движения и пропускной способности участков;

– наличие значительных резервов для дальнейшего улучшения технико-экономических и эксплуатационных показателей работы электрифицированных линий открывает путь для снижения себестоимости перевозок.

Указанные предпосылки объективно вытекают из технико-экономических преимуществ электрической тяги. Они обусловлены отсутствием на электрическом подвижном составе первичного двигателя и запаса топлива, централизованным энергоснабжением и состоят в следующем:

- 1) повышение провозной и пропускной способности железнодорожных линий;
- 2) более эффективное использование энергоресурсов;
- 3) возможность повышения энергетической эффективности за счет дальнейшего совершенствования устройств по производству и преобразованию электроэнергии;
- 4) снижение себестоимости перевозок;
- 5) снижение уровня потребления нефтепродуктов и снижение уровня отрицательного техногенного влияния железнодорожного транспорта на окружающую среду.

Проанализируем перечисленные преимущества электрической тяге более подробно.

Повышение провозной способности железных дорог обеспечивается, главным образом, за счет реализации при электрической тяге более высоких скоростей движения.

Как известно, провозная и пропускная способности железнодорожной линии определяются двумя главными параметрами перевозочного процесса – массой и скоростью движения поездов.

Критическая масса поездов при достаточной длине приемо-отправочных путей станций определяется силой тяги локомотива в расчетном режиме. Расчетная сила тяги принимается близкой к предельной силе сцепления и в первом приближении для обоих типов локомотивов её можно принять одинаковой.

При заданной силе тяги соответствующая расчетному режиму скорость движения v_{δ} определяется величиной номинальной мощности локомотива

$$v_p = \frac{3,6k_N N_H \eta_{зп}}{F_{кр}},$$

где N_i – номинальная мощность локомотива;

$\eta_{зп}$ – к. п. д. тягового редуктора;

F_{δ} – расчетная сила тяги;

k_N – отношение мощности расчетного режима и номинальной мощности локомотива (для тепловозов $k_N = 1$; для современных электровозов $k_N = 1,0 \div 1,2$).

На электрифицированных линиях питание тяговых средств осуществляется от энергосистемы, мощность которой несравнимо больше мощности тяги отдельного локомотива. Поэтому мощность номинального режима электровоза не ограничена мощностью источника питания и определяется числом движущих осей и предельной мощностью номинального режима тягового двигателя.

Современный уровень развития тягового электромашиностроения позволяет создать для грузовых электровозов тяговые двигатели с мощностью номинального режима 900-1200 кВт на ось (меньшие значения относятся к коллекторным двигателям постоянного или пульсирующего тока, большие – к асинхронным тяговым двигателям). При реализации силы тяги 55-60 кН указанным значениям мощности тяговых двигателей соответствуют скорости движения на расчетном подъеме 50-55 км/ч.

В отличие от электровозов мощность тепловозов ограничена мощностью первичного двигателя, которая даже с учетом современных достижений транспортного дизелестроения не превышает 4000 л. с. (2942 кВт) для шестиосных (типа ТЭ121) и 6000 л.с. (4413 кВт) для восьмиосных (типа ТЭ136) тепловозов. Из приведенных цифр следует, что с учетом потерь в тяговой передаче тяговая мощность, приходящаяся на ось тепловоза, ограничена величиной 330-450 кВт, что в 2,5-3,0 раза ниже предельной осевой тяговой мощности электровоза. Ограничение мощности первичной силовой установки обуславливает необходимость снижения скорости тепловоза на расчетном подъеме до 20-25 км/ч.

Сказанное подтверждают данные табл. В.1, в которой приведены основные параметры тепловозов и электровозов, эксплуатируемых на железных дорогах Украины.

Таблица В.1

Основные технические данные тепловозов и электровозов локомотивного парка Укрзализныци

Серия локомотива	Год начала выпуска	Масса локомотива, т	Мощность продолжительного режима, кВт	Расчетный режим		Расход металла на единицу мощности, кг/кВт
				сила тяги, кН	скорость, км/ч	
Тепловозы						
ТЭ3	1953	252	2×1100	396	20,0	115
2ТЭ10Л	1963	258	2×1700	510	24,0	76
2ТЭ116	1971	276	2×1700	510	23,5	81
Электровозы						
ВЛ8	1956	184	3660	456	43,3	50
ВЛ10	1961	184	4500	451	46,7	41
ВЛ80 ^г	1967	184	6160	502	43,5	30
ДЭ1	1999	188	5810	456	50,8	32

Повышение скоростей движения поездов за счет замены тепловозной тяги на электровозную позволяет повысить пропускную способность однопутных

участков на 40-50%, а двухпутных – на 30-40%. Участковая скорость движения на электрифицированных участках увеличивается на 30-40%.

Эффективное использование энергоресурсов – одно из основных преимуществ электрической тяги.

Железнодорожный транспорт является энергоёмкой отраслью. В 2008 году электропотребление железных дорог Украины составило 6,225 млрд. кВт·ч или 4,5% общего электропотребления в Украине. Основная часть этой энергии (5,297 млрд. кВт·ч) расходуется на тягу поездов. Поэтому снижение энергоёмкости железнодорожных перевозок всегда составляло одну из основных задач эксплуатационников.

Коэффициент полезного использования энергоресурсов при электрической тяге (далее – коэффициент полезного действия электрической тяги) можно определить как

$$\eta_{ЭТ} = \eta_{ЭС} \eta_{ЛЭП} \eta_{ЭН} \eta_{ЭЛ} \eta_{Т},$$

где $\eta_{ЭС}$ – средневзвешенный к. п. д. электростанции;

$\eta_{ЭН}$ – средневзвешенный к. п. д. системы электроснабжения (тяговых подстанций и контактной сети);

$\eta_{ЭЛ}$ – средневзвешенный к. п. д. электровоза с учетом затрат электроэнергии на собственные нужды и во время стоянок;

$\eta_{ЛЭП}$ – к. п. д. линий электропередач;

$\eta_{Т}$ – коэффициент, введенный для учета потерь топлива при его добыче, транспортировке, хранении и подаче в котлоагрегаты.

Данные, характеризующие численные значения поименованных выше величин, приведены в табл. В.2.

Таблица В.2

Коэффициент полезного использования энергоресурсов при электрической тяге

Показатель	Г о д ы					
	1950	1960	1970	1975	1977	1980
Средний к. п. д. тепловых электростанций ($\eta_{ЭС}$), %	20,8	26,3	33,6	36,2	36,8	37,4
К. п. д. линий электропередач ($\eta_{ЛЭП}$), %	92,0	93,6	94,3	95,0	95,1	95,2
Средневзвешенный к. п. д. тяговых подстанций, контактной сети и электровоза ($\eta_{ЭН} \times \eta_{ЭЛ}$), %	62,2	65,4	70,1	72,5	72,7	73,3
К. п. д. электротяги при питании от тепловых электростанций, %	11,9	16,1	22,4	24,9	25,4	26,1
Потери топлива при добыче, транспортировке и хранении ($\eta_{Т}$), %	10,0	8,0	6,0	5,0	5,0	5,0
Коэффициент полезного использования энергоресурсов ($\eta_{ЭТ}$), %	10,7	14,8	21,4	23,6	24,2	24,7

Данные табл. В.2 говорят о том, что в результате непрерывного улучшения использования энергоресурсов на всех этапах преобразования топлива – от его добычи до превращения в механическую работу электроподвижного состава – за время использования электрической тяги её средневзвешенный к. п. д. возрос с 10,7% до 25%.

Следует отметить, что приведенную оценку к.п.д. электрической тяги следует считать заниженной, так как при определении этого показателя не учтена выработка части электроэнергии гидравлическими и атомными электростанциями.

Если железная дорога питается от гидроэлектростанций, к. п. д. которых близок к 90%, то общий к. п. д. электрической тяги достигает 60%.

В перспективе объективные условия развития теплоэнергетики и электровозроения будут способствовать повышению к. п. д. электрической тяги.

Тепловозная тяга характеризуется более низкой эффективностью использования энергоресурсов. Максимальное значение паспортного к. п. д. современных тепловозов составляет 28-31%. Однако, как показывают исследования, свыше 35% времени нахождения в поездной работе тепловозы работают в режиме холостого хода. Нагрузка дизелей тепловозов большую часть времени составляет 30-60% их номинальной мощности, когда к. п. д. ниже номинального. По указанным причинам коэффициент полезного использования энергоресурсов при тепловозной тяге существенно ниже максимального паспортного значения к. п. д. тепловоза и составляет 18,0-18,5% [1, 2]*.

Тепловозы по сравнению с электровозами имеют значительно большую массу при одинаковой мощности номинального режима (см. табл. В.5), что также способствует снижению энергетической эффективности тепловозной тяги.

В качестве интегральной оценки энергетической эффективности любого вида тяги принято использовать удельный расход условного топлива на единицу перевозочной работы. По этому показателю электрическая тяга в 1,4÷1,6 раза эффективнее тепловозной.

Возможность дальнейшего повышения энергетической эффективности электрической тяги обуславливается наличием реальной перспективы совершенствования устройств по производству и преобразованию электроэнергии, а также возможностью дальнейшего совершенствования электроподвижного состава.

Несмотря на то, что за годы, истекшие с начала эксплуатации электрифицированных железных дорог, к. п. д. электротяги увеличился приблизительно в 2,5 раза (см. данные табл. В.2), резервы повышения энергетической эффективности этого вида тяги исчерпаны далеко не полностью. Прежде всего, в будущем будут более полно реализовываться резервы экономии электроэнергии, содержащиеся в применении рекуперативного торможения. В настоящее время на железных дорогах Украины возвращенная в сеть за счет рекуперации энергия составляет только приблизительно 0,3% от затрат электроэнергии на тягу.

* Перечень цитируемых литературных источников приведен в томе 2.

Невысокая эффективность применения рекуперативного торможения является следствием того, что эксплуатируемый в настоящее время электроподвижной состав переменного тока (за исключением электровозов 2ЕЛ5 и ДС3) не оборудован схемами рекуперативного торможения, а электровозы постоянного тока оборудованы устаревшими недостаточно совершенными схемами, что ограничивает эффективное использование рекуперации.

