



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ю.Е. АТАМАНОВ
В.Н. ПЛИЦ

Теория подвижного состава городского электрического транспорта

*Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-37 01 05
«Городской электрический транспорт»*



Минск
БНТУ
2012

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Ю.Е. Атаманов
В.Н. Плищ

ТЕОРИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-37 01 05
«Городской электрический транспорт»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области транспорта и транспортной деятельности*

Минск
БНТУ
2012

УДК 629.433.015 (076.5)

ББК 39.83я73-5

А 92

Р е ц е н з е н т ы:

Заведующий кафедрой «Тракторы и автомобили» Белорусского государственного аграрно-технического университета,
доктор технических наук *А.И. Бобровник*,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили»
Белорусского национального технического университета
Л.А. Молибошко

Добровольский, И.Г.

А 92 Теория подвижного состава городского электрического транспорта: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт» / Ю.Е. Атаманов, В.Н. Плищ. – Минск: БНТУ, 2012. – 236 с.

ISBN 978-985-525-727-2.

Изложены тематика лекционных, лабораторных и практических занятий, требования к оформлению отчетов и выполнению данных работ, приведено большое число задач по всем разделам дисциплины «Теория подвижного состава». Часть задач приведена с полным решением, что позволит студентам самостоятельно освоить методику решения задач по различным темам дисциплины. Большое внимание уделено методическим указаниям для выполнения курсовой работы. Подробно описаны все разделы курсовой работы и даны численные примеры выполнения расчетов и их оформления, требования к записке и защите курсовой работы. В конце пособия даны приложения, в которых приведены характеристики взаимодействия шины с дорогой и колеса с рельсом, массы некоторых узлов троллейбусов и трамваев, нормативные данные по колебаниям подвижного состава и другие полезные сведения.

УДК 629.433.015 (076.5)
ББК 39.83я73-5

ISBN 978-985-525-727-2

© Атаманов Ю.Е.,
Плищ В.Н., 2012
© БНТУ, 2012

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ВВЕДЕНИЕ	7
1. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	
«ТЕОРИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА»	12
1.1. Время, отводимое на изучение дисциплины	12
1.2. Темы лекций	13
1.2.1. <i>Общая характеристика и классификация подвижного состава городского электрического транспорта</i>	13
1.2.2. <i>Механическая система «подвижной состав–опорная поверхность»</i>	13
1.2.3. <i>Условия работы подвижного состава ГЭТ и системы электроснабжения</i>	13
1.2.4. <i>Взаимодействие колесного движителя с опорной поверхностью</i>	13
1.2.5. <i>Тягово-скоростные свойства подвижного состава ГЭТ</i>	14
1.2.6. <i>Тормозные свойства подвижного состава ГЭТ</i>	14
1.2.7. <i>Криволинейное движение подвижного состава ГЭТ</i>	15
1.2.8. <i>Устойчивость подвижного состава ГЭТ</i>	15
1.2.9. <i>Колебания и плавность хода подвижного состава ГЭТ</i>	15
1.2.10. <i>Тяговые электрические двигатели подвижного состава ГЭТ</i>	15
2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	16
2.1. Методические указания к лабораторным работам	16
2.2. Тематика лабораторных работ	18
3. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ	19
3.1. Методические указания к практическим работам.....	19
3.2. Задачи	20
3.2.1. <i>Взаимодействие подвижного состава с внешней средой</i>	20
3.2.2. <i>Тягово-скоростные свойства подвижного состава</i>	37
3.2.3. <i>Тормозные свойства подвижного состава</i>	53
3.2.4. <i>Устойчивость подвижного состава</i>	68

3.2.5. Криволинейное движение (управляемость) подвижного состава	78
3.2.6. Маневренность и проходимость подвижного состава	95
3.2.7. Колебания и плавность хода подвижного состава ..	109
4. ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ	122
5. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ И ЗАДАНИЙ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	123
6. ДИАГНОСТИКА КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТА	123
7. КУРСОВАЯ РАБОТА	124
7.1. Цель и задачи курсовой работы	124
7.2. Структура пояснительной записки	125
7.3.. Защита курсовой работы.....	127
7.4. Оформление основных разделов пояснительной записки.....	128
7.4.1. Титульный лист	128
7.4.2. Бланк-задание	128
7.4.3. Реферат	128
7.4.4. Содержание	129
7.4.5. Введение	129
7.4.6. Тягово-динамический расчет подвижного состава ..	130
7.4.7. Построение динамической характеристики подвижного состава	201
7.4.8. Определение разгонных свойств подвижного состава	207
7.4.10. Определение величины преодолеваемого подъема	215
7.4.11. Индивидуальное задание	221
7.4.12. Заключение	221
7.4.13. Предметный указатель	221
7.4.14. Список использованных источников.....	222
7.4.15. Приложения	223
7.5. Темы курсовых работ	223
ЛИТЕРАТУРА	228
ПРИЛОЖЕНИЯ	230
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	235

Предисловие

Данное учебно-методическое пособие является продолжением книг [1–6], которые были изданы в течение 1999–2008 годов. Цель данного издания дать студентам специальности «Городской электрический транспорт» практические материалы для изучения дисциплины «Теория подвижного состава». Настоящее учебно-методическое пособие состоит из нескольких разделов и приложения, в котором представлены основные технические характеристики белорусских троллейбусов и трамваев, данные по коэффициентам сцепления шины с дорогой и колеса с рельсом, коэффициенты сопротивления движению и другая необходимая справочная информация при подготовке к лабораторным работам, выполнении практических работ и курсовой работы по дисциплине «Теория подвижного состава».

В первом разделе представлена тематика лекционных занятий, причем здесь же указаны страницы и литература, где можно изучить данный вопрос. Во втором разделе даны основные методические указания к лабораторным работам по теории подвижного состава.

В третьем разделе представлены методические указания по выполнению практических работ. Для проведения практических работ по дисциплине «Теория подвижного состава» разработаны задачи по каждой теме, в которых в качестве примера даны решения 10 задач, а затем приведены тексты не менее 10 задач, которые можно предложить студентам для самостоятельного решения на практических занятиях или в качестве заданий к экзаменационным билетам.

В четвертом разделе приводятся примеры определения и выбора некоторых параметров подвижного состава, подробные методические указания к выполнению и требования к ее оформлению.

Содержание учебно-методического пособия построено на материалах различных литературных источников, авторских разработках по исследованию эксплуатационных свойств подвижного состава городского электрического транспорта и базе созданного и прочитанного курса лекций по дисциплине «Теория подвижного состава» на кафедре «Тракторы» Белорусского национального техни-

ческого университета (БНТУ) в период с 1997 по 2011 годы. Данное издание разработано в соответствии с типовой программой дисциплины «Теория подвижного состава». Отличительной его особенностью является наличие в одной работе методических указаний по всем видам учебных занятий по дисциплине «Теория подвижного состава», предусмотренных учебным планом и типовой программой (лекции, лабораторные и практические занятия, курсовая работа).

Для оперативного самоконтроля в конце некоторых разделов приводятся контрольные вопросы. В пособии имеется предметный указатель, что дает возможность студентам легко ориентироваться в тексте.

В подготовке рукописи (поиск информации, выполнение рисунков и чертежей, наборе некоторых разделов рукописи и т. п.) авторам большую помощь оказывали такие студенты, обучающиеся по специальности «Городской электрический транспорт», как Е.О. Дымский (гр. 101156), Ю.А. Широкова (гр. 101154) и Е.Ю. Авсюк (гр. 101155) – ныне сотрудники ПО «Белкоммунмаш», которым авторы весьма признательны за оказанную помощь.

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам – заведующему кафедрой «Тракторы и автомобили» Белорусского государственного аграрно-технического университета, доктору технических наук А.И. Бобровнику и кандидату технических наук, доценту кафедры «Автомобили» Белорусского национального технического университета Л.А. Молибошко, а также будут признательны за все высказанные пожелания и замечания по улучшению содержания учебно-методического пособия.

Введение

Теория подвижного состава – наука о функциональных свойствах подвижного состава городского электрического транспорта (ПС ГЭТ), зависимостях этих свойств от конструктивных параметров подвижного состава, закономерностях его движения и об эффективных и безопасных режимах движения в заданных условиях эксплуатации.

Теория подвижного состава является одной из базовых дисциплин, которые определяют профессиональный фундамент знаний инженера-электромеханика. Ее изучение базируется на знаниях и навыках, полученных при изучении физики, математики, теоретической механики, устройства (конструкции) подвижного состава.

Цель данного учебно-методического пособия – дать студентам основы знаний по выбору конструктивных параметров подвижного состава городского электрического транспорта, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства, связанные с перевозкой пассажиров в городских условиях. В нем рассматриваются вопросы общей динамики подвижного состава при взаимодействии с внешней средой и на этой основе изучаются важнейшие эксплуатационные свойства подвижного состава: тягово-скоростные, тормозные, криволинейное движение, устойчивость, колебания подвижного состава и проходимость. Изучив дисциплину «Теория подвижного состава» и выполнив лабораторные и практические работы, а также курсовую работу студент должен уметь:

- выполнять исследования на механико-математических моделях и проводить анализ результатов исследований по определению эксплуатационных свойств подвижного состава;

- выбирать конструктивные параметры подвижного состава, обеспечивающие нормативные или заданные оценочные критерии его эксплуатационных свойств;

- оценивать эксплуатационные свойства подвижного состава по существующим государственным стандартам и нормативам.

Под *подвижным составом городского электрического транспорта* в данном учебно-методическом пособии подразумевается наземный безрельсовый (троллейбус) и рельсовый (трамвай) городской электрический транспорт. Для оценки технико-экономических показателей подвижного состава городского электрического транспорта используются следующие критерии:

- пассажировместимость (вместимость);
- снаряженная масса;
- удельная снаряженная масса;
- полная масса;
- система управления тяговым электродвигателем;
- тип дверей и их количество;
- максимальная скорость движения;
- мощность тягового электродвигателя;
- удельная мощность;
- расход электрической энергии;
- стоимость подвижного состава.

Троллейбус – вид городского безрельсового общественного транспорта, предназначенный для перевозки пассажиров по установленным маршрутам, приводимый в движение тяговым электрическим двигателем. Ток для питания тягового электродвигателя троллейбуса поступает от подвесной контактной сети (троллей), имеющей два провода, через подвижные токосъемные устройства со скользящим контактом.

Трамвай – вид городского рельсового общественного транспорта, обычно на электрической тяге (городская электрическая наземная железная дорога), используемый в городах для перевозки пассажиров по заданным маршрутам. Питание тяговых электродвигателей трамвая осуществляется постоянным током от подвесной контактной сети через подвижное токосъемное устройство со скользящим контактом. Вторым проводом являются рельсы.