Вместе с тем исследования показывают, что возврат электроэнергии за счет рекуперации может составить 5-10%. Реальность достижения таких результатов подтверждает опыт эксплуатации электровозов ДЭ1 на Приднепровской железной дороге.

Насыщение локомотивного парка Укрзализныци современными электровозами, оборудованными системами автоматического управления рекуперативным торможением, будет способствовать расширению полигона рекуперации и снижению энергоемкости перевозок.

Следует также отметить, что по расчету специалистов дополнительно на 3-5% энергопотребление на тягу поездов может быть уменьшено за счет снижения затрат электроэнергии на питание цепей собственных нужд, в частности, за счет применения более совершенных систем регулирования производительности вентиляторов системы охлаждения тяговых двигателей.

Снижение себестоимости перевозок при переходе на электрическую тягу обусловлено помимо более высокой энергетической эффективности рядом других факторов. Самый очевидный из них – снижение потребной численности локомотивного и вагонного парка.

Эксплуатируемый парк локомотивов определяется как

$$N_{\dot{y}} = \frac{10^6 \alpha k_{\dot{\alpha}} (\sum mL)}{12 \cdot 365 m_c v_{\dot{\alpha}}},$$

где m_c – средняя масса состава;

$\sum mL$ – годовой объем перевозок на участке, млн. т·км;

α – коэффициент, введенный для учета временной неравномерности размеров движения в течение года ($\alpha = 1,10 \div 1,12$);

$k_{\dot{\alpha}}$ – коэффициент, с помощью которого учитываются затраты локомотиво-часов на техническое обслуживание локомотивов ($k_{\dot{\alpha}} = 1,15 \div 1,45$);

$v_{\dot{\alpha}}$ – участковая скорость.

Рост участковой скорости приводит к снижению численности электровозного и вагонного парков, к росту среднесуточного пробега и производительности локомотивов, что в свою очередь обуславливает снижение издержек, связанных с приобретением и ремонтом подвижного состава, а также с содержанием локомотивных бригад.

Снижению расходов на содержание электровозов способствует применение рекуперативного торможения, поскольку уменьшается время пользования ме-

ханическими тормозами, что существенно уменьшает износ тормозных колодок и частоту их смены.

Фактическая трудоемкость всех видов текущего ремонта электровозов существенно меньше, чем тепловозов, особенно при высокой степени износа, поэтому общие ремонтно-эксплуатационные расходы на содержание тепловозов в 2,0-2,5 раза выше, чем на содержание электровозов.

В 1978-1980 г.г. затраты локомотивного хозяйства на грузовое движение при электрической тяге были на 44% ниже, чем при тепловозной, в том числе расходы на ремонт – в 2,86 раза, на энергоресурсы – в 1,44 раза, на содержание локомотивных бригад меньше в 1,45 раза.

В последние годы в связи с ощущающейся дефицитностью всех видов жидкого топлива и повышением тарифов на дизельное топливо, положительная разница в себестоимости перевозок сравниваемых видов тяги приобрела устойчивую тенденцию к увеличению. Об этом красноречиво свидетельствует структура себестоимости перевозок на Приднепровской железной дороге (см. табл. В.3).

Таблица В.3

Себестоимость перевозок на Приднепровской железной дороге (2002г.)

Вид тяги		Электрическая тяга	Тепловозная тяга	По дороге
Объем перевозок	млн. тонно-км. брутто	86,89	7,71	94,60
	%	91,80	8,20	100,00
Эксплуатационные расходы, млн. грн.		343,00	172,60	515,60
Себестоимость перевозок, грн/тыс. тонно-км. брутто		3,95	22,39	5,45

Возросшая разница в себестоимости перевозок между тепловозной и электровозной тягой учитывается при распределении грузопотоков между поездами с разными видами тяги с целью использования преимуществ электрической тяги. Этим объясняется возникший в течение последних 15 лет существенный прирост доли электрической тяги на всех железных дорогах Украины.

Расширение полигона электрической тяги способствует снижению отрицательного техногенного влияния железнодорожного транспорта на окружающую среду (уменьшается загрязнение воздушной среды продуктами сгорания топлива, снижаются объемы применяемых горючесмазочных материалов и т. п.).

Кроме рассмотренных выше, электрические локомотивы имеют еще ряд преимуществ перед тепловозами. Они способны работать по системе многих единиц при управлении с одной кабины. Вследствие этого из отдельных тяговых модулей может быть сформирован тяговый сцеп практически неограниченной мощности. Применение специальных «аварийных» схем соединения тяговых двигателей позволяет резервировать или дробить мощность с целью

обеспечения работоспособности электровоза в случае неисправности отдельных элементов.

Ряд вышеназванных преимуществ электрической тяги ставит её вне конкуренции в сфере городского наземного транспорта, метрополитенов и пригородных перевозок. В первую очередь здесь помимо неоспоримых преимуществ в вопросах охраны окружающей среды следует отметить принципиальную возможность создания тяговых средств электрического транспорта с высокими значениями мощности, приходящейся на 1 тонну массы, что обеспечивает возможность реализации высоких ускорений и высоких скоростей движения на малых расстояниях.

Перевод железных дорог на электрическую тягу требует значительных капиталовложений на создание инфраструктуры тягового электроснабжения, которые должны окупаться за счет экономии эксплуатационных расходов. Чем выше грузонапряженность железной дороги, тем больше экономия за счет снижения себестоимости перевозок, тем короче сроки окупаемости капиталовложений и целесообразнее перевод дороги на электрическую тягу.

В зависимости от соотношения стоимости энергоносителей для каждой страны существует критическая грузонапряженность железнодорожной линии, выше которой экономически целесообразнее использовать электрическую тягу.

Согласно результатам технико-экономических исследований [6] в 80-е годы прошлого столетия на железных дорогах бывшего СССР электротяга становилась эффективнее тепловозной тяги, начиная с грузонапряженности 10-12 млн. ткм на 1 км на однопутных и с 20 млн. ткм/км – на двухпутных линиях. В период массовой электрификации железных дорог критическая грузонапряженность, при которой по мнению специалистов перевод линии на электротягу становился необходимым, определялся величиной 15 млн. ткм/км для однопутных и 20-25 млн. ткм/км – для двухпутных линий.

С ростом положительной разницы в себестоимости перевозок на электрической и тепловозной тяге величина критической грузонапряженности снижается. В настоящее время специалисты называют следующее значение критической грузонапряженности двухпутных линий: России – 20-25, Германии – 16, Польши – 10, Англии – 4-6 млн. ткм брутто на 1 км линии.

В.3. История развития электрической тяги

Технический прогресс в конце XIX и в начале XX века характеризуется интенсивным развитием железнодорожного транспорта и созданием для его нужд тяговых средств – паровозов и электроподвижного состава.

Первый в мире игрушечный электровоз, приводивший в движение небольшой вагончик, создал в 1834 году американский изобретатель Томас Дэвенпорт. При массе электровоза 38 кг масса перевозимого груза составляла 16-18 кг. Электровоз был оборудован батареей гальванических элементов и несовершенным электромагнитным двигателем. Таким образом, модель Т. Дэвенпорта была прототипом автономного электроподвижного состава.

Началом истории развития электрической тяги принято считать 1838 год, когда шотландский изобретатель Р. Давидсон построил небольшой электровоз в виде двухосной тележки массой 5 т (см. рис. В.1) и совершил несколько опытных поездок на участке Глазго-Эдинбург. В движение электровоз приводился от расположенных на нем батарей гальванических элементов и мог перевозить одного человека.

Первые опыты с моделями электрических тяговых средств подтвердили полную техническую возможность применения электрической энергии для тяги поездов. Однако широкое внедрение этих идей сдерживалось отсутствием источников энергии требуемой мощности и эффективных вращающихся электродвигателей.

По указанной причине в начальный период своего развития электрическая тяга не могла составить конкуренцию быстроразвивающейся в те годы паровой тяге*.

Могучий толчок развитию электроэнергетики и развитию электрической тяги дало создание в 1867 году динамомашин и открытие принципа обратимости электрических машин.

В 1878-79 г.г. Вернер фон Сименс в Германии и Томас Эдисон в США ведут работы по созданию электровозов, оснащенных тяговыми двигателями постоянного тока и питаемых от стационарных электрических станций.

В 1879 году на Берлинской промышленной выставке демонстрировалась созданная В. Сименсом электрическая железная дорога. Электровоз, напоминавший современный электрокар, приводил в движение три небольшие платформы (см. рис. В.2). Он был оснащен тяговым двигателем постоянного тока мощностью 9,6 кВт (13 л. с.). Питание двигателя напряжением 160 В осуществлялась через ходовые рельсы. Дорога использовалась для катания пассажиров по территории выставки со скоростью 6,5 км/ч.

Использование ходовых рельсов в качестве прямого и обратного проводов сдерживало применение электрической тяги, так как не исключало вероятность поражения электрическим током пешеходов и животных. Поэтому важным

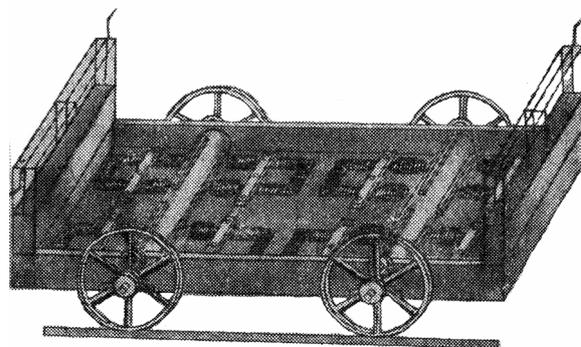


Рис. В.1. Электровоз Р. Давидсона, 1838 г.

* Первый в истории паровоз, успешно прошедший испытания, шотландский инженер Ричард Треветик построил в 1804 году, а английский конструктор и изобретатель Д. Стефенсон, с именем которого связана история триумфального развития паровой тяги, уже в 1823 году основал в Ньюкасле первый в мире паровозостроительный завод.

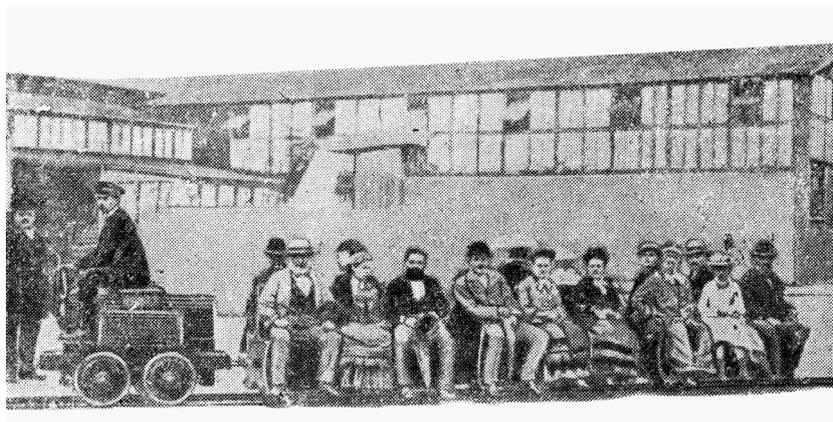


Рис. В.2. Модель электрической железной дороги В. Сименса на Берлинской промышленной выставке 1879 года

шагом в истории развития электрической тяги стала предложенная в 1882 году В. Сименсом система питания электровоза от расположенного над ним контактного провода и созданная Т. Эдисоном система питания от третьего рельса, получившая широкое применение в метрополитенах.

Указанные выше работы способствовали тому, что в начале восьмидесятых годов XIX столетия в ряде крупных городов началось строительство электрических железных дорог для перевозки пассажиров. Такие дороги получили название трамвая (от английского tramway: tram – вагон, вагонетка; way – путь). В те же годы В. Сименс предпринял первую попытку применения троллейбусов, то есть электрической тяги на безрельсовом транспорте (см. рис. В.3).

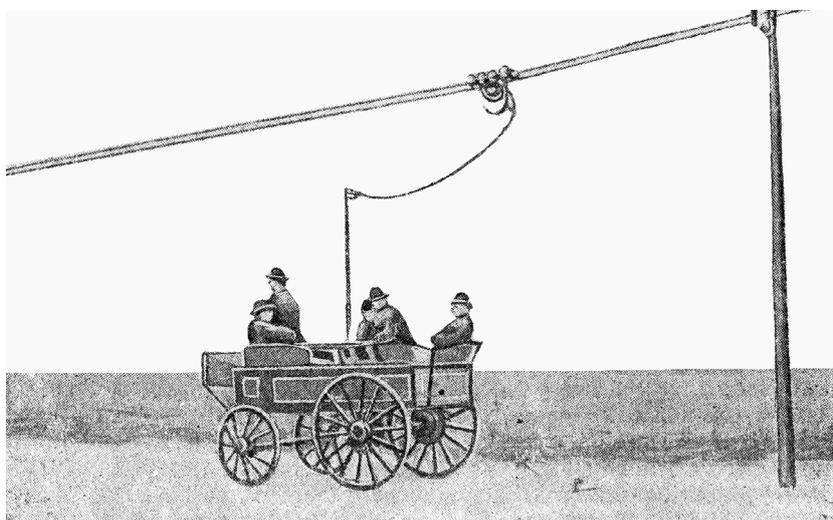


Рис. В.3. Первый троллейбус В. Сименса

Первые трамвайные линии были построены в 1881 году в Шарлоттенберге и Гросслихтенфельде (пригороды Берлина). Трамвайные вагоны приводились в движение двигателем постоянного тока последовательного возбуждения мощностью 3,3 кВт. Вращающий момент передавался от вала двигателя на одну из осей вагона с помощью ременной передачи. Трамвайные вагоны вмещали по 24 пассажира, имели ручные тормоза и развивали скорость до 19 км/ч. Пуск осу-

ществлялся с помощью установленного на площадке вагона пускового реостата.

На первых трамваях постоянный ток напряжением 180 В подводился по ходовым рельсам. С 1883 года в трамвайном транспорте начал применяться верхний контактный провод.

В России первая трамвайная линия построена инженером Струве в Киеве и введена в эксплуатацию 13 июня 1892 года. Линия проходила по крутому Александровскому спуску и соединяла Подол с Печерском и Крещатиком. В 1894 году был пущен первый трамвай во Львове, а в 1897 году в Екатеринославе. В Москве и Санкт-Петербурге первые трамвайные линии введены в эксплуатацию соответственно в 1899 г. и в 1907 г.

Успешная эксплуатация ряда наземных трамвайных линий показала целесообразность применения электрической тяги в метрополитене. В 1890 г. в лондонском метрополитене, а в 1892 г. в наземном метрополитене и на эстакадных железных дорогах Чикаго и Нью-Йорка паровозная тяга была заменена моторвагонной.

С 1897 года для управления трамвайными и моторвагонными поездами стала использоваться получившая затем широкое распространение система многих единиц.

Одновременно с развитием трамвая и метрополитенов электрическая тяга внедрялась на пригородных и магистральных железных дорогах.

Важный вклад в развитие электрической тяги внесли американские изобретатели. В 1882 году Т. Эдисон построил электровоз мощностью 7,35 кВт. Для питания электровоза постоянным током напряжения 250 В сначала использовались ходовые рельсы, а затем был применен третий рельс.

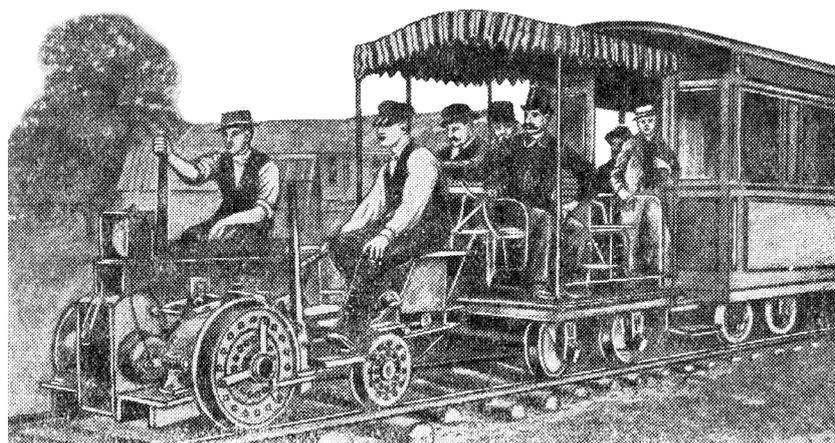


Рис. В.4. Электровоз Т. Эдисона, 1882 г.

В 1883 году Лео Дафт построил свой первый электровоз «Ампер» (см. рис. В.5). Он имел массу 2 т, развивал мощность 18 кВт и мог перевозить до 10 т груза со скоростью 16,7 км/ч (9 миль/ч). Позже Лео Дафт построил электровозы «Volta» и «Pacinotti». Благодаря работам Л. Дафта в 1885 году независимо от В. Сименса трамвай появился в США.

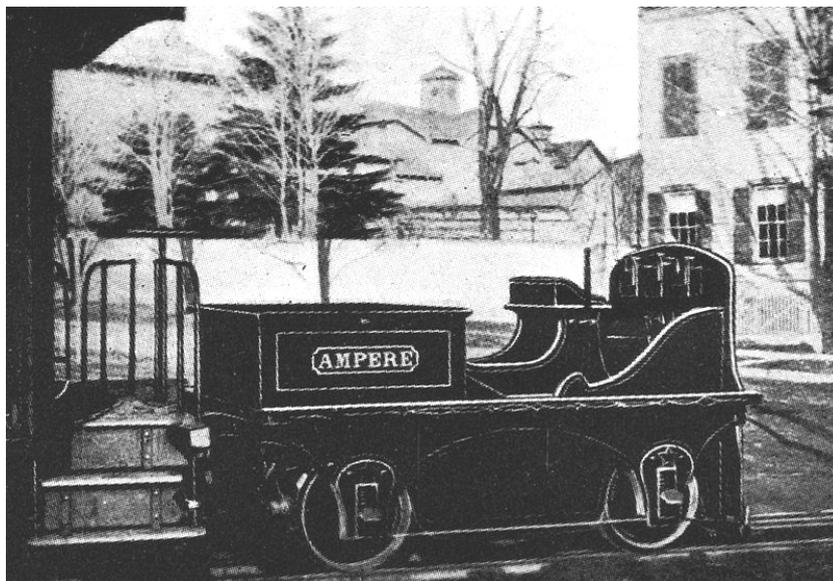


Рис. В.5. Электровоз «Ампер» Лео Дафта, 1883 г.

В 1883 году Ф. Спрэг, Дункан и Хэтингсон завершили постройку самого мощного на то время электровоза массой 60 т. Каждая из четырех движущих осей приводилась в движение электродвигателем мощностью 175 кВт. Особенностью электровоза был безредукторный тяговый привод, в котором ротора электродвигателей были посажены непосредственно на оси колесных пар. Питание электровоза осуществлялось от третьего рельса.

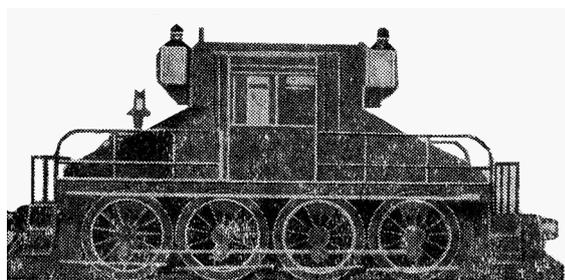


Рис. В.6. Электровоз мощностью 700 кВт (Спрэг, Дункан, Хэтингсон), 1883 г.

В 1889 году американский изобретатель Фрэнк Спрэг применил для передачи вращающего момента от вала тягового двигателя к оси колесной пары зубчатый редуктор вместо ременной передачи. Этот принцип компоновки тягового привода (опорно-осевой привод) получил широкое распространение и применяется до настоящего времени.