Ниже приведены технические характеристики и внешний вид (дизайн) некоторых моделей троллейбусов и трамваев (рисунок 1 и 2).

В результате анализа технических параметров троллейбусов были установлены следующие пределы их изменения :

- пассажировместимость 86–120 человек;
- масса снаряженного троллейбуса 9600–12600 кг;
- максимальная техническая масса 18000 кг;
- максимальная установившаяся скорость 50–75 км/ч;
- тяговый электродвигатель постоянного или переменного тока;
- мощность 115–210 кВт;
- система управления РКСУ, ТИСУ, КТСУ;
- количество дверей 2–3;
- тип дверей: поворотно-выдвижные, створчатые, шарнирно-поворотные;

- количество мест для сидения 24–36;
- цена троллейбуса 330 026 135–1 379 000 000 бел. руб.;

Модель 321



Пассажиропропускность 115 человек
 Масса снаряженного троллейбуса 11100/11400 кг
 Максимальная техническая масса 18000 кг
 Максимальная установившаяся скорость 60 км/ч
 Тяговый электродвигатель 3МЛ 3530 кВ4/ДК211 ЕМ
 Мощность 185/170 кВт
 Система управления транзисторная
 Цена троллейбуса 576420924 бел. руб.
 Количество дверей 3
 Тип дверей двустворчатые, поворотно-сдвижные
 Количество мест для сидения 26

СВАРЗ-6235



Пассажиропропускность 100 человек
 Масса снаряженного троллейбуса 11200 кг
 Максимальная техническая масса 18000 кг
 Максимальная установившаяся скорость 65 км/ч
 Двигатель ТВД-3
 Мощность 180 кВт
 Система управления транзисторная
 Цена троллейбуса 526394000 бел. руб.
 Количество дверей для пассажиров 3
 Мест для сидения 25+1

ЛАЗ-Е183



Пассажиропропускность 120 человек
 Масса снаряженного троллейбуса 11200 кг
 Максимальная техническая масса 18000 кг
 Максимальная установившаяся скорость 75 км/ч
 Двигатель ЭД1-139А/2
 Мощность 140 (170) кВт
 Система управления на IGBT-транзисторах
 Цена троллейбуса 539600000 бел. руб.
 Количество дверей для пассажиров 3
 Мест для сидения 24-36

ВМЗ-5298.01



Пассажиропропускность 100 человек
 Масса снаряженного троллейбуса 11200 кг
 Максимальная техническая масса 18000 кг
 Максимальная установившаяся скорость 70 км/ч
 Двигатель ТД-280
 Мощность 180 кВт
 Система управления транзисторная
 Цена троллейбуса 446782000 бел. руб.
 Количество дверей для пассажиров 3
 Габаритные размеры:
 Длина 12950 мм
 Ширина 2530 мм
 Высота по крыше 3370 мм
 Мест для сидения 28

Skoda 24 Tr Irisbus



Пассажиропропускность 86 человек
 Масса снаряженного троллейбуса 11990 кг
 Максимальная техническая масса 18000 кг
 Максимальная установившаяся скорость 65 км/ч
 Двигатель Scoda Electric
 Мощность 210 кВт
 Система управления на IGBT-транзисторах
 Цена троллейбуса 137900000 бел. руб.
 Количество дверей для пассажиров 3
 Габаритные размеры:
 Длина 11990 мм
 Ширина 2530 мм
 Высота по крыше 3500 мм
 Мест для сидения 28

Модель 42003А



Пассажиропропускность 115 человек
 Масса снаряженного троллейбуса 12000 кг
 Максимальная техническая масса 18000 кг
 Максимальная установившаяся скорость 50 км/ч
 Тяговый электродвигатель S KODA ML 3550, переменного тока
 Мощность 185 кВт
 Система управления транзисторная
 Цена троллейбуса 726300000 бел. руб.
 Количество дверей 2
 Тип дверей двустворчатые, поворотно-сдвижные
 Габаритные размеры:
 длина (по кузову) 12300 мм
 ширина (по кузову) 2500 мм
 высота 3640 мм
 Количество мест для сидения 29+5

Рисунок 1 – Дизайн и краткие технические характеристики некоторых моделей троллейбусов

Пределы изменения технических параметров трамваев:

- пассажиропропускность 163–224 человека;
- масса снаряженного вагона 16800–22500 кг;
- максимальная техническая масса 34840 кг;
- максимальная установившаяся скорость 62–75 км/ч;
- тяговый электродвигатель постоянного или переменного тока;
- мощность тягового электродвигателя 160–320 кВт;
- система управления: РКСУ, ТИСУ, КТСУ;
- удельное энергопотребление на тягу 80–100 Вт.ч/т.км;
- тип дверей: поворотно-выдвижные, створчатые, шарнирно-поворотные;
- количество дверей 2–3;
- цена трамвая 740 922 859 бел. руб.

71-153



Пассажиропровозимость 165 человек
 Масса снаряженного вагона 19500 кг
 Конструктивная скорость не менее 75 км/ч
 Типовой электродвигатель асинхронный
 Мощность 4 х 55 кВт
 Система управления на IGBT-транзисторах
 Расход электроэнергии более 80 Вт·час/км
 Количество дверей для пассажиров 2
 Габаритные размеры:
 длина вагона (по кузову) 15000 мм
 ширина вагона (по кузову) 2300 мм
 высота вагона 3150 мм
 Количество мест для сидения 28

71-402 «Спектр»



Пассажиропровозимость 168 человек
 Масса снаряженного вагона 19600 кг
 Максимальная установившаяся скорость 62 км/ч
 Типовой электродвигатель асинхронный
 Мощность 4 х 54 кВт
 Система управления на IGBT-транзисторах
 Расход электроэнергии более 80 Вт·час/км
 Количество дверей для пассажиров 3
 Габаритные размеры:
 Длина 15200 мм
 Ширина 2500 мм
 Высота по крыше 3050 мм
 Количество мест для сидения 32

ЛТ-10



Пассажиропровозимость 90-180 человек
 Масса снаряженного вагона 23000 кг
 Максимальная установившаяся скорость 75 км/ч
 Мощность типовой электродвигатель 4х6,5 кВт
 Система управления тиристорно-индуктосная
 Расход электроэнергии более 80 Вт·час/км
 Количество дверей 4
 Габаритные размеры:
 длина вагона 16500
 ширина кузова вагона 2520
 высота кузова 3100
 высота кузова с электроборудованием 3700
 Количество мест для сидения 34

Татра Т3



Пассажиропровозимость 163 человека
 Масса снаряженного вагона 16800 кг
 Максимальная установившаяся скорость 65 км/ч
 Тип двигателя TE 022
 Мощность двигателя 4х40 кВт
 Расход электроэнергии более 80 Вт·час/км
 Количество дверей 2
 Габаритные размеры:
 Длина кузова 14000 мм
 Ширина кузова 2500 мм
 Высота вагона 3030 мм
 Мест сидения 23

КТМ-5



Пассажиропровозимость 224 человека
 Масса снаряженного вагона 18600 кг
 Максимальная установившаяся скорость 75 км/ч
 Типовой электродвигатель ДК-259
 Мощность 4х4,5 кВт
 Система управления на IGBT-транзисторах
 Расход электроэнергии (летом) 2 кВт·ч/км
 Расход электроэнергии (зимой) 3 кВт·ч/км
 Количество дверей для пассажиров 3
 Габаритные размеры:
 Длина 15094 мм
 Ширина 2550 мм
 Высота по крыше 3128 мм
 Мест для сидения 32

60102



Пассажиропровозимость 211 человек
 Масса снаряженного вагона 20000 кг
 Максимальная установившаяся скорость 34840 кг
 Максимальная установившаяся скорость 62 км/ч
 Типовой электродвигатель ДК-263 Б
 Мощность 4 х 80 кВт
 Система управления тиристорно-индуктосная
 Цена тrolleybusа 7400 2250 руб.
 Удельное энергопотребление на тягу 100 Вт·ч/км
 Количество дверей 3
 Габаритные размеры:
 длина вагона (по кузову) 15400 мм
 ширина вагона (по кузову) 2300+200 мм
 высота вагона 3300 мм

Рисунок 2 – Дизайн и краткие технические характеристики некоторых моделей трамваев

Эффективность функционирования подвижного состава определяется его *потенциальными свойствами* и *степенью их использования* в реальных условиях эксплуатации. Различают две группы потенциальных свойств: функциональные свойства и свойства надежности.

Функциональные свойства определяются пассажироместимостью подвижного состава и характеризуют его возможность выполнять предписанные свойства. Эти свойства проявляются при движении подвижного состава и характеризуют его предельные эксплуатационные возможности.

Свойства надежности характеризуют способность подвижного состава сохранять работоспособное состояние в установленном интервале времени или километрах пробега.

Функциональные свойства и свойства надежности определяют степень приспособленности подвижного состава к перевозкам пассажиров в городских условиях. Их совокупность называют *эксплуатационными свойствами* подвижного состава.

В теории подвижного состава изучаются только функциональные свойства. К ним относятся тягово-скоростные и тормозные свойства, криволинейное движение подвижного состава, управляемость, маневренность, устойчивость, колебания и плавность хода, проходимость.

Тягово-скоростные свойства подвижного состава характеризуют его способность перевозить пассажиров или грузы с высокой средней скоростью и преодолевать подъемы.

Тормозные свойства подвижного состава характеризуют его способность к снижению скорости движения при одновременном исключении заносов или схода с рельсов с целью предотвращения дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и повышения безопасной скорости движения.

Управляемость – свойство троллейбуса, определяющее его способность изменять направление движения в соответствии с воздействием водителя на рулевое управление.

Маневренность – свойство троллейбуса двигаться по траектории минимального радиуса в проездах заданной формы и на ограниченных площадках.

Устойчивость – свойство подвижного состава, определяющее его способность сохранять движение по заданной траектории, противодействуя силам, стремящимся вызвать боковое смещение или опрокидывание.

Плавность хода – свойство подвижного состава, характеризующее его способность уменьшать амплитуды колебаний кузова при движении по неровностям дороги или рельсового пути и снижать вибронегруженность водителя, пассажиров или груза и механизмов подвижного состава.

Проходимость – свойство троллейбуса, характеризующее его способность преодолевать искусственные препятствия (ямочный ремонт дороги, бордюрные камни, «лежащий полицейский» и др.

1. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ТЕОРИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА»

1.1. Время, отводимое на изучение дисциплины

Согласно типовому учебному плану всего на изучение дисциплины «Теория подвижного состава» отведено 214 учебных часа, в том числе 112 часов аудиторных занятий, из них лекции – 64 ч; практические занятия – 32 ч; лабораторные работы – 16 ч.

Примерный тематический план дисциплины

Наименование темы	Лекции (часы)	Практические занятия (часы)	Лабораторные занятия (часы) 6-й семестр
Тема 1. Взаимодействие ПС и системы электроснабжения	2		
Тема 2. Городские дороги и рельсовые пути	2		
Тема 3. Колесный движитель	6	4	2
Тема 4. Тягово-скоростные свойства подвижного состава	6	4	2
Тема 5. Тягово-динамический расчет подвижного состава	6	4	2
Тема 6. Тормозные свойства подвижного состава	8	4	2
Тема 7. Движение подвижного состава в кривых	10	4	2
Тема 8. Устойчивость подвижного состава	10	4	2
Тема 9. Проходимость подвижного состава	4	2	
Тема 10. Колебания подвижного состава	10	6	4
ВСЕГО	64	32	16

1.2. Темы лекций

1.2.1. Общая характеристика и классификация подвижного состава городского электрического транспорта

Общая характеристика городского пассажирского транспорта. Требования, предъявляемые к городскому электрическому транспорту. Классификация подвижного состава ГЭТ. Оценочные показатели подвижного состава ГЭТ (технические, экономические). Особенности использования скоростного трамвая [1, с. 11–46; 4, с. 12–16, 23–38, 40–55].

1.2.2. Механическая система «подвижной состав–опорная поверхность»

Динамические характеристики подвижного состава ГЭТ [1, с. 27–28; 3, с. 13–19]. Основные технические показатели автомобильных дорог (классификация) [5, с. 7–11]. Основные элементы рельсового пути (рельсы, шпалы, скрепления, балластный слой, земляное полотно, стрелочные переводы). Динамические характеристики верхнего строения рельсового пути [3, с. 19–36]. Неровности рельсового пути [3, с. 30–36].

1.2.3. Условия работы подвижного состава ГЭТ и системы электроснабжения

Общие сведения об электроснабжении. Особенности работы тяговых электрических сетей. Схемы внешнего и внутреннего электроснабжения. Контактные подвески и их взаимодействие с токоприемниками подвижного состава ГЭТ [3, с. 41–59]. Взаимная связь режимов работы подвижного состава ГЭТ и системы электроснабжения. Удельный расход электрической энергии [1, с. 29–36; 3, с. 64–69]. Определение расхода электрической энергии подвижным составом ГЭТ и методы его снижения [4, с. 38–40, 59–62].

1.2.4. Взаимодействие колесного движителя с опорной поверхностью

Основные понятия и определения (кинематика качения колеса, радиусы колеса, буксование и скольжение колеса, режимы качения

колеса) [3, с. 69–78; 2, с. 4–13; 1, с. 67–71]. Баланс мощности и КПД ведущего колеса [1, с. 71–74]. Качение колеса с пневматической шиной по дороге (сцепление с дорогой, сопротивление качению, движение колеса под действием боковой силы) [1, с. 74–80]. Качение колесной пары по рельсу (качение ведомого, ведущего, тормозного колеса) [2, с. 13–60; 3, с. 78–116].

1.2.5. Тягово-скоростные свойства подвижного состава ГЭТ

Оценочные показатели тягово-скоростных свойств [1, с. 81–83]. Режимы движения подвижного состава [2, с. 89–92; 3, с. 146–149]. Силы и моменты, действующие на подвижной состав при прямолинейном движении [1, с. 83–86; 2, с. 92–102; 3, с. 149–160]. Уравнения прямолинейного движения подвижного состава [1, с. 90–94, 2, с. 86–89; 3, с. 143–146]. Нормальные реакции опорной поверхности [1, с. 94–97]. Тяговая и динамическая характеристики подвижного состава [1, с. 92–94]. Определение требуемой мощности тягового электродвигателя [1, с. 99–101; 2, с. 103–105; 3, с. 160–167]. Разгон и диаграмма разгона подвижного состава. Механико-математические модели, используемые для исследования разгона подвижного состава [2, с. 136–144; 3, с. 199–209]. Динамическое преодоление подъемов [5, с. 52–53]. Мощностной баланс подвижного состава [1, с. 92–94].

1.2.6. Тормозные свойства подвижного состава ГЭТ

Тормозные системы подвижного состава и виды торможений [1, с. 132–133; 3, с. 209–212]. Оценочные показатели тормозных свойств и диаграмма торможения подвижного состава [1, с. 133–138; 2, с. 159–168]. Торможение подвижного состава механическими тормозами [3, с. 212–225]. Электрическое торможение подвижного состава [1, с. 138–141; 2, с. 281–287; 3, с. 230–241]. Рекуперативное торможение подвижного состава [3, с. 243–252]. Распределение и регулирование тормозных сил по мостам и тележкам [1, с. 141–151; 2, с. 274–281]. Электромагнитные рельсовые тормоза [2, с. 287–289; 3, с. 225–230]. Уравнения движения подвижного состава при торможении [3, с. 252–258]. Устойчивость движения подвижного состава при торможении [1, с. 151–154]. Взаимодействие звеньев трамвай-

ного поезда при торможении [2, с. 268–274; 3, с. 258–263]. Влияние тормозных свойств на среднюю скорость движения подвижного состава по маршруту [3, с. 263–266].

1.2.7. Криволинейное движение подвижного состава ГЭТ

Основные понятия и определения. Критерии оценки. Силы и моменты, действующие на подвижной состав при криволинейном движении. Уравнения криволинейного движения троллейбуса. Переходные процессы. Стабилизация управляемых колес троллейбуса. Определение параметров кругового движения сочлененного троллейбуса [1, с. 154–178]. Движение трамвая по стрелочным кривым [2, с. 159–169; 3, с. 278–288].

1.2.8. Устойчивость подвижного состава ГЭТ

Основные понятия и определения. Критерии оценки [1, с. 178–185; 2, с. 148–150; 3, с. 266–268]. Поперечная устойчивость подвижного состава [1, с. 185–191; 2, с. 150–159; 3, с. 268–278]. Курсовая устойчивость троллейбуса [1, с. 191–194]. Устойчивость движения сочлененного троллейбуса по колебанию полуприцепа [1, с. 194–199]. Устойчивость трамвая против опрокидывания при движении в кривых [2, с. 169–173; 3, с. 288–294].

1.2.9. Колебания и плавность хода подвижного состава ГЭТ

Основные понятия, определения, оценочные показатели и нормы [1, с. 199–203; 2, с. 173–177, 251–256; 3, с. 295–298, 377–384]. Общая характеристика системы поддрессирования подвижного состава [1, с. 207–214; 2, с. 173, 216; 3, с. 294–295, 341–342]. Дифференциальные уравнения колебаний подвижного состава [1, с. 214–215; 2, с. 177–180; 3, с. 298–301]. Собственные колебания подвижного состава [1, с. 215–227; 2, с. 180–194, 216–228; 3, с. 301–316, 342–353]. Вынужденные колебания подвижного состава [1, с. 227–233; 2, с. 194–204, 228–251; 3, с. 316–325, 353–377]. Боковые горизонтальные колебания трамвая при движении по прямолинейному пути [2, с. 210–216; 3, с. 333–341].

1.2.10. Тяговые электрические двигатели

подвижного состава ГЭТ

Классификация характеристик тяговых двигателей. Требования к характеристикам тяговых двигателей. Характеристики тяговых двигателей. Расчет характеристик тяговых двигателей при изменении напряжения и магнитного потока [2, с. 289–331]

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

2.1. Методические указания к лабораторным работам

Учебным планом для студентов специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт» выполнение всех лабораторных работ предусмотрено в 6-м семестре, когда прочитана только часть дисциплины «Теория подвижного состава», т. е. лабораторные работы значительно опережают лекционный курс. Для успешного выполнения лабораторных работ, в том числе и по еще не изученным вопросам, при подготовке к лабораторным занятиям рекомендуется использовать учебные пособия [5, 6]. Отметим, что исследование эксплуатационных свойств подвижного состава выполняется на механико-математических моделях с помощью персональных электронно-вычислительных машин (ПЭВМ) по готовым программам.

Большинство лабораторных работ по каждой теме состоит из двух частей. В первой части исследуются эксплуатационные свойства троллейбуса, во второй – трамвая. При подготовке к лабораторным работам рекомендуется вначале изучить материал, изложенный в разделе «Краткие теоретические сведения», и ответить на контрольные вопросы. Это будет свидетельствовать об удовлетворительном усвоении материала по теме лабораторной работы. Особое внимание следует уделить изучению математических моделей (допущения; расчетная схема; действующие силы и моменты и их природу; разработка системы уравнений). Сравнивая число исходных данных, приведенных в соответствующих таблицах к каждой лабораторной работе [5, 6] или выданных преподавателем, со списком исходных данных, необходимых для выполнения работы (см. раздел «Исходные данные» [5, 6]), можно приступать к расчету недостающих исходных данных или подбору их по каталогам.

В таблицах исходных данных к лабораторным работам [6] предусмотрено варьирование определенного конструктивного или эксплуатационного параметра в некоторых пределах. При выполнении работы этот параметр варьируется в указанных пределах, и работу необходимо выполнить с 8–10 значениями этого параметра. Задача студента состоит в том, чтобы выявить, как этот параметр влияет на исследуемое эксплуатационное свойство подвижного состава. Для иллюстрации результатов исследований строится результирующий график, по оси абсцисс которого откладывается варьируемый параметр, а по оси ординат – критерии оценки исследуемого эксплуатационного свойства.

Быстродействие современных ПЭВМ и качественная подготовка к каждой лабораторной работе позволяют за время, отведенное на выполнение лабораторной работы, полностью выполнить работу по одной теме и получить необходимые таблицы и графические зависимости. Студенту остается самостоятельно построить результирующий график с использованием математических или графических пакетов.

После выполнения лабораторной работы составляется отчет, в котором должны быть отражены следующие вопросы:

- цель исследования;
- механико-математическая модель исследуемого объекта (расчетная схема, система уравнений, описывающая поведение объекта в заданных условиях эксплуатации);
- исходные данные, выданные преподавателем;
- недостающие для выполнения лабораторной работы исходные данные, рассчитанные студентом (приводится расчет этих данных);
- результаты исследований, представленные в виде распечаток таблиц и графических зависимостей;
- подробный анализ результатов исследований и соответствие полученных численных значений критериев оценки исследуемого эксплуатационного свойства нормативным требованиям;
- заключение по результатам исследования.