Начало электрификации магистральных железных дорог относят к 1995 году, когда в США была электрифицирована железная дорога Балтимор-Огайо (штат Мэриленд) протяженностью 115 км. На этой линии, электрифицированной на постоянном токе напряжением 600 В, эксплуатировались четырехосные электровозы мощностью 1000 кВт и массой 96 т. Питание электровоза осуществлялось от контактного провода посредством токоприемника, конструкция которого представляла собой прототип современных пантографов. С целью снижения динамических нагрузок на электровозе применён безредукторный опорно-рамный тяговый привод (привод третьего класса) с полым валом тягового двигателя.

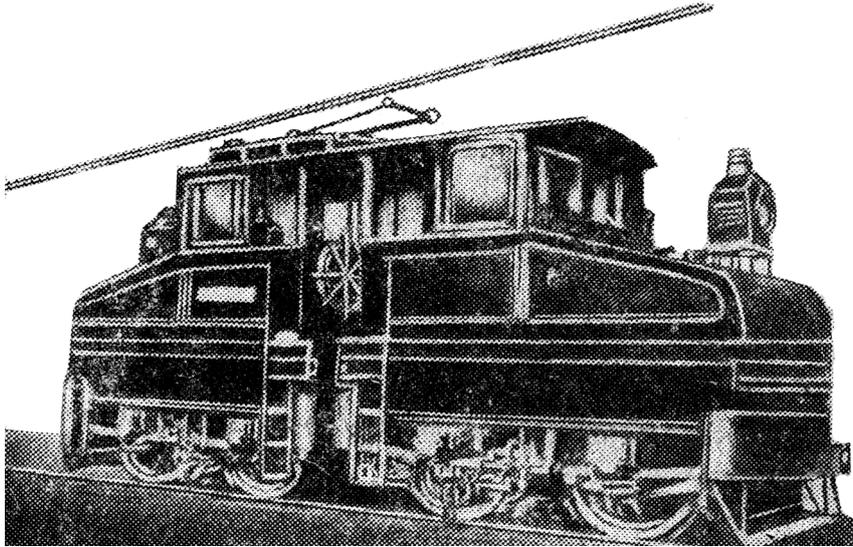


Рис. В.7. Электровоз для первой в мире электрической железной дороги Балтимор-Огайо, 1895 г.

В Европе электрическая тяга на магистральных железных дорогах началась с 1892 года электрификацией на постоянном токе глубокого ввода в окрестностях Парижа.

Низкое напряжение на первых электрифицированных на постоянном токе дорогах, обусловленное уровнем развития техники того времени, требовало больших затрат на создание системы электроснабжения. Поэтому одновременно с развитием электрической тяги на постоянном токе в ряде стран Европы (Италия, Швейцария) началась электрификация железных дорог на переменном токе с применением в качестве тяговых единственно существовавших тогда электродвигателей переменного тока – трехфазных асинхронных.

Передача энергии на электровоз осуществлялась или трехпроводной контактной сетью, или двухпроводной контактной сетью и ходовыми рельсами. Первым по системе трехфазного тока был электрифицирован в 1898 году участок Бургдорф-Тун (Швейцария) протяженностью 40 км.

Электрификация на трехфазном переменном токе позволяла создать наиболее простой электроподвижной состав, поскольку тяговые двигатели питались непосредственно от тягового трансформатора.

Однако в ходе эксплуатации трехфазных систем тяги выявились их существенные недостатки. С точки зрения электроподвижного состава она состояла в невозможности применения для целей тяги асинхронного двигателя наиболее простой конструкции – с короткозамкнутым ротором, а с точки зрения электроснабжения – в трудности обеспечения надежной работы сложной по конструкции трехфазной контактной сети, особенно на воздушных стрелках. Применение в качестве одной из фаз ходовых рельсов не решало проблему, так как давало только несущественное упрощение конструкции контактной сети и некоторое снижение общей стоимости системы электроснабжения.

По изложенным причинам после изобретения в 1902 году коллекторного электродвигателя однофазного тока в США и Германии появляются первые электрические железные дороги однофазного тока.

Таким образом, на начало прошлого века в мире на железных дорогах применялись три системы тяги: постоянного, трёхфазного и однофазного тока.

С момента появления электрической тяги однофазного тока система трехфазного тока практически прекратила дальнейшее развитие, а в некоторых странах дороги трехфазного тока стали переводить на постоянный или однофазный ток. К середине прошедшего столетия система электрической тяги на трехфазном токе перестала существовать.

В первые десятилетия XX столетия создавались и испытывались следующие системы тяги однофазного тока (пониженной или промышленной частоты):

- с коллекторными тяговыми двигателями, питаемыми непосредственно от тягового трансформатора;
- с мотор-генераторными преобразователями однофазного переменного тока в постоянный и двигателями постоянного тока;
- со статическими преобразователями переменного тока в постоянный и тяговыми двигателями постоянного тока;
- с машинными преобразователем однофазного тока в двух- или трехфазный и асинхронными тяговыми двигателями.

Как известно, коммутация коллекторных двигателей однофазного тока затруднена наводимой в коммутируемых витках обмотки якоря некомпенсированной трансформаторной э.д.с. Поскольку её величина при прочих равных условиях пропорциональна частоте питающего тока, то стремление обеспечить нормальные условия коммутации привело к созданию системы тяги на однофазном токе пониженной частоты.

Применение для тяги переменного тока пониженной частоты требовало сооружения или специальных электростанций или дорогостоящих преобразовательных подстанций. По первому пути шла электрификация железных дорог Австрии, Германии, Швейцарии и Хорватии, где питание железных дорог осуществлялось от собственных электростанций, а также в США, где использовалась существующая промышленная частота 25 Гц. В Швеции применено питание железных дорог от промышленных трехфазных сетей через специальные тяговые подстанции, преобразующие трехфазный ток промышленной частоты в однофазный ток пониженной частоты.

Однако с позиций электроснабжения наиболее простой в эксплуатации и требующей наименьших объемов капиталовложений в электрификацию железных дорог является система тяги на однофазном токе промышленной частоты, поэтому разработка электроподвижного состава для такой перспективной системы тяги велась наряду с электрификацией на переменном токе пониженной частоты.

При отсутствии современной полупроводниковой техники электровоз однофазно-постоянного тока строился как мотор-генераторная система. Она

включала тяговый трансформатор, однофазный синхронный двигатель и тяговый генератор постоянного тока для питания тяговых двигателей.

Исследование характеристик, способов пуска и регулирования тяговой мощности показали, что мотор-генераторные электровозы для своего времени обладали наилучшими тяговыми свойствами в сравнении с другими системами тяги. Они обеспечивали плавный безреостатный пуск и плавное регулирование скорости без применения группировок тяговых двигателей, осуществление рекуперативного торможения практически во всем диапазоне изменения скорости движения, использование системы электроснабжения однофазного тока промышленной частоты и работу при близком к единице коэффициенте мощности.

Однако распространение мотор-генераторных электровозов ограничивалось необходимостью установки электрооборудования для трехкратного преобразования подводимой к тяговому двигателю энергии – в трансформаторе, синхронном двигателе и тяговом генераторе. Это повышало металлоемкость и стоимость электровоза и несколько повышенный расход электроэнергии на тягу в связи с её потерями в преобразовательном электрооборудовании. Последняя партия таких электровозов была построена во Франции фирмой Альстом (электровоз серии 14100). В дальнейшем строительство таких электровозов прекратилось, так как не были найдены возможности повышения их технических показателей.

После 1915 года были созданы электровозы переменного тока с машинными преобразователями однофазного тока в трехфазный (или двухфазный) и асинхронными тяговыми двигателями (железные дороги США). На этих электровозах применялся асинхронный или синхронный расщепитель фаз и реостатный пуск трехфазных асинхронных тяговых двигателей с фазным ротором. Безреостатные позиции регулирования скорости движения получали за счет каскадного включения двигателей или изменения числа пар полюсов статорной обмотки. К недостаткам таких электровозов следует отнести неудовлетворительное распределение нагрузок между тяговыми двигателями из-за расхождения их характеристик и диаметров движущих осей и проблему применения кратной тяги из-за перераспределения нагрузки между электровозами при разности диаметров их колес.

Из-за указанных недостатков электровозы с преобразователями фаз постоянной частоты не получили распространения, хотя попытки улучшения их показателей предпринимались неоднократно.

С познавательной точки зрения заслуживает внимания система венгерского инженера Кандо.

Расщепитель фаз Кандо совмещал в себе однофазный синхронный двигатель и трехфазный синхронный генератор. После испытаний в 1930 году электровоза системы Кандо на линии Будапешт-Вена в Венгрии по системе однофазного тока частотой 50 Гц было электрифицировано 200 км железнодорожных линий.

Система Кандо от систем с синхронными расщепителями фаз выгодно отличалась обеспечением симметрии напряжений во вторичной цепи преобразователя, возможностью работы электровоза при высоком коэффициенте мощности и минимальных потерях в тяговых двигателях. Однако все преимущества в системе Кандо сводятся к нетривиально сложной конструкции преобразователя. Поэтому и эта система не получила распространения.

Для реализации идеи однофазно-трехфазной системы тяги Пунга и Шен разработали конструкцию однофазного тягового асинхронного двигателя, который выполнял функции и расщепителя фаз и трехфазного тягового двигателя. В двигателе Пунга-Шен в пространстве между статором и основным ротором размещался дополнительный промежуточный ротор, на котором размещались две обмотки – короткозамкнутая и постоянного тока. Магнитодвижущая сила обмотки постоянного тока обеспечивала синхронное с прямым полем однофазной обмотки вращение промежуточного ротора, а короткозамкнутая обмотка – гашение обратного поля этой обмотки. Вращающий момент создавался за счет взаимодействия оставшегося прямого поля однофазной статорной обмотки и основного ротора.

В преобразователе Пунга-Шен конструкция электрооборудования получалась более простой по сравнению с системой Кандо. В частности при напряжении 15 кВ питание электровоза осуществлялось непосредственно от контактной сети без установки тягового трансформатора. Однако конструктивно сложный тяговый двигатель и сложность регулирования его частоты вращения и реверсирования не способствовали распространению системы Пунга-Шен.