Отчет о выполненной лабораторной работе представляется преподавателю на следующем занятии. Все страницы отчета нумеруются в соответствии с [14], нумерация иллюстраций и таблиц сквозная по всему отчету. Уравнения и формулы следует отделять от текста свободными строками (сверху и снизу). Пояснения значе-

ний символов и коэффициентов, используемых в формулах, приводятся непосредственно под формулой. Студент подписывает законченный отчет с простановкой даты его оформления.

Защита каждого отчета происходит индивидуально. При этом могут быть заданы вопросы по теме лабораторной работы, не входящие в раздел «Контрольные вопросы» учебных пособий [5, 6]. Защищенные отчеты подписываются преподавателем и в дальнейшем хранятся на кафедре.

2.2. Тематика лабораторных работ

Как указывалось выше, тематика лабораторных работ охватывает все разделы дисциплины «Теория подвижного состава». К выполнению предлагаются следующие темы лабораторных работ:

1. Моделирование неровностей дороги и рельсового пути.
2. Взаимодействие колеса с опорной поверхностью.
 - 2.1. Взаимодействие шины с дорогой.
 - 2.2. Взаимодействие колеса с рельсом.
3. Исследование тягово-скоростных свойств подвижного состава.
 - 3.1. Исследование разгона троллейбуса.
 - 3.2. Исследование разгона трамвая.
4. Исследование тормозных свойств подвижного состава.
 - 4.1. Исследование экстренного торможения троллейбуса.
 - 4.2. Исследование экстренного торможения трамвая.
 - 4.3. Исследование взаимодействия звеньев при торможении трамвайного поезда.
5. Криволинейное движение подвижного состава.
 - 5.1. Статическая поворачиваемость троллейбуса.
 - 5.2. Исследование кинематики рулевой трапеции и оптимизация ее параметров.
 - 5.3. Движение троллейбуса по заданной траектории.
 - 5.4. Движение трамвая в кривых.
6. Устойчивость движения подвижного состава.
 - 6.1. Устойчивость прямолинейного движения троллейбуса.
 - 6.2. Устойчивость движения сочлененного троллейбуса по движению полуприцепа.
 - 6.3. Устойчивость движения трамвая.

7. Колебания подвижного состава.

7.1. Движение троллейбуса по неровностям дороги.

7.2. Движение трамвая по неровностям рельсового пути.

Не все названные лабораторные работы могут выполняться в 6-м семестре. Окончательно тематика лабораторных работ выбирается преподавателем.

3. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

3.1. Методические указания к практическим работам

Проведение практических работ предусмотрено учебным планом в 6-м и 7-м семестрах – одно занятие в две недели. На практических занятиях рекомендуется решение задач по теории подвижного состава, расчетно-графические работы, например, по разработке механико-математических моделей подвижного состава для исследования различных эксплуатационных свойств. Как и лабораторные, практические работы желательно проводить в аудитории, в которой установлены ПЭВМ и для решения задач рекомендуется использовать пакет MathCAD.

Практические работы охватывают темы дисциплины «Теории подвижного состава»:

- «Взаимодействие подвижного состава с внешней средой»;
- «Тягово-скоростные свойства подвижного состава»;
- «Тормозные свойства подвижного состава»;
- «Устойчивость подвижного состава»;
- «Криволинейное движение (управляемость) подвижного состава»;
- «Колебание и плавность хода подвижного состава»;
- «Проходимость подвижного состава».

Для поиска соответствующих исходных данных при решении задач в приложениях приведены краткие технические характеристики основных моделей троллейбусов и трамваев, а также значения коэффициентов сцепления и сопротивления качению (удельных сопротивлений) для различного состояния асфальтобетонной дороги и рельсового пути и другие необходимые сведения.

По результатам выполнения расчетно-графической работы составляется отчет, содержание которого должно соответствовать требованиям к отчетам о лабораторных работах.

Ниже приведены задачи, охватывающие все разделы «Теории подвижного состава». Для лучшего овладения материалом в начале каждого раздела приведены полные решения нескольких задач, затем – ряд задач без решения. Правильность решения задач можно проконтролировать, сравнивая полученные студентом результаты с ответами, приведенными в конце каждой задачи. В конце каждого раздела даны контрольные вопросы для самостоятельной проверки усвоения материала.

3.2. Задачи

3.2.1. Взаимодействие подвижного состава с внешней средой

Задача 3.2.1. Определить момент сопротивления качению M_f троллейбуса массой $m = 15250$ кг в начале и в конце преодолеваемого подъема, если начальная скорость $v_n = 75$ км/ч, а конечная $v_k = 50$ км/ч. Угол подъема дороги $\alpha_d = 5^\circ$, радиус качения ведущих колес $r_k = 0,544$ м. При определении коэффициента сопротивления качению в зависимости от скорости движения использовать эмпирическую формулу

$$f_v = f_0 \left(1 + \frac{v^2}{20000} \right), \quad (3.1)$$

где f_0 – коэффициент сопротивления качению при движении с малой скоростью (принять $f_0 = 0,018$);

v – скорость троллейбуса, км/ч.

Решение

1. Коэффициент сопротивления качению по формуле (3.1):
при скорости 75 км/ч

$$f_{75} = 0,018 \left(1 + \frac{75^2}{20000} \right) = 0,023$$

скорости 50 км/ч

$$f_{50} = 0,018 \left(1 + \frac{50^2}{20000} \right) = 0,020.$$

2. Вес троллейбуса $G = gm = 9,81 \cdot 15250 = 1,496 \cdot 10^5$ Н.

3. Суммарная нормальная реакция колес троллейбуса

$$R_{z\Sigma} = G \cos \alpha_{\text{д}} = 1,496 \cdot 10^5 \cdot \cos 5^\circ = 1,490 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

4. Момент сопротивления качению:

в начале подъема ($v = 75$ км/ч)

$$M_{f75} = f_{75} R_{z\Sigma} r_{\text{ко}} = 0,023 \cdot 1,49 \cdot 10^5 \cdot 0,554 = 1,899 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

в конце подъема ($v = 50$ км/ч)

$$M_{f50} = f_{50} R_{z\Sigma} r_{\text{ко}} = 0,020 \cdot 1,49 \cdot 10^5 \cdot 0,554 = 1,651 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Ответ. 1,9 кН·м; 1,7 кН·м.

Задача 3.2.2. Определить силу сопротивления воздуха при встречном и попутном ветре по данным предыдущей задачи, если скорость троллейбуса $v = 75$ км/ч, $k_{\text{в}} = 0,38 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; $A_{\text{лоб}} = 6,32 \text{ м}^2$. Скорость ветра $v_{\text{ветра}} = 8$ м/с направлена под углом $\alpha_{\text{ветра}} = 20^\circ$ относительно продольной оси троллейбуса.

Р е ш е н и е

1. Относительная скорость потока воздуха при встречном ветре

$$v_{\text{в.в.75}} = v_{75} + v_{\text{ветра}} \cos \alpha_{\text{ветра}} = \frac{75}{3,6} + 8 \cos 20^\circ = 28,351 \text{ м/с};$$

при попутном ветре

$$v_{п.в.75} = v_{75} - v_{ветра} \cos \alpha_{ветра} = \frac{75}{3,6} - 8 \cos 20^\circ = 13,316 \text{ м/с.}$$

2. Сила сопротивления воздуха:
при встречном ветре

$$F_{в.в} = k_v \cdot A_{\text{лоб}} \cdot v_{в.в.75}^2 = 0,38 \cdot 6,32 \cdot 28,351^2 = 1,93 \cdot 10^3 \text{ Н;}$$

при попутном ветре

$$F_{в.п} = k_v \cdot A_{\text{лоб}} \cdot v_{п.в.75}^2 = 0,38 \cdot 6,32 \cdot 13,316^2 = 425,842 \text{ Н.}$$

Ответ. 1930,0 Н; 425,8 Н.

Задача 3.2.3. Определить КПД трансмиссии троллейбуса при движении с одной и той же скоростью на двух участках дороги. На первом участке сопротивление движению выше, момент двигателя $M_{дв1} = 120 \text{ Н}\cdot\text{м}$, на втором – ниже, $M_{дв2} = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Передаточное число конической пары главной передачи $u_{гп} = 3,37$, передаточное число колесного редуктора – $u_{ред} = 2,9$. Карданная передача имеет два карданных шарнира. Момент гидравлического сопротивления прокручиванию трансмиссии составляет $M_{г} = 21,9 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Р е ш е н и е

1. КПД трансмиссии вычисляется по формуле

$$\eta_{тр} = \eta_m - \frac{M_{г}}{M_{дв} u_{тр}},$$

где η_m – КПД, учитывающий механические потери в зубчатых зацеплениях и карданных шарнирах;

$M_{г}$ – момент, необходимый для прокрутки валов трансмиссии вхолостую;

$M_{дв}$ – момент, развиваемый двигателем;

$u_{тр}$ – передаточное число трансмиссии.

Механические потери в трансмиссии

$$\eta_m = \eta_{гп} \eta_{кр} \eta_{кш}^2 = 0,97 \cdot 0,98 \cdot 0,995^2 = 0,941,$$

где $\eta_{гп}$ – КПД конической пары;

$\eta_{кр}$ – КПД колесного редуктора;

$\eta_{кш}$ – КПД карданных шарниров.

2. Передаточное число трансмиссии составит

$$u_{тр} = u_{гп} u_{кр} = 3,37 \cdot 2,9 = 9,773.$$

3. КПД трансмиссии на первом участке дороги

$$\eta_{тр1} = 0,941 - \frac{21,9}{120 \cdot 9,773} = 0,960;$$

4. КПД трансмиссии на втором участке дороги

$$\eta_{тр2} = 0,941 - \frac{21,9}{50 \cdot 9,773} = 0,986.$$

Ответ. 0,960; 0,986.

Задача 3.2.4. Используя уравнение движения троллейбуса, определить его ускорение на двух участках дороги – горизонтальном и с уклоном $\alpha_d = 3^\circ$, если в обоих случаях скорость движения одинакова и составляет $v = 65$ км/ч. Параметры троллейбуса: $m = 17400$ кг; $M_{дв} = 752$ Н·м; $u_{тр} = 9,83$; $\eta_{тр} = 0,95$; $r_{к0} = 0,554$ м; $k_v = 0,4$ Н·с²/м⁴; $A_{лоб} = 6,28$; $\delta_{вр} = 1,08$. Коэффициент сопротивления качению $f = 0,015$.