Чтобы устранить недостатки, обусловленные применением преобразователя числа фаз постоянной частоты, предпринимались попытки создания на базе электромашинных преобразователей электровозов с частотно-регулируемым асинхронным короткозамкнутым тяговым двигателем. В послевоенные годы партия таких электровозов мощностью 3030 кВт и массой 124 т для французских железных дорог (серия 14000) была изготовлена швейцарской фирмой Oerlikon. На электровозе применен синхронный расщепитель фаз, служивший источником питания ротора асинхронного расщепителя фаз, от статорных обмоток которого питались короткозамкнутые тяговые асинхронные двигатели. Частота тягового тока регулировалась изменением частоты вращения ротора асинхронного расщепителя фаз с помощью специального привода постоянного тока. Последний состоял из генератора, расположенного на валу расщепителя фаз, и двигателя постоянного тока, расположенного на одном валу с ротором преобразователя частоты.

Описанная система преобразования тока позволяла получать любую частоту тока статора тягового двигателя вплоть до 135 Гц и осуществить безреостатный пуск, рекуперативное торможение, хорошее распределение нагрузок между электровозами при кратной тяге. Причина ограниченного применения такой системы состояла, кроме металлоемкости и сложности электрооборудования, в неудовлетворительном распределении нагрузок между параллельно включен-

ными тяговыми двигателями и пониженном вращающем моменте при трогании с места, что обусловлено невозможностью форсировки амплитуды питающего двигателя напряжения для компенсации влияния падения напряжения на активном сопротивлении фазных обмоток при низких значениях частоты.

В 1930 году Керн предложил систему тяги однофазного тока на базе так называемого вентильного двигателя. Двигатель Керна конструктивно подобен синхронной электрической машине. Его статорная (якорная) обмотка, представляющая две шестифазные звезды, питались через один многоанодный ртутный выпрямитель – единственный работоспособный выпрямитель того времени. Обмотка возбуждения, расположенная на роторе, включена в цепь выпрямленного тока. При любом положении ротора выпрямленный ток протекал поочередно по проводникам двух звезд обмотки, расположенным в одном пазу. Таким образом, при неподвижном роторе создавалась неподвижная в пространстве м.д.с. обмотки якоря, в результате взаимодействия которой с полем ротора создавался вращающий момент. После поворота ротора на 60° ток коммутировался на две обмотки следующей фазы и тем самым создавалась непрерывность действия вращающего момента.

Схема Керна предполагает протекание тока в каждый момент времени только по одной двенадцатой части обмотки якоря и, таким образом, низкую степень использования этой обмотки. В связи с этим рядом исследователей были предложены более совершенные схемы электровозов с вентильными тяговыми двигателями. В частности, большой вклад в развитие вентильного тягового двигателя внесли работы Б. Н. Тихменева. Однако в полной мере идеи создания как вентильного, так и асинхронного частотнорегулируемого тягового привода смогли осуществиться только во второй половине XX столетия после разработки и создания современной полупроводниковой техники.

В тридцатых годах прошедшего столетия продолжались также работы по созданию системы тяги однофазного тока промышленной частоты с коллекторными двигателями постоянного и переменного тока. После 1936 года в Германии были построены электровозы с коллекторными однофазными двигателями на частоту 50 Гц. Они применялись на ряде участков Германии, Франции, Турции и Конго. Однако коллекторные тяговые двигатели на частоту 50 Гц являются менее надежными и более дорогими, чем двигатели постоянного и пульсирующего тока и вследствие этого их применение ограничивалось, главным образом, пассажирским и моторвагонным электроподвижным составом.

В канун второй мировой войны в Германии и СССР были созданы первые электровозы однофазно-постоянного тока с ртутными выпрямительными установками. Испытания этих электровозов показали перспективность применения такой системы тяги по тяговым свойствам, весовым и энергетическим показателям электроподвижного состава.

Разработка электроподвижного состава со статическими преобразователями возобновилась во Франции, СССР и США в послевоенные годы. В результате было найдено решение основных проблем, препятствовавших внедрению таких

электровозов (защита линий СЦБ и связи от влияния тяговой сети переменного тока и высших гармоник тягового тока, обеспечение нормальной по условиям коммутации работы тяговых двигателей и надежной работы ртутных выпрямителей с жидкостной системой охлаждения, обеспечение необходимого температурного режима работы выпрямителей и др.). В результате в СССР в 1960 году был создан и запущен в серию электровоз однофазного тока с ртутными выпрямителями Н60 (Новочеркасский шестиосный однофазный, впоследствии электровоз ВЛ60), а в 1967 году – восьмиосный электровоз ВЛ80.

Появление тиристоров открыло перспективы дальнейшего совершенствования электроподвижного состава переменного тока. Созданы электровозы однофазно-постоянного тока с более совершенными системами управления и системами рекуперативного торможения. Новый импульс получили работы по решению проблемы создания электроподвижного состава однофазного тока с бесколлекторным тяговым приводом – с вентильным, асинхронными, а в последнее время и с индукторными тяговыми двигателями.

В результате начатых в середине 60-х годов теоретических и экспериментальных исследований в 1970 году НЭВЗ создал первые в мире магистральные грузовые восьмиосные электровозы ВЛ80^В-661 с вентильным и ВЛ80^А с асинхронным тяговым приводом, мощность часового режима которых составляла соответственно 8000 кВт и 10000 кВт.

Однако построенный на базе обычных тиристоров электроподвижной состав с бесколлекторным тяговым приводом не мог заменить и вытеснить традиционный тяговый подвижной состав с коллекторными тяговыми двигателями. Его преимуществам, обусловленным применением вентильных или асинхронных тяговых двигателей, противостояли высокие затраты на преобразователи, сложные как по силовой части, так и по системам регулирования и управления.

Новые перспективы совершенствования бесколлекторного тягового привода открылись после разработки в 80-х годах запираемых тиристоров (GTO) и биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT).

После первого успешного применения запираемых тиристоров в тяговых преобразователях поездов ICE1, заказанных бывшими железными дорогами ФРГ для скоростного пассажирского движения, было осуществлено несколько крупных проектов по разработке электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом.

Значительным достижением стало создание тиристоров GTO на обратное напряжение 6500 В. Благодаря полученной возможности прямого включения инвертора на контакторную сеть постоянного тока напряжением 1500 В и 3000 В были созданы простые преобразователи без входного регулятора с пониженной массой, меньшими габаритами, повышенной надёжностью и меньшим уровнем потерь энергии.

К недостаткам запираемых тиристоров относятся высокие коммутационные потери в процессе запираания, а также затраты на вспомогательные цепи и схемы управления. Транзисторы IGBT в проводящем состоянии обладают близки-

ми к тиристорам GTO характеристиками и при меньших коммутационных потерях обеспечивают более высокую частоту переключений.

Впервые построенный на тиристорах IGBT тяговый преобразователь применен в 1993 году компанией Simens на трамвае с пониженным уровнем пола для Франкфурта-на-Майне. В 2003 году на железных дорогах Германии в постоянной эксплуатации появился разработанный этой же компанией четырехосный электровоз серии 189, оснащенный тяговым преобразователем на транзисторах IGBT с обратным напряжением 6500 В, и асинхронными тяговыми двигателями с мощностью продолжительного режима 1600 кВт. Электровоз серии 189 является четырехсистемным и предназначен для работы на участках, электрифицированных на переменном токе (15 кВ, 16,66 Гц и 25 кВ, 50 Гц) и постоянном токе (1,5 кВ и 3,0 кВ). Технически эти электровозы могут обращаться на железных дорогах 24 стран.

Преобразователями на транзисторах IGBT оснащен также электровоз однофазного тока с асинхронным тяговым приводом ДСЗ, созданный совместно НПК «ДЭВЗ» и компанией Simens.

В настоящее время благодаря применению тяговых преобразователей на тиристорах IGBT трехфазный частотно-регулируемый асинхронный привод стал стандартным элементом подвижного состава и им оснащается большинство нового электроподвижного состава, в том числе и электроподвижной состав для высокоскоростного движения.

В эксплуатации находится также электроподвижной состав с вентильными тяговыми двигателями. В частности, таким типом привода оснащены скоростные поезда TGV второго и третьего поколений и опытные пассажирские электровозы ЭП100 и ЭП200, разработанные ОАО ХК «Коломенский завод».

Таким образом, на железных дорогах мира в настоящее время находят применение электровозы постоянного тока, однофазно-постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями, однофазного тока и многосистемные с бесколлекторным тяговым (вентильным и асинхронным) приводом.

В.4 Тенденции развития видов тяги на железных дорогах мира

В промышленно развитых странах мира, имеющих потребность в освоении больших грузо- и пассажиропотоков, основные объемы перевозок осуществляются на электрической тяге. По состоянию на начало XXI века общая протяженность железных дорог мира приблизилась к 1 млн. км. Из них 25% железных дорог (238,5 тыс. км) электрифицировано, а 75% (720 тыс. км) работает на тепловозной тяге. На электрических железных дорогах осуществляется 50% мирового объема перевозок. В Европе объем перевозок на электрической тяге составляет 70%. В среднем грузонапряженность электрифицированных железных дорог мира в три раза превышает этот показатель для линий с тепловозной тягой.

Между континентами и регионами мира электрифицированные железные дороги распределены следующим образом:

Западная, Центральная и Восточная Европа	45,7%;
страны СНГ	24,3%;
Юго-Восточная Азия (в основном Япония, Китай, Индия)	20,0%;
Африка (в основном за счет ЮАР)	8,0%;
Северная и Южная Америка	2,0%.

Системы тяги по родам тока имеют такой удельный вес:

переменный ток:	55,1%;
в том числе: 25 кВ 50Гц	40,5%
15 кВ $16\frac{2}{3}$ Гц	14,6%;
постоянный ток:	43,0%;
в том числе: 3 кВ	35,2%;
1,5 кВ	7,8%.

Другие системы тягового электроснабжения (переменного тока: 50 кВ 50 Гц, 11-13 кВ 25 Гц, 15 кВ 20 Гц и постоянного тока: 0,75 и 0,60 кВ) используются на 2% протяженности электрифицированных железных дорог мира (4,5 тыс. км).

Начиная с 60-70 г.г. железные дороги мира электрифицируются, в основном, на переменном токе промышленной частоты 25 кВ при незначительном приросте протяженности полигона постоянного тока.