Р е ш е н и е

1. Уравнение движения троллейбуса

$$\delta_{пм} m \dot{x} = F_k - (F_f + F_B + F_\alpha),$$

где $\delta_{пм}$ – коэффициент приведенной массы;

F_k, F_f, F_B, F_α – соответственно сила тяги троллейбуса, сила сопротивления качению, сила сопротивления воздуха и сила сопротивления движению на подъем.

Откуда ускорение

$$a = \ddot{x} = \frac{F_k - (F_f + F_B + F_\alpha)}{\delta_{\text{пм}} m}$$

2. Сила тяги троллейбуса

$$F_k = \frac{M_{\text{дв}} \omega_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}}}{r_{\text{ко}}} = \frac{752 \cdot 9,83 \cdot 0,95}{0,554} = 1,268 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

3. Сила сопротивления качению

$$F_f = fmg = 0,015 \cdot 17400 \cdot 9,81 = 2,56 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

4. Сила сопротивления воздуха

$$F_B = k_B A_{\text{лоб}} \left(\frac{v}{3,6} \right)^2 = 0,4 \cdot 6,28 \cdot \left(\frac{65}{3,6} \right)^2 = 818,92 \text{ Н.}$$

5. Сила сопротивления движению на подъем

$$F_\alpha = mgs \sin \alpha_{\text{д}} = 17400 \cdot 9,81 \cdot \sin 3^\circ = 8,933 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

6. Ускорение троллейбуса:

на горизонтальном участке дороги

$$a_{\Gamma} = \frac{(12,68 - 2,56 - 0,819) \cdot 10^3}{1,08 \cdot 17400} = 0,495 \text{ м/с}^2,$$

при движении на подъем

$$a_{\alpha} = \frac{(12,68 - 2,56 - 0,819 - 8,933) \cdot 10^3}{1,08 \cdot 17400} = 0,02 \text{ м/с}^2.$$

Ответ. 0,495 м/с²; 0,02 м/с².

Задача 3.2.5. Используя эмпирическую формулу для определения коэффициента приведенной массы колесной машины

$$\delta_{п.м} = 1 + \frac{1 + (\delta_1 + \delta_2 u_{тр}^2) m_a}{m},$$

где $\delta_1 = 0,03-0,05$; $\delta_2 = 0,04-0,06$;

$u_{тр}$ – передаточное число трансмиссии;

m_a – полная масса машины;

m – фактическая масса машины,

определить коэффициент приведенной массы порожнего троллейбуса и троллейбуса с номинальной загрузкой салона пассажирами, если полная масса $m = 17400$ кг, снаряженная масса $m_c = 12250$ кг, передаточное число трансмиссии $u_{тр} = 8,55$. Принять средние значения эмпирических коэффициентов δ_1 и δ_2 .

Р е ш е н и е

1. Средние значения коэффициентов δ_1 и δ_2

$$\delta_1 = \frac{0,03+0,05}{2} = 0,04, \quad \delta_2 = \frac{0,04+0,06}{2} = 0,05.$$

2. Коэффициент приведенной массы троллейбуса:
с номинальной загрузкой салона

$$\delta_{пм.н.г} = 1 + \frac{1 + (0,04 + 0,05 \cdot 8,55^2) \cdot 17400}{12250} = 6,249,$$

без пассажиров

$$\delta_{пм.н.п} = 1 + \frac{1 + (0,04 + 0,05 \cdot 8,55^2) \cdot 12250}{12250} = 4,695.$$

Ответ. 6,249; 4,695.

Задача 3.2.6. Определить нормальные реакции на передние и задние колеса двухосного троллейбуса массой $m = 15465$ кг при движении на подъеме на двух скоростных режимах – при постоянной скорости и с замедлением $\ddot{x} = -0,5$ м/с². Параметры троллейбуса: $L = 6,04$ м; $a = 3,67$ м; $h_c = 1,5$ м; $h_b = 1,6$ м; $r_{к0} = 0,544$ м; $k_B = 0,4$ Н·с²/м⁴; $A_{\text{лоб}} = 6,5$ м²; $\delta_{\text{пм}} = 1,08$. Параметры дорожных условий: $f = 0,018$; $\alpha_d = 4^\circ$. Принять $v = 60$ км/ч.

Р е ш е н и е

Нормальные нагрузки на мосты:
на передний

$$R_{z1} = \frac{1}{L} [bG \cos \alpha_d - M_f - F_B h_B - h_c (F_\alpha + F_j) - F_{кр} h_{кр}],$$

где G – вес троллейбуса;

α_d – угол уклона дороги;

M_f – момент сопротивления качению;

F_B – сила сопротивления воздуха;

h_B – высота приложения силы сопротивления воздуха;

h_c – высота расположения центра масс;

F_α – сила сопротивления движению на подъем;

F_j – сила инерции;

$F_{кр}$ – сила сопротивления прицепа;

$h_{кр}$ – высота расположения точки сцепки троллейбуса с полуприцепом;

на задний

$$R_{z2} = G \cos \alpha_d - R_{z1}.$$

1. Находим расстояние b (расстояние от центра масс до оси задних колес)

$$b = L - a = 6,04 - 3,67 = 2,37 \text{ м.}$$

2. Статический вес, приходящийся на передний $G_{1ст}$ и задний $G_{2ст}$ мосты (при этом M_f , F_B , F_α , F_j и $F_{кр}$ равны нулю):

$$G_{1\text{ст}} = \frac{b}{L} mg \cos \alpha_{\text{д}} = \frac{2,37}{6,04} 15465 \cdot 9,81 \cdot \cos 4^\circ = 5,938 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

$$G_{2\text{ст}} = \frac{a}{L} mg \cos \alpha_{\text{д}} = \frac{3,67}{6,04} 15465 \cdot 9,81 \cdot \cos 4^\circ = 9,196 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

3. Момент сопротивления качению троллейбуса

$$M_f = fGr_{\text{ко}} \cos \alpha_{\text{д}} = 0,018 \cdot 15465 \times \\ \times 9,81 \cdot 0,544 \cdot \cos 4^\circ = 1,482 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Сила сопротивления воздуха

$$F_{\text{в}} = k_{\text{в}} A_{\text{люб}} v^2 = 0,4 \cdot 6,5 \cdot \left(\frac{60}{3,6} \right)^2 = 733,333 \text{ Н}.$$

5. Сила сопротивления подъему

$$F_{\alpha} = mg \sin \alpha_{\text{д}} = 15465 \cdot 9,81 \cdot \sin 4^\circ = 1,058 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

6. Так как троллейбус двухосный, $F_{\text{кр}} = 0$. Нормальная реакция дороги на мосты при постоянной скорости ($F_j = 0$):

на передний мост

$$R_{z1v=\text{const}} = G_{1\text{ст}} - \frac{1}{L} (M_f + F_{\text{в}} h_{\text{в}} + h_c F_{\alpha}) = \\ = 5,938 \cdot 10^4 - \frac{1}{6,04} (1,482 \cdot 10^3 + 733,333 \cdot 1,6 + 1,5 \cdot 1,058 \cdot 10^4) = \\ = 5,631 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

задний мост

$$R_{z2v=\text{const}} = G \cos \alpha_{\text{д}} - R_{z1v=\text{const}} = 15465 \cdot 9,81 \cdot \cos 4^\circ - \\ - 5,631 \cdot 10^4 = 9,503 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

Сила инерции

$$F_j = m\ddot{x} = 15465 \cdot (-0,5) = -7,732 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

7. Нормальная реакция дороги на мосты при движении с замедлением ($F_j \neq 0$):

на переднем мосту

$$R_{z1\ddot{x} \neq 0} = R_{z1v = \text{const}} - \frac{1}{L} F_j h_c = 5,631 \cdot 10^4 - \\ - \frac{1}{6,04} (-7,732 \cdot 10^3 \cdot 1,5) = 5,832 \cdot 10^4 \text{ Н;}$$

заднем мосту

$$R_{z2\ddot{x} \neq 0} = G \cos \alpha_d - R_{z1\ddot{x} \neq 0} = 15465 \cdot 9,81 \cdot \cos 4^\circ - \\ - 5,832 \cdot 10^4 = 9,302 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Ответ. Реакция на передние колеса 56,310 кН; 58,320 кН;
на задние 95,030 кН; 93,020 кН.

Задача 3.2.7. Вычислить коэффициенты перераспределения нормальных реакций по данным предыдущей задачи.

Р е ш е н и е

1. Коэффициенты перераспределения нормальных реакций для переднего λ_1 и заднего λ_2 мостов рассчитываются по формулам

$$\lambda_1 = \frac{R_{z1}}{G_{1\text{ст}}}; \quad \lambda_2 = \frac{R_{z2}}{G_{2\text{ст}}},$$

где R_{z1} и R_{z2} – нормальные реакции соответственно переднего и заднего мостов;

$G_{1\text{ст}}$ и $G_{2\text{ст}}$ – статические нормальные нагрузки на передний и задний мосты.

2. Статические нагрузки на мосты

$$G_{1\text{ст}} = \frac{b}{L} mg \cos \alpha_{\text{д}} = \frac{2,37}{6,04} 15465 \cdot 9,81 \cdot \cos 4^\circ = 5,938 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

$$G_{2\text{ст}} = \frac{a}{L} mg \cos \alpha_{\text{д}} = \frac{3,67}{6,04} 15465 \cdot 9,81 \cdot \cos 4^\circ = 9,196 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

3. Нормальные реакции мостов:

при движении с постоянной скоростью ($F_j = 0$)

$$R_{z1} = \frac{1}{L} [bG \cos \alpha_{\text{д}} - M_f - F_{\text{в}} h_{\text{в}} - h_{\text{с}} F_{\alpha} - F_{\text{кр}} h_{\text{кр}}]$$

где G – вес троллейбуса;

$\alpha_{\text{д}}$ – угол уклона дороги;

M_f – момент сопротивления качению;

$F_{\text{в}}$ – сила сопротивления воздуха;

$h_{\text{в}}$ – высота приложения силы сопротивления воздуха;

$h_{\text{с}}$ – высота расположения центра масс;

F_{α} – сила сопротивления движению на подъем;

F_j – сила инерции;

$F_{\text{кр}}$ – сила сопротивления прицепа;

$h_{\text{кр}}$ – высота расположения точки сцепки троллейбуса с прицепом.

$$R_{z2} = G \cos \alpha_{\text{д}} - R_{z1}.$$

4. Нормальные реакции мостов при движении:

с постоянной скоростью:

переднего моста

$$R_{z1v=\text{const}} = G_{1\text{ст}} - \frac{1}{L} (M_f + F_{\text{в}} h_{\text{в}} + h_{\text{с}} F_{\alpha}) = 5,938 \cdot 10^4 -$$
$$- \frac{1}{6,04} (1,482 \cdot 10^3 + 733,333 \cdot 1,6 + 1,5 \cdot 1,058 \cdot 10^4) = 5,631 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

заднего моста

$$\begin{aligned} R_{z2v=\text{const}} &= G \cos \alpha_{\text{д}} - R_{z1v=\text{const}} = \\ &= 15465 \cdot 9,81 \cdot \cos 4^{\circ} - 5,631 \cdot 10^4 = 9,503 \cdot 10^4 \text{ Н.} \end{aligned}$$

при движении с замедлением ($F_j \neq 0$):
переднего моста

$$\begin{aligned} R_{z1} &= \frac{1}{L} [bG \cos \alpha_{\text{д}} - M_f - F_{\text{в}} h_{\text{в}} - h_c (F_{\alpha} + F_j) - F_{\text{кр}} h_{\text{кр}}], \\ R_{z1\dot{x} \neq 0} &= R_{z1v=\text{const}} - \frac{1}{L} F_j h_c = 5,631 \cdot 10^4 - \\ &= -\frac{1}{6,04} (-7,732 \cdot 10^3 \cdot 1,5) = 5,832 \cdot 10^4 \text{ Н}; \end{aligned}$$

заднего моста

$$\begin{aligned} R_{z2} &= G \cos \alpha_{\text{д}} - R_{z1}. \\ R_{z2\dot{x} \neq 0} &= G \cos \alpha_{\text{д}} - R_{z1\dot{x} \neq 0} = 15465 \cdot 9,81 \cdot \cos 4^{\circ} - \\ &= -5,832 \cdot 10^4 = 9,302 \cdot 10^4 \text{ Н.} \end{aligned}$$

5. Коэффициенты перераспределения нормальных реакций при движении троллейбуса:
с постоянной скоростью:

$$\begin{aligned} \lambda_{1v=\text{const}} &= \frac{R_{z1}}{G_{1\text{сТ}}} = \frac{5,631 \cdot 10^4}{5,938 \cdot 10^4} = 0,948; \\ \lambda_{2v=\text{const}} &= \frac{R_{z2}}{G_{2\text{сТ}}} = \frac{9,503 \cdot 10^4}{9,196 \cdot 10^4} = 1,033. \end{aligned}$$

с замедлением:

$$\lambda_{1\ddot{x}\neq 0} = \frac{R_{z1\ddot{x}\neq 0}}{G_{1CT}} = \frac{5,832 \cdot 10^4}{5,938 \cdot 10^4} = 0,982;$$

$$\lambda_{2\ddot{x}\neq 0} = \frac{R_{z2\ddot{x}\neq 0}}{G_{12T}} = \frac{9,302 \cdot 10^4}{9,196 \cdot 10^4} = 1,012.$$

Ответ. Для передних колес: 0,948; 0,982.
Для задних колес: 1,033; 1,012.

Задача 3.2.8. При равномерном движении троллейбуса по горизонтальному участку дороги его двигатель развивает момент $M_{дв} = 215$ Н·м. Параметры троллейбуса: $m = 15465$ кг; $u_{тр} = 8,83$; $\eta_{тр} = 0,94$; $r_{к0} = 0,544$ м; $k_B = 0,4$ Н·с²/м⁴; $A_{лоб} = 7,2$ м². Какова скорость троллейбуса, если коэффициент сопротивления качению $f = 0,02$?

Решение

1. При равномерном движении по горизонтальной дороге сила тяги троллейбуса F_K равна сумме всех сил сопротивления движению (сопротивления качению F_f , сопротивления воздуха F_B):

$$F_K = F_f + F_B. \quad (3.2)$$

2. Сила тяги троллейбуса

$$F_K = \frac{M_{дв} u_{тр} \eta_{тр}}{r_{к0}} = \frac{215 \cdot 8,83 \cdot 0,94}{0,544} = 3,28 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

3. Сила сопротивления качению

$$F_f = fmg = 0,02 \cdot 15465 \cdot 9,81 = 3,034 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Решим уравнение (3.2) относительно силы сопротивления воздуха:

$$F_B = k_B A_{лоб} v^2 = F_K - F_f.$$

4. Отсюда находим выражение для расчета скорости троллейбуса:

$$v = \sqrt{\frac{F_k - F_f}{k_B A_{\text{лоб}}}} = \sqrt{\frac{3,28 \cdot 10^3 - 3,034 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 7,2}} = 9,242 \text{ м/с} = 33,271 \text{ км/ч.}$$

Ответ. 9,242 м/с (33,271 км/ч).

Задача 3.2.9. Определить силу сопротивления качению трамвайного вагона массой $m = 25670$ кг, если удельные сопротивления качению следующие:

- от трения качения колесной пары по рельсу $w_1 = 0,45$;
- трения скольжения колесной пары по рельсу $w_2 = 0,1$;
- виляния вагона $w_3 = 0,15$;
- ударов колесной пары на стыках рельсов $w_4 = 0,33$.

Р е ш е н и е

1. Суммарное удельное сопротивление качению трамвая w :

$$w = \sum_{i=1}^n w_i = 0,45 + 0,1 + 0,15 + 0,33 = 1,03,$$

где n – число удельных сопротивлений, участвующих в расчете.

2. Сила сопротивления качению

$$F_f = wG = 1,03 \cdot \frac{9,81 \cdot 25670}{1000} = 259,377 \text{ Н,}$$

где G – вес вагона, кН.

Ответ. 259,4 Н.

Задача 3.2.10. Определить коэффициент сцепления колеса с рельсом в режиме тяги и торможении, если дано: коэффициент, учитывающий неравенство нагрузок между ведущими осями $\eta_c = 0,93$; постоянная величина $a_c = 3,7$; скорость движения трамвая $v = 67$ км/ч.

Р е ш е н и е

1. Коэффициент сцепления колеса с рельсом

$$\varphi = \frac{\eta_c}{a_c + 0,04v} = \frac{0,93}{3,7 + 0,04 \cdot \frac{67}{3,6}} = 0,21.$$

2. Коэффициент сцепления в режиме торможения в 3,5 раза меньше его значения при тяге:

$$\varphi_{\text{торм}} = \frac{\varphi}{3,5} = \frac{0,21}{3,5} = 0,06.$$

Ответ. $\varphi = 0,21$; $\varphi_{\text{торм}} = 0,06$.

Задача 3.2.11. Определить величины нормальных реакций на мосты троллейбуса в статическом состоянии и в движении. Полная масса троллейбуса $m = 17580$ кг; координаты его центра масс $a = 3,94$ м, $b = 2,1$ м, $h_c = 1,55$ м; дорога горизонтальная с коэффициентом сцепления 0,75.

Ответ. Нормальные реакции на мосты:
в статике $G_{1\text{ст}} = 59,98$ кН, $G_{2\text{ст}} = 112,5$ кН;
в движении $G_1 = 33,16$ кН, $G_2 = 139,3$ кН.

Задача 3.2.12. Определить полную массу четырехосного трамвая на 150 пассажиров. Принять массу пассажира 75 кг, 75 % пассажиров имеют багаж массой 5 кг, в салоне работает кондуктор-контролер.

Рекомендация. Для расчета удельной снаряженной массы трамвая – использовать формулу

$$m_{\text{сн.уд}} = 83,36789 \cdot 10^{\frac{21,26724}{z_{\text{пас}}}}, \text{ кг},$$

где $z_{\text{пас}}$ – пассажировместимость трамвая.

Ответ. Полная масса трамвая составит 23,325 т.

Задача 3.2.13. Определить число оборотов, которое сделает вал тягового электродвигателя троллейбуса на участке дороги длиной 1 км. Передаточное число трансмиссии 9,15; обозначение шин 260-508P; коэффициент деформации шин 0,93.

Ответ. 2936 оборота.

Задача 3.2.14. Определить касательную силу тяги и мощность, подводимую к ведущим колесным парам четырехосного трамвая, движущегося по горизонтальному участку рельсового пути. Крутящий момент на валу тягового электродвигателя 450 Н·м при 1400 об/мин; передаточное число трансмиссии 6,45; КПД трансмиссии 0,92; диаметр колеса 700 мм.

Ответ. 7,63 кН; 60,7 кВт.

Задача 3.2.15. Мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению троллейбуса массой 18 т при движении по горизонтальной дороге со скоростью 18 км/ч, равна 42,2 кВт. Определить уклон дороги, на котором сила сопротивления качению равна силе сопротивления подъему.

Ответ. $i = 0,048$ (4,8 %) $\alpha_d = 2,75^\circ$.

Задача 3.2.16. Определить силу и мощность сопротивления подъему трамвайного вагона при движении со скоростью 51,3 км/ч на подъеме, угол которого равен $2^\circ 30'$; масса вагона 26,5 т.

Ответ. 163 кВт.

Задача 3.2.17. Определить силу и мощность сопротивления асфальтированной дороги в удовлетворительном состоянии ($f = 0,02$) при движении троллейбуса массой 17,6 т со скоростью 45,3 км/ч. Угол подъема дороги $\alpha_d = 4^\circ 25'$.

Ответ. 210,8 кВт.

Задача 3.2.18. Определить с какой скоростью будет двигаться троллейбус массой 18 т по асфальтовой дороге ($f = 0,02$) с углом подъема 5° , имеющий двигатель мощностью 185 кВт.

Ответ. 35,2 км/ч.

Задача 3.2.19. Определить силу и мощность сопротивления движению троллейбуса, а также силу и мощность сопротивления воздуха. Троллейбус движется со скоростью 60 км/ч по горизонтальному участку асфальтовой дороги, имеющей коэффициент сопротивления $f = 0,02$. Масса троллейбуса 17,5 т, площадь лобового сопротивления $A_{\text{лоб}} = 7 \text{ м}^2$, коэффициент сопротивления воздуха $k = 0,4 \text{ Нс}^2/\text{м}^4$. Рассчитать, во сколько раз сила сопротивления качению больше силы сопротивления воздуха.

Рекомендация. Для определения зависимости коэффициента сопротивления качению от скорости воспользоваться формулой

$$f = f_0[1 + (0,0216v)^2].$$

Ответ. $F_f = 4 \text{ кН}$; $P_f = 65,8 \text{ кВт}$; $F_B = 0,8 \text{ кН}$; $P_B = 13 \text{ кВт}$.

Сила сопротивления качению в пять раз больше силы сопротивления воздуха.