В подходе к использованию электрической тяги контрастом представляется Американский континент, где основные объемы перевозок осуществляются тепловозной тягой. Такое положение объясняется не только сравнительно невысокой грузонапряженностью американских железных дорог и благоприятным для тепловозной тяги соотношением цен на электроэнергию и нефтепродукты, но, главным образом, «местными традициями агрессивного маркетинга» [5]. Его основой является политика гарантий и скидок для опта, протекционизма, сравнительно низких цен на дизельное топливо, предоставление тепловозов в аренду. Широкому внедрению тепловозной тяги на американском континенте способствовала унификация тепловозов по основным энергосиловым узлам. Благодаря этому две фирмы – Дженерал Электрик и Дженерал Моторс полностью контролируют и обеспечивают огромный рынок производства тепловозов для всего мира.

По мнению международных экспертов для стран с развитой железнодорожной сетью (аналогичной сети железных дорог Украины) оптимальным является электрификация 50-60% протяженности железных дорог при выполнении ими 80-90% общего объема перевозок.

Однако анализ перспектив обеспечения транспорта жидкими теплоносителями показывает, что в дальнейшем критические значения грузонапряженности железных дорог, являющиеся критерием целесообразности их электрификации, могут быть существенно скорректированы в пользу электрической тяги. В прогнозах компетентных органов (например, МЭК) указываются следующие объемы разведанных мировых запасов носителей энергии: нефти – на 40-50 лет, газа – на 50-60 лет, угля – на 200-400 лет. Поскольку Украина располагает только

значительными запасами угля, то в будущем основные тенденции энергетической стратегии Украины в наибольшей степени будут определяться необходимостью усиления роли электроэнергетики, напрямую не зависящей от вида первичного энергоносителя. Поэтому следует отметить усиление переориентации тепловых электростанций страны с газа на наименее дефицитный и наиболее дешевый энергоноситель – уголь. Отмеченное обстоятельство обусловит дальнейший рост полигона электротяги.

Аналогичные тенденции развития видов тяги характерны также для стран, имеющих большие запасы альтернативных каменному углю энергоносителей. Например, Российская Федерация владеет 13% разведанных мировых запасов нефти, 40% газа и 30% угля. Вместе с тем энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2020 года не предусматривает значительного расширения объемов добычи нефти. По этой причине российские эксперты прогнозируют рост дефицитности всех видов жидкого топлива для внутренних потребителей, что в конкурентной среде неизбежно будет приводить к росту цен на дизельное топливо.

Учитывая прогноз обеспечения транспорта энергоносителями Министерство транспорта Российской Федерации, которая располагает 17% мирового полигона электрифицированных дорог, приняло стратегическое решение о дальнейшей электрификации железных дорог. Это решение нашло отражение в «Программе электрификации участков железных дорог и переключение грузопотоков с тепловозных на электрифицированные хода», которая предусматривает электрификацию в течение 2001-2010 г.г. 7640 км железнодорожных линий.

В большинстве промышленно развитых стран тепловозная тяга используется для осуществления перевозок на слабозагруженных и малоделятельных участках, которые имеют большое социальное значение с точки зрения обеспечения жизнедеятельности населения в слаборазвитых регионах. Учитывается также большое значение тепловозной тяги как прикрытия для электрифицированных линий при возникновении на них аварийных ситуаций, а также военно-стратегическое значение этого вида тяги.

Глава 1

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА

1.1. Постановка задачи об управляемом движении поезда

Основная задача теории тяги поезда состоит в исследовании и расчете параметров движения поезда.

Движение поезда, как и любой системы, происходит в пространстве и времени, поэтому его поведение определяется изменением фазовых координат состояния в функции времени. Поезд представляет собой сложную систему упруго или жестко связанных друг с другом тел, поэтому его движение по рельсовой колее в заданном направлении сопровождается не только вращением колесных пар и элементов тяговых передач, но и колебательными движениями отдельных частей поезда.

Движение свободного тела, имеющего шесть степеней свободы в трехмерном пространстве, в классической механике описывается шестью дифференциальными уравнениями. Если же поезд представить в виде системы, состоящей из n связанных между собой тел (локомотива и вагонов), то для описания её движения потребуется в n раз больше уравнений. Поэтому создание математической модели движения поезда с описанием поведения каждого его вагона приводит к задаче, трудноразрешимой даже с помощью современных средств вычислительной техники.

В теории тяги рассматривается только полезное поступательное движение поезда по рельсовой колее. При этом принимаются во внимание только факторы, значимые для такого перемещения. Такой подход позволяет использовать для практических расчетов математическую модель движения поезда, полученную на основе следующих допущений.

Допущение 1. Движение поезда представляется как движение материальной точки с одной степенью свободы. Число степеней свободы системы тел определяется числом удерживающих связей. Степень свободы целенаправленного движения поезда определяют автосцепные устройства и рельсовая колея. Будем считать, что автосцепные устройства являются внутренними связями, которые обеспечивают движение всех вагонов в одном направлении с одинаковой скоростью и ускорением. Рельсовая колея играет роль внешних связей, обеспечивающих движение всех частей поезда по одной траектории. Таким образом из сказанного следует, что при решении задач теории тяги, когда рассматривается только полезное перемещение поезда без учета взаимных перемещений и колебательного движения подвижного состава, модель можно построить, рассматривая движение поезда как поступательное движение неизменяемой системы с одной степенью свободы. В классической механике такое движение описывается как движение материальной точки, в которой сконцентрирована вся масса системы, приведенная к ее центру инерции. Это позволяет описать движение поезда одним дифференциальным уравнением, как движение имеющей одну степень свободы материальной точки, расположенной в центре

тяжести поезда и обладающей его массой. Такой подход существенно упрощает тяговые расчеты, хотя и вносит в них некоторую погрешность.

Допущение 2. Для расчета движения поезда в тяговых расчетах достаточно учитывать только внешние силы, которые определяют полезное перемещение поезда и совпадают с его направлением. Это допущение является следствием допущения 1, согласно которому поезд рассматривается как неизменяемая система. В таких системах внутренние силы взаимно уравновешиваются, а их работа равна нулю.

Характер движения поезда при принятых выше допущениях однозначно определяется изменением во времени только двух координат состояния – скорости поступательного движения v и пройденного пути s . Поэтому при определении параметров движения поезда определяют зависимости скорости от времени $v(t)$ и пройденного пути от времени $s(t)$. Графическое изображение этих функций называется кривыми движениями поезда. Их определяют путем решения уравнения движения.

1.2. Вывод уравнения движения поезда

Уравнением движения поезда в теории тяги принято называть математическую модель движения поезда, построенную на основе принятых выше допущений о характере движения поезда и действующих на него сил, поэтому, по сути, **уравнение движения поезда представляет выраженную в дифференциальной форме взаимосвязь фазовых координат состояния поезда и действующих на него сил в виде системы дифференциальных уравнений, выражающих второй закон динамики применительно к движущемуся поезду.**

Теория тяги изучает поступательное полезное перемещение поезда, поэтому в соответствии с принятыми выше допущениями при выводе уравнения движения представим поезд как несвободную материальную точку, обладающую его массой и движущуюся под действием ориентированной по направлению перемещения силы $F_{\text{о}}$ (см. рис. 1.1).

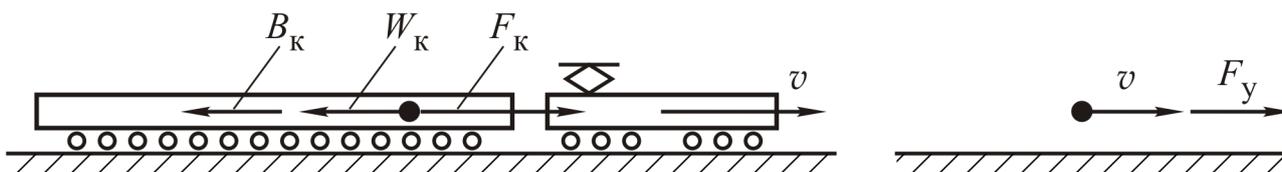


Рис. 1.1

Действующие по направлению движения поезда силы в теории локомотивной тяги сводятся к трём силам:

- сила сопротивления движению подвижного состава $W_{\hat{e}}$;
- тормозная сила (искусственно созданная сила сопротивления движению) $B_{\hat{e}}$;
- сила тяги локомотива $F_{\hat{e}}$.

Силы тяги и тормозная являются управляемыми, а силы сопротивления движению называют неуправляемыми. Принято считать, что сила тяги $F_{\hat{e}}$ положительна, если её направление совпадает с направлением движения, а сила сопротивления движению и тормозная силы положительны, если направлены встречно движению поезда.

При принятых обозначениях равнодействующая сила F_y в абсолютных величинах равна алгебраической сумме

$$F_y = F_{\hat{e}} - W_{\hat{e}} - B_{\hat{e}}. \quad (1.1)$$

Направление результирующей силы F_y определяется знаком и модулем её составляющих.

Вывод дифференциального уравнения движения поезда основан на использовании теоремы о кинетической энергии системы [3]: изменение кинетической энергии механической системы при некотором её перемещении равно алгебраической сумме работ на этом перемещении всех сил, как внешних, так и внутренних.

Согласно допущению 2 работа внутренних сил в поезде равна нулю, поэтому в соответствии с расчетной схемой рис. 1.1 изменение кинетической энергии поезда равно

$$dA_{\hat{e}} = (F_{\hat{e}} - W_{\hat{e}} - B_{\hat{e}}) ds. \quad (1.2)$$

Откуда
$$\frac{dA_{\hat{e}}}{ds} = F_{\hat{e}} - W_{\hat{e}} - B_{\hat{e}}$$

Согласно теореме Кёнига кинетическая энергия неизменяемой механической системы равна сумме кинетических энергий поступательного движения всей массы системы со скоростью её центра масс и кинетической энергии вращательного движения её вокруг центра инерции.