Задача 3.2.20. Определить силу и мощность сопротивления движению, а также силу и мощность сопротивления воздуха трамвая, движущегося со скоростью 60 км/ч по горизонтальному участку рельсового пути. Масса трамвая 27,3 т, площадь лобового сопротивления $A_{\text{лоб}} = 7 \text{ м}^2$, коэффициент сопротивления воздуха $k = 0,4 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$. Удельные сопротивления движению трамвая составляют:

- от трения колесной пары по рельсу 0,45;
- трения скольжения колесной пары по рельсам 0,1;
- неправильного формирования тележки 0,2;
- виляния вагона 0,15;
- ударов колесной пары на стыках рельсов 0,35.

Рассчитать, во сколько раз сила сопротивления качению больше силы сопротивления воздуха.

Ответ. $F_f = 334,8 \text{ Н}$; $F_B = 777,8 \text{ Н}$.

Сила сопротивления воздуха трамвая в 2,3 раза больше силы сопротивления его качению.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите все радиусы колеса.
2. Что понимается под кинематическим радиусом колеса и от чего он зависит?
3. Что понимается под силой и моментом сопротивления качению колеса, под удельным сопротивлением качению колеса?
4. Влияет ли скорость движения подвижного состава на коэффициент сопротивления качению колеса?
5. В каких пределах находится коэффициент сопротивления качению при движении троллейбуса по асфальтобетонной дороге?
6. Назовите основные составляющие удельного сопротивления качению колесной пары по рельсовому пути.
7. Назовите режимы качения колеса. От чего они зависят? Что понимается под силой сцепления колеса с дорогой или рельсом?
8. В каком диапазоне находятся коэффициенты сцепления пневматической шины с асфальтобетонной дорогой и колеса с рельсом?
9. На что расходуется мощность, подводимая к колесу, и что понимается под КПД колеса?
10. Влияет ли уклон дороги или рельсового пути на сопротивление движению подвижного состава?
11. В каких единицах выражается уклон дороги и рельсового пути?
12. Какой показатель характеризует совершенство формы подвижного состава с точки зрения аэродинамики и что понимается под коэффициентом обтекаемости?
13. При каких скоростях движения подвижного состава сила сопротивления воздуха становится соизмерима с силой сопротивления движению?
14. В чем физический смысл коэффициента учета вращающихся масс подвижного состава?
15. Какие слагаемые входят в уравнение прямолинейного движения подвижного состава? Каков их физический смысл? Какие из составляющих, входящих в уравнение, меняют знак в зависимости от режима движения?

3.2.2. Тягово-скоростные свойства подвижного состава

Задача 3.2.21. Вычислить критическую $v_{кр}$ и максимальную v_{max} скорости троллейбуса. Определить динамический фактор при максимальной скорости $D_{v,max}$ троллейбуса и динамический фактор D_v при максимальном моменте электродвигателя. Троллейбус, имеет следующие параметры: $m = 17525$ кг; $u_{тр} = 9,32$; $\eta_{тр} = 0,93$; $r_{к0} = 0,544$ м; $k_b = 0,45$ Н·с²/м⁴; $A_{лоб} = 6,7$ м²; $f = 0,018$. Параметры двигателя: $P_{max} = 170,3$ кВт; $M_{дв,max} = 402$ Н·м; $n_{дв,max} = 3900$ об/мин; частота вращения якоря электродвигателя при максимальном моменте $n_{дв} = 2000$ об/мин.

Решение

1. Максимальная скорость троллейбуса

$$v_{max} = \frac{\pi n_{дв,max}}{30 u_{тр}} r_{к0} = \frac{\pi \cdot 3900}{30 \cdot 9,32} 0,544 = 18,032 \text{ м/с} = 64,5 \text{ км/ч.}$$

2. Сила тяги при максимальной скорости троллейбуса

$$F_k = fmg + k_b A_{лоб} v_{max}^2 = 0,018 \cdot 17525 \cdot 9,81 + \\ + 0,45 \cdot 6,7 \cdot 18,032^2 = 4,075 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

3. Динамический фактор при максимальной скорости

$$D_{v,max} = \frac{F_k - F_b}{mg} = \frac{4,075 \cdot 10^3 - 0,45 \cdot 6,7 \cdot 18,032^2}{17525 \cdot 9,81} = 0,018.$$

4. Скорость троллейбуса при максимальном момента электродвигателя ($n_{дв} = 2000$ об/мин)

$$v_{n=2000} = \frac{\pi n_{дв}}{30 u_{тр}} r_{к0} = \frac{\pi \cdot 2000}{30 \cdot 9,32} 0,544 = 12,255 \text{ м/с} = 44,118 \text{ км/ч.}$$

5. Динамический фактор при максимальном моменте электродвигателя

$$D_{\text{кр}} = \frac{F_{\text{к}} - F_f}{mg} = \frac{402 \cdot 9,32 \cdot 0,93}{0,544} - 0,45 \cdot 6,7 \cdot 12,255^2}{17525 \cdot 9,81} = 0,035.$$

Ответ. $D_{0 \text{ max}} = 0,045$; $D_{v \text{ max}} = 0,018$; $v_{\text{max}} = 18,032 \text{ м/с}$ (64,5 км/ч); $v_{n=2000} = 12,255 \text{ м/с}$ (44,12 км/ч).

Задача 3.2.22. Троллейбус на горизонтальном участке дороги развивает ускорение $a = 0,5 \text{ м/с}^2$. Определить уклон i , который он может преодолеть при постоянной скорости, если его динамический фактор $D = 0,085$, а $\delta_{\text{п.м}} = 1,05$. Определить значение коэффициента сопротивления качению f .

Решение

1. На горизонтальном участке дороги ($\alpha_{\text{д}} = 0$; $i = 0$) ускорение можно определить по формуле

$$\frac{dv}{dt} = a = \frac{D - \psi}{\delta_{\text{п.м}}}.$$

Откуда находим выражение для определения сопротивления качению троллейбуса ($\psi = f \cos \alpha_{\text{д}} + G \sin \alpha_{\text{д}}$):

$$f = D - \frac{a \delta_{\text{п.м}}}{g} = 0,065 - \frac{0,5 \cdot 1,05}{9,81} = 0,011.$$

2. При равномерном движении на подъеме ($a \delta_{\text{п.м}} / g \neq 0$), имеем следующее выражение для определения суммарного сопротивления дороги:

$$\psi = f + i = D - \frac{a \delta_{\text{п.м}}}{g}.$$

Откуда величина уклона

$$i = D - f = 0,085 - 0,011 = 0,074.$$

Ответ. $i = 0,074$ ($\alpha_d = 4,24^\circ$); $f = 0,011$.

Задача 3.2.23. Определить максимальную величину уклона, который может преодолеть трамвай в сухую погоду (рельс чистый, обезжиренный) и после дождя (рельс чистый, политый водой) при движении с постоянной скоростью. Параметры трамвая: $m = 25,5$ т; $M_{дв} = 121,6$ Н·м; $D_k = 700$ мм. $u_{тр} = 7,43$; $\eta_{тр} = 0,93$. Принять средние значения удельных сопротивлений качению колесной пары по рельсового пути W и минимальные значения коэффициентов сцепления φ_x . Сопротивлением воздуха пренебречь.

Р е ш е н и е

1. По таблицам прил. 3 и 4 выбираем удельные значения коэффициентов сопротивления качению (0,3–0,6; 0,01–0,02; 0,1; 0,2; 0,15; 0,3–0,6) и коэффициентов сцепления для сухих рельсов $\varphi_c = 0,32$; для мокрых рельсов $\varphi_m = 0,20$.

Рассчитываем средние значения удельных сопротивлений, которые затем используем для расчета, и суммарное удельное сопротивление качению трамвая:

$$w_1 = \frac{0,3 + 0,6}{2} = 0,45;$$

$$w_2 = \frac{0,01 + 0,02}{2} = 0,015;$$

$$w_6 = \frac{0,3 + 0,6}{2} = 0,45;$$

$$W = \sum_{i=1}^6 w_i = 1,365.$$

2. Вес трамвая

$$G = mg = 25,5 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 2,502 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

3. Сила тяги трамвая:

по двигателю

$$F_{\text{к.дв}} = \frac{M_{\text{дв}} \cdot U_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{тр}}}{r_{\text{к0}}} = \frac{50,8 \cdot 7,43 \cdot 0,93}{0,5 \cdot 0,7} = 1,003 \cdot 10^3 \text{ Н,}$$

сцеплению, сухой рельсовый путь:

$$F_{\text{к.фс}} = \varphi G = 0,32 \cdot 2,502 \cdot 10^3 = 800,64 \text{ Н;}$$

сцеплению, мокрый рельсовый путь:

$$F_{\text{к.фм}} = \varphi_{\text{м}} G = 0,2 \cdot 2,502 \cdot 10^3 = 500,4 \text{ Н.}$$

4. Сравнивая значения силы тяги трамвая, получаем, что его сила тяги ограничена условиями сцепления колес с рельсом как при сухой погоде, так и после дождя. Поэтому дальнейший расчет ведем по силе тяги, равной силе тяги по сцеплению.

5. Без учета силы сопротивления воздуха динамический фактор равен:

при сухой погоде

$$D_{\text{с}} = \frac{F_{\text{кс}}}{G} = \frac{800,64}{2502 \cdot 10^5} = 0,32;$$

после дождя

$$D_{\text{м}} = \frac{F_{\text{км}}}{G} = \frac{500,4}{2502 \cdot 10^5} = 0,20.$$

6. Максимальный преодолеваемый трамваем уклон определим по формуле для полноприводной машины

$$D = \psi = f + i.$$

Откуда

$$i = D - f.$$

Для сухого рельсового пути

$$i_c = 0,32 - 1,365 \cdot 10^{-3} = 0,319 (17,704^\circ);$$

для рельсового пути после дождя

$$i_c = 0,2 - 1,365 \cdot 10^{-3} = 0,196 (11,23^\circ).$$

Ответ. В сухую погоду $i_{\max} = 0,319$ ($\alpha_{\max} = 17,704^\circ$).
После дождя $i_{\max} = 0,196$ ($\alpha_{\max} = 11,23^\circ$).