При прямолинейном движении поезда его вращение вокруг центра инерции отсутствует и имеет место только вращение отдельных его частей (якорей тяговых двигателей, колесных пар подвижного состава, элементов тяговых передач, подвагонных генераторов пассажирских вагонов и т.п.). Поэтому применительно к поезду теорему Кёнига следует сформулировать так: кинетическая энергия поезда равна сумме кинетической энергии поступательного движения всей массы поезда со скоростью его центра масс и кинетической энергии вращательного движения вращающихся частей поезда вокруг своих центров вращения. При этом имеются ввиду только вращающиеся части, изменение кинетической энергии которых обуславливается изменением координат положения поезда. Для колесно-рельсового транспорта такими частями есть локомотивные и вагонные колесные пары.

Пусть в общем случае поезд содержит k типов колесных пар, отличающихся величиной моментов инерции или радиусами колес. Тогда кинетическая энергия поезда

$$A_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k n_i J_i \omega_{\text{к}i}^2,$$

где m – физическая масса поезда;

J_i , $\omega_{\text{к}i}$ – момент инерции и угловая скорость колесной пары i -го типа;

n_i – количество осей i -го типа в поезде.

Выразив угловую скорость колесной пары через скорость движения поезда, получим

$$A_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k n_i J_i \frac{v^2}{R_{\text{к}i}^2},$$

где $R_{\text{к}i}$ – радиус круга катания колесной пары i -го типа.

Последнее выражение преобразуем к виду

$$A_{\text{к}} = (m + m_{\text{э}}) \frac{v^2}{2},$$

где

$$m_{\text{э}} = \sum_{i=1}^k n_i J_i / R_{\text{к}i}^2 \quad (1.3)$$

имеет размерность массы и называется эквивалентной массой вращающихся частей поезда.

Так как для конкретного поезда величина $m_{\text{э}}$ постоянна, то введя обозначение

$$\gamma = \frac{m_{\text{э}}}{m}, \quad (1.4)$$

выражение для кинетической энергии поезда преобразуем к виду

$$A_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} (1 + \gamma). \quad (1.5)$$

Величину $1 + \gamma$ принято называть коэффициентом инерции вращающихся частей, а произведение

$$m_{\text{п}} = m(1 + \gamma) \quad (1.6)$$

– приведенной массой поезда.

Таким образом, поезд, имеющий физическую массу m и вращающиеся части, эквивалентен поезду, который не имеет вращающихся частей, но масса которого равна $m_{\text{п}}$.

Разделив левую и правую часть производной (1.5) по скорости на ds , найдем

$$\frac{dA_{\text{к}}}{ds} = m(1 + \gamma) \frac{v dv}{ds}, \quad (1.7)$$

а приравняв правые части (1.2) и (1.7), получим

$$F_{\text{к}} - W_{\text{к}} - B_{\text{к}} = m(1 + \gamma) \frac{v dv}{ds}. \quad (1.8)$$

Учитывая, что $ds = v dt$, представим (1.8) как

$$F_{\text{к}} - W_{\text{к}} - B_{\text{к}} = m(1 + \gamma) \frac{dv}{dt}. \quad (1.9)$$

Уравнения (1.8) и (1.9) называют соответственно первой и второй формой уравнения движения. Они выражают закон механического движения поезда в соотношениях, существующих на каждый момент времени между управляющими силами, массой и ускорением с учетом инерции вращающихся масс. Эти уравнения при заданных фазовых координатах пути и скорости определяют механическое состояние поезда и позволяют определить дальнейшее его движение.

1.3. Уравнение движения поезда как уравнение движения несвободной материальной точки

Уравнение движения поезда можно получить также на базе основных положений кинематики и динамики материальной точки.

Пусть материальная точка, масса которой равна массе поезда m , движется по заданной криволинейной траектории (рис. 1.2, а) от точки M_0 к точке M_1 . Так как исходное положение точки (M_0) известно и в каждый момент времени точка занимает на траектории вполне определенное положение, то каждому значению времени t соответствует конкретное значение дуговой координаты s . Стало быть, дуговая координата движущейся точки есть однозначной и непрерывной функцией времени $s = f(t)$. В теоретической механике указанную функцию называют **законом движения точки по данной траектории**, а график зависимости $s = f(t)$ называют **графиком движения**.

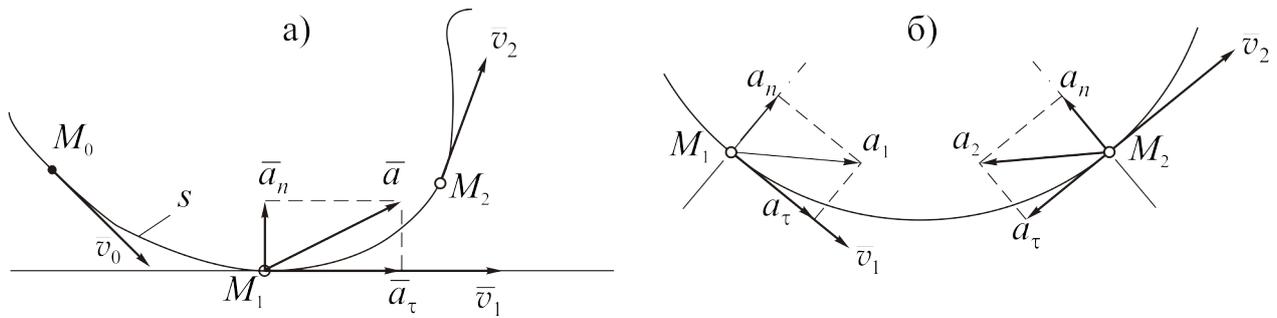


Рис. 1.2. Движение несвободной материальной точки

Скорость точки при движении по криволинейной траектории направлена по касательной к траектории и в каждый момент времени характеризует быстроту и направление перемещения. Вектор ускорения \bar{a} точки имеет нормальную \bar{a}_n и тангенциальную (касательную) \bar{a}_τ составляющие (см. рис. 1.2, а).

Модуль тангенциальной составляющей ускорения равен производной скорости по времени или второй производной дуговой координаты по времени:

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}; \quad a_\tau = \frac{d^2s}{dt^2}. \quad (1.10)$$

а её направление, как и скорости, совпадает с касательной к траектории движения.

Нормальное ускорение \bar{a}_n направлено по главной нормали траектории в сторону её вогнутости и по модулю равно

$$a_n = \frac{v^2}{R}, \quad (1.11)$$

где R – радиус кривизны траектории.

Если траектория представляет плоскую круговую кривую, то нормальное ускорение направлено всегда по радиусу окружности к её центру и называется центростремительным.

Рассмотрим движение точки под действием сил F_y , Q_n и N , направление действия которых показано на рис. 1.2, б.

Сила \bar{F}_y равна алгебраической сумме сил сопротивления движению, силы тяги и тормозной силы (см. выражение (1.1)) и ориентирована по направлению движения.

Сила Q_n – горизонтальная составляющая силы тяжести, которая возникает в кривых пути, имеющих возвышение наружного рельса. Эта сила направлена по нормали кривой в сторону её вогнутости.

N – сила реакции связей. В реальных условиях эта сила представляет горизонтальную реакцию путевой структуры на действие экипажной части подвижного состава и называется направляющей силой. Если при движении трение отсутствует, то направляющая сила направлена по нормали к траектории.

Равнодействующая сил F_y , Q_n и N , показанная на рис. 1.2, б пунктиром, совпадает по направлению с ускорением \bar{a} .

С учетом принятых обозначений на основании второго закона Ньютона будем иметь векторное уравнение

$$\bar{F}_y + \bar{N} + \bar{Q}_n = m\bar{a}.$$

Проектируя обе части этого уравнения на касательную и нормаль траектории (естественные оси), найдем:

$$F_y = ma_\tau; \quad N + Q_n = ma_n.$$

Изменив с учетом (1.10) и (1.11) форму записи приведенных уравнений, получим уравнение движения поезда в так называемой форме Эйлера:

$$F_y = m \frac{dv}{dt}; \quad (1.12)$$

$$Q_n + N = m \frac{v^2}{R}. \quad (1.13)$$

Заменив в уравнении (1.12) физическую массу поезда m на приведенную $m(1 + \gamma)$, получим уравнение движения (1.9). Путем его интегрирования определяют параметры движения поезда в виде зависимости $v(t)$ или $s(t)$. Уравнение (1.13) позволяет определить направляющую силу N .

1.4. Коэффициент инерции вращающихся масс

Грузовые и пассажирские поезда обычно включают подвижной состав, отличающийся значениями γ (локомотивы, грузовые вагоны груженые и порожние, пассажирские вагоны). В этом случае средневзвешенное для поезда значение γ определяется следующим образом.

Пусть в состав поезда включено k типов подвижного состава и i -й тип характеризуется коэффициентом

$$\gamma_i = \frac{m_{\Sigma i}}{m_i}, \quad (1.14)$$

где m_i и $m_{\Sigma i}$ – физическая масса и суммарная эквивалентная масса вращающихся частей подвижного состава i -го типа.

Эквивалентная масса вращающихся частей подвижного состава каждого типа рассчитывается по формуле (1.3), которую для общего случая представим как

$$m_{\text{э}} = \frac{n_{\text{д}} J_{\text{д}}}{R_{\text{кд}}^2} + \frac{n_{\text{д}} J_{\text{я}} \mu^2}{R_{\text{кд}}^2} + \frac{n_{\text{п}} J_{\text{п}}}{R_{\text{кп}}^2}, \quad (1.15)$$

где $n_{\text{д}}$, $n_{\text{п}}$ – соответственно количество движущих и поддерживающих осей в составе поезда;

$J_{\text{д}}$, $R_{\text{д}}$ – момент инерции и радиус круга катания движущих колёсных пар;

$J_{\text{п}}$, $R_{\text{п}}$ – момент инерции и радиус круга катания поддерживающих колёсных пар;

$J_{\text{я}}$ – момент инерции якоря тягового двигателя;

μ – передаточное отношение тягового редуктора.

Коэффициент γ , как следует из выражений (1.4) и (1.15) зависит от типа подвижного состава и степени его загрузки. Он тем больше, чем больше количество, масса и диаметр вращающихся частей и тем меньше, чем больше физическая масса транспортного средства. Коэффициент инерции вращающихся масс вагонов с грузом или пассажирами всегда меньше, чем порожних вагонов. Самые высокие значения γ относятся к грузовым электровозам, которые имеют большую массу вращающихся частей (колёсная пара, зубчатые колёса тягового редуктора и якоря тягового двигателя) и большое передаточное отношение тягового редуктора.

Очевидно, что для поезда

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^k m_{\text{э}i}}{m},$$

где физическая масса поезда

$$m = \sum_{i=1}^k m_i$$

Поскольку $m_{\text{э}i} = \gamma_i m_i$, то

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^k \gamma_i m_i}{m} \quad \text{или} \quad \gamma = \sum_{i=1}^k \alpha_i \gamma_i, \quad (1.16)$$

где $\alpha_i = \frac{m_i}{m}$ – доля массы подвижного состава i -го типа в массе поезда.

Для решения практических задач достаточную точность дают значения $(1 + \gamma)$, приведенные в табл. 1.1.

Коэффициент $1 + \gamma$ для разных типов подвижного состава

Тип подвижного состава	$1 + \gamma$
Электровозы	1,20÷1,300
Электровозы: ВЛ8, ВЛ23 ($\mu = 3,905$)	1,242
ВЛ60, ВЛ10, ВЛ11 ($\mu = 3,826$)	1,265
ВЛ80 ^к , ВЛ8 ^с , ВЛ80 ^р ($\mu = 4,19$)	1,275
ЧС6, ЧС8, ЧС7, ЧС2	1,190
Моторные вагоны пригородных электропоездов и метрополитенов	1,08-1,12
Прицепные вагоны электропоездов и пассажирские вагоны	1,04-1,05
Грузовые вагоны четырехосные и шестиосные: порожние	1,08-1,09
груженные	1,04-1,06
Трамвайные вагоны: моторные	1,09-1,15
прицепные	1,05-1,08
Троллейбусы	1,15÷1,20

1.5. Размерности физических величин и практические формы представления уравнения движения

В Украине для механических, электрических и других измерений согласно ГОСТ 9867-61 применяется Международная система единиц (СИ). Её основными единицами есть: килограмм, метр, секунда и ампер.

До ввода в практику измерений Международной системы единиц в теории локомотивной тяги, как и в большинстве относящихся к области железнодорожного транспорта дисциплин, применялась система МкГСС, основные единицы которой: килограмм-сила, секунда, метр, ампер.

Различие в применении единиц СИ и МкГСС обуславливается различием единиц измерения силы и массы.

Впервые в практику тяговых расчетов единицы СИ частично были введены при разработке Правил производства тяговых расчетов для поездной работы (ПТР), утвержденных МПС СССР в 1980г. [4]. В этом документе впервые вместо понятия вес (поезда, вагона, состава и т.п.) используется понятие масса. Эта замена вносит в практику тяговых расчетов как положительные, так и отрицательные моменты.

Положительно следующее. Прежде всего, использование понятия масса при переходе с единиц МкГСС на единицы СИ целесообразно из чисто практических соображений: желательно сохранить привычное в эксплуатации измерение веса или массы в тоннах. Во-вторых, понятие масса поезда – более строгое и корректное. **Масса является мерой инертности тела и есть величиной скалярной.** Она не зависит от величины ускорения свободного падения. Поэтому при реальных скоростях движения масса конкретного поезда есть величина постоянная. **Вес поезда, как сила, действующая на опору,** зависит, строго говоря, от удаленности от центра Земли и от ускорения, с которым поезд перемещается по отношению к центру Земли в процессе движения.

Однако использование понятия масса при измерении силы в единицах СИ (ньютон и килоньютон) приводит к усложнению расчетных выражений и алгоритмов, а также затрудняет использование разработанной ранее технической документации и справочной литературы, рассчитанной на использование единиц МКГСС. Чтобы снять эти затруднения по согласованию с Госстандартом СССР в ПТР вместо ньютона используется единица силы килограмм-сила.

В данной книге, если нет особых оговорок, используются основные единицы СИ, а также единицы, представляющие собой десятичные кратные значения основных единиц СИ (килоньютон, километр, тонна, килоампер и т.п.). Употребляется как понятие вес так и понятие масса поезда (локомотива, состава, вагона).

Уравнения движения в форме (1.8) и (1.9) могут быть использованы при применении основных единиц измерения физических величин. Однако на практике часто используются единицы, кратные основным, и производные единицы. Поэтому в общем случае для соблюдения правила когерентности (согласованности) в уравнения (1.8) и (1.9) вводят коэффициенты ζ и ζ' и записывают их в виде:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\zeta}{(1+\gamma)m} (F_{\hat{e}} - W_{\hat{e}} - B_{\hat{e}}); \quad (1.17)$$

$$\frac{v dv}{ds} = \frac{\zeta'}{(1+\gamma)m} (F_{\hat{e}} - W_{\hat{e}} - B_{\hat{e}}). \quad (1.18)$$

В тяговых расчетах вместо абсолютных значений действующих на поезд сил удобно использовать удельные, то есть отнесенные к 1 кН веса G поезда (локомотива, вагона и т.д.), значения:

силы тяги $f_{\hat{e}} = \frac{F_{\hat{e}}}{G}$ или $f_{\hat{e}} = \frac{F_{\hat{e}}}{9,81m}$; (1.19)

силы сопротивления движению

$$w_{\hat{e}} = \frac{W_{\hat{e}}}{G} \quad \text{или} \quad w_{\hat{e}} = \frac{W_{\hat{e}}}{9,81m}; \quad (1.20)$$

и тормозной силы

$$b_{\hat{e}} = \frac{B_{\hat{e}}}{G} \quad \text{или} \quad b_{\hat{e}} = \frac{B_{\hat{e}}}{9,81m}. \quad (1.21)$$

Умножив и разделив правые части (1.17) и (1.18) на 9,81, с учетом (1.19)-(1.21) представим удельную равнодействующую силу как

$$f_y = f_{\hat{e}} - w_{\hat{e}} - b_{\hat{e}}, \quad (1.22)$$

а уравнения движения в виде:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{1+\gamma} (f_k - w_k - b_k); \quad (1.23)$$

$$\frac{v dv}{ds} = \frac{\xi'}{1+\gamma} (f_k - w_k - b_k), \quad (1.24)$$

где $f_{\hat{e}}$, $w_{\hat{e}}$ и $b_{\hat{e}}$ представляют собой удельные значения соответственно силы тяги, силы сопротивления движения и тормозной силы, а коэффициенты ξ и ξ' определяются как $\xi = 9,81\zeta$ и $\xi' = 9,81\zeta'$. Отметим, что определяемую по (1.22) равнодействующую силу часто называют удельной ускоряющей силой.

Значения коэффициентов ξ и ξ' определяются принятыми единицами измерения физических величин. Основным единицам СИ соответствует $\xi = \xi' = 1$.

Другим, встречающимся на практике сочетаниям единиц измерения физических величин, соответствуют значения коэффициентов ξ и ξ' , представленные в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Единицы измерения физических величин и значения коэффициентов ξ и ξ' в уравнениях движения

Время t	Расстояние s	Скорость движения v	Масса по- езда m	Вес по- езда G	Сила	Удельная сила	ξ	ξ'
ч	км	км/ч	–	кН	Н	Н/кН	127,0	127,0
ч	м	км/ч	–	кН	Н	Н/кН	127,0	0,127
ч	км	км/ч	т	–	кГс	кГс/т	127,0	127,0
ч	м	км/ч	т	–	кГс	кГс/т	127,0	0,127
с	м	м/с	кг	–	Н	Н/кг	1,00	1,00
с	м	м/с	т	–	Н	Н/т	0,001	0,001
с	км	м/с	т	–	Н	Н/т	0,001	1,0
ч	м	км/ч	т	–	Н	Н/т	12,96	0,01296
ч	км	км/ч	т	–	Н	Н/т	12,96	12,96

Множитель $\xi/(1+\gamma)$ в уравнении (1.23) численно равен ускорению поезда при приложении к нему удельной равнодействующей силы, равной единице (в принятых единицах измерения).

На практике при решении задач по тяге поездов, в частности при расчете кривых движения, обычно используют единицы измерения, приведенные в двух первых строчках табл. 1.2 при следующих значениях $\xi/(1+\gamma)$:

– грузовые и пассажирские поезда.....	120
– электропоезда	119
– дизель-поезда.....	116
– одиночно следующие:	
электровозы	107
пассажирские тепловозы	118
грузовые тепловозы	112
паровозы.....	121

Действующие Правила тяговых расчетов допускают применение для расчета кривых движения поезда и решения тормозных задач единиц измерения физических величин, приведенных в строчках 3 и 4 табл. 1.2

Отметим, что приведенные выше значения множителя $\xi/(1+\gamma)$ в уравнении движения имеют место как при использовании единиц СИ, приведенных в строчках 1 и 2 табл. 1.2, так и единиц измерения, приведенных в строчках 3 и 4.

В зависимости от комбинации действующих на поезд сил различают три основных режима движения: режим тяги (или движение под током), режим выбега (движение без тока) и режим торможения.

В режиме тяги поезд перемещается под действием силы тяги и уравнение движения принимает вид

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{1+\gamma} (f_k - w_k). \quad (1.25)$$

В режиме выбега тяговые двигатели отключены от контактной сети и движение поезда осуществляется за счет накопленной кинетической и потенциальной энергии. Так как в этом режиме $f_{\hat{e}} = 0$ и $b_{\hat{e}} = 0$, то

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\xi}{1+\gamma} w_k. \quad (1.26)$$

При торможении $f_{\hat{e}} = 0$, поэтому движение поезда определяет сила сопротивления движению и тормозная сила, которая создается искусственно за счет тормозных средств поезда. Уравнение движения принимает вид

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\xi}{1+\gamma} (w_k + b_k). \quad (1.27)$$

Из выражений (1.23) и (1.24) видно, что фазовые координаты состояния поезда (или кривые движения) определяются силой тяги, сопротивлением движению и тормозной силой. Физические основы образования и методы расчета этих сил рассмотрены в последующих главах.



ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ТОМ I



Г. К. ГЕТЬМАН