Задача 3.2.24. Троллейбус движется по горизонтальному участку дороги с асфальтобетонным покрытием хорошего качества. Определить динамический фактор и ускорение, которое может развить троллейбус при максимальном крутящем моменте тягового электродвигателя $M_{\text{дв.макс}}$ и при его максимальной мощности $P_{\text{дв.макс}}$. Параметры тягового электродвигателя: $P_{\text{дв.макс}} = 154,4$ кВт; $M_{\text{дв.макс}} = 637,4$ Н·м; $n_{\text{р}=\text{макс}} = 2600$ об/мин; $n_{\text{Мдв}=\text{макс}} = 1550$ об/мин. Параметры троллейбуса: $m = 15,3$ т; $u_{\text{тр}} = 8,85$; $\eta_{\text{тр}} = 0,93$; $r_{\text{к0}} = 0,544$ м; $k_{\text{в}} = 0,5$ Н·с²/м⁴; $A_{\text{лоб}} = 7,3$ м²; $\delta_{\text{п.м}} = 1,08$. Коэффициент сопротивления качению определить по эмпирической формуле (3.1).

Р е ш е н и е

1. Сила тяги троллейбуса:
при максимальном моменте тягового электродвигателя

$$F_{\text{к.М}=\text{макс}} = \frac{M_{\text{дв.макс}} u_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}}}{r_{\text{к0}}} = \frac{637,4 \cdot 8,85 \cdot 0,93}{0,544} = 9,644 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

максимальной мощности тягового электродвигателя

$$M_{\text{дв.Р}=\text{макс}} = \frac{30}{\pi n_{\text{Р}=\text{макс}}} P_{\text{макс}} = \frac{30}{\pi \cdot 2600} 154,4 \cdot 10^3 = 568,1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$F_{\text{к.Р}=\text{макс}} = \frac{M_{\text{дв.н}} u_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}}}{r_{\text{к0}}} = \frac{568,1 \cdot 8,85 \cdot 0,93}{0,544} = 8,595 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

2. Скорость движения троллейбуса
при максимальном моменте тягового электродвигателя

$$v_{M=\max} = \frac{\pi \eta_{M=\max}}{30 u_{\text{тр}}} r_{\text{к0}} = \frac{\pi \cdot 1550 \cdot 0,544}{30 \cdot 8,85} = 9,977 \text{ м/с};$$

максимальной мощности тягового электродвигателя

$$v_{P=\max} = \frac{\pi \eta_{P=\max}}{30 u_{\text{тр}}} r_{\text{к0}} = \frac{\pi \cdot 2600 \cdot 0,544}{30 \cdot 8,85} = 16,736 \text{ м/с}.$$

3. Коэффициент сопротивления качению по асфальтовой дороге хорошего качества ($f_0 = 0,011$):

при скорости 9,977 м/с (максимальный момент тягового электродвигателя)

$$f_{M=\max} = f_0 \left(1 + \frac{v_{M=\max}^2}{20000} \right) = 0,011 \left(1 + \frac{9,977^2 \cdot 3,6^2}{20000} \right) = 0,012;$$

скорости 16,736 м/с (максимальная мощность тягового электродвигателя)

$$f_{P=\max} = f_0 \left(1 + \frac{v_{P=\max}^2}{20000} \right) = 0,011 \left(1 + \frac{16,736^2 \cdot 3,6^2}{20000} \right) = 0,013.$$

4. Сила сопротивления воздуха:

при скорости 9,977 м/с (максимальный момент тягового электродвигателя)

$$F_{\text{в.}M=\max} = k_{\text{в}} A_{\text{лоб}} v_{M=\max}^2 = 0,5 \cdot 7,3 \cdot 9,977^2 = 363,323 \text{ Н}.$$

скорости 16,736 м/с (максимальная мощность тягового электродвигателя)

$$F_{\text{в.}P=\max} = k_{\text{в}} A_{\text{лоб}} v_{P=\max}^2 = 0,5 \cdot 7,3 \cdot 16,736^2 = 1,022 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

5. Динамический фактор:

при максимальном моменте тягового электродвигателя

$$D_{M=\max} = \frac{F_{к.M=\max} - F_{в.M=\max}}{G} = \frac{9,644 \cdot 10^3 - 364,323}{15,3 \cdot 10^3 \cdot 9,81} = 0,062;$$

максимальной мощности тягового электродвигателя

$$D_{P=\max} = \frac{F_{к.P=\max} - F_{в.P=\max}}{G} = \frac{8,595 \cdot 10^3 - 1,022 \cdot 10^3}{15,3 \cdot 10^3 \cdot 9,81} = 0,050.$$

6. Ускорение троллейбуса:

при максимальном моменте тягового электродвигателя

$$a_{M=\max} = \frac{(D_{M=\max} - f_{M=\max})g}{\delta_{п.м}} = \frac{(0,062 - 0,012) \cdot 9,81}{1,08} = 0,045 \text{ м/с}^2.$$

максимальной мощности тягового электродвигателя

$$a_{P=\max} = \frac{(D_{P=\max} - f_{P=\max})g}{\delta_{п.м}} = \frac{(0,050 - 0,013) \cdot 9,81}{1,08} = 0,034 \text{ м/с}^2.$$

Ответ. При максимальном моменте $D_{M=\max} = 0,06$; $a_{M=\max} = 0,045 \text{ м/с}^2$.

При максимальной мощности $D_{P=\max} = 0,050$; $a_{P=\max} = 0,034 \text{ м/с}^2$.

Задача 3.2.25. Троллейбус начинает преодолевать уклон дороги при максимальной скорости $v_{\max} = 62,5 \text{ км/ч}$. Максимальный уклон, который способен преодолеть троллейбус, составляет $i_{\max} = 0,04$. Определить предельный уклон дороги $i_{\text{пред}}$, который он может преодолеть на участке длиной $s = 500 \text{ м}$. Коэффициент приспособляемости тягового электродвигателя по угловой скорости $k_{\omega} = 1,78$.

Р е ш е н и е

1. Коэффициент приспособляемости тягового электродвигателя по угловой скорости рассчитывается по формуле

$$k_{\omega} = \frac{\omega_{п.}}{\omega_{м.}}$$

где ω_n и ω_m – угловые скорости вала тягового электродвигателя соответственно номинальная и при максимальном моменте.

При этом скорость троллейбуса уменьшается в k_ω раз, т. е.

$$v_{кр} = \frac{v_{max}}{3,6k_\omega} = \frac{62,5}{3,6 \cdot 1,78} = 9,753 \text{ м/с} = 35,1 \text{ км/ч.}$$

2. Дополнительный уклон

$$i_{доп} = \frac{0,5\delta_{пм}(v_{max}^2 - v_{кр}^2)}{gs} = \frac{0,5 \cdot 1 \cdot \left[\left(\frac{62,5}{3,6} \right)^2 - 9,753^2 \right]}{9,81 \cdot 500} = 0,021.$$

3. Предельный уклон

$$i_{пред} = i_{max} + i_{доп} = 0,04 + 0,021 = 0,061 = 3,5^\circ.$$

Ответ. $i_{пред} = 0,021$ ($\alpha_{пред} = 3,5^\circ$).

Задача 3.2.26. Определить мощность, которую развивает тяговый электродвигатель троллейбуса при равномерном движении со скоростью $v = 55$ км/ч на дороге с уклоном $i = 0,03$ при коэффициенте сопротивления качению $f = 0,022$. Параметры троллейбуса: $m = 14500$ кг; $\eta_{тр} = 0,94$; $k_v = 0,42$ Н·с²/м⁴; $A_{люб} = 7,2$ м².

Решение

1. Сила сопротивления воздуха

$$F_B = k_v A_{люб} v^2 = 0,42 \cdot 7,2 \cdot \left(\frac{55}{3,6} \right)^2 = 705,833 \text{ Н.}$$

2. Сила сопротивления качению

$$F_f = fG \cos i = 0,022 \cdot 14500 \cdot 9,81 \cdot \cos 0,03 = 3,128 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

3. Сила сопротивления подъему

$$F_{\alpha} = G \sin i = 14500 \cdot 9,81 \cdot \sin 0,03 = 4,267 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

4. Сила тяги троллейбуса

$$F_{\kappa} = F_f + F_{\text{в}} + F_{\alpha} = 3,128 \cdot 10^3 + 705,833 + 4,267 \cdot 10^3 = 8,101 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

5. Мощность двигателя

$$P_{\text{дв}} = \frac{F_{\kappa} v}{\eta_{\text{тр}}} = \frac{8,101 \cdot 10^3 \cdot \frac{55}{3,6}}{0,94} = 1,317 \cdot 10^5 \text{ Вт} = 131,7 \text{ кВт.}$$

Ответ. 131,7 кВт.

Задача 3.2.27. Определить коэффициент использования мощности двигателя И и величину возможного ускорения трамвая a , если суммарная мощность тяговых электродвигателей в заданных условиях ($W = 1,12$; $i = 0,03$; $v = 57,3$ км/ч) составляет $P_{\text{дв.}} = 180$ кВт. Параметры трамвая: $m = 24350$ кг; $\eta_{\text{тр}} = 0,95$; $k_{\text{в}} = 0,42 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; $A_{\text{лоб}} = 7,3 \text{ м}^2$.

Р е ш е н и е

1. Сила сопротивления качению трамвая

$$F_f = W m g \cos \alpha_{\text{д}} = 1,12 \cdot \frac{24350}{1000} \cdot 9,81 \cdot \cos 0,03 = 267,418 \text{ Н.}$$

2. Сила сопротивления движению на подъем

$$F_{\alpha} = m g \sin \alpha_{\text{д}} = 24350 \cdot 9,81 \cdot \sin 0,03 = 7,165 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

3. Сила сопротивления воздуха

$$F_{\text{в}} = k_{\text{в}} A_{\text{лоб}} v^2 = 0,42 \cdot 7,3 \cdot \left(\frac{57,3}{3,6} \right)^2 = 776,741 \text{ Н.}$$

4. Сила тяги, развиваемая трамваем при равномерном движении с заданной скоростью:

$$F_k = F_f + F_b + F_a = 267,418 + 7,165 \cdot 10^3 + 776,741 = 8,209 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

5. Мощность, развиваемая тяговым электродвигателем при равномерном движении с заданной скоростью:

$$P_{\text{дв}} = \frac{F_k v}{\eta_{\text{тр}}} = \frac{8,209 \cdot 10^3 \cdot \frac{57,3}{3,6}}{0,95} = 1,375 \cdot 10^5 \text{ Вт} = 137,5 \text{ кВт.}$$

6. Коэффициент использования мощности двигателя

$$\eta = \frac{P_{\text{дв}}}{P_{\text{дв.макс}}} = \frac{137,5}{180} = 0,764.$$

7. Сила тяги, развиваемая трамваем при ускоренном движении:

$$P_{\text{ид}} = \frac{F_r v}{\eta_{\text{тр}}}.$$

Откуда

$$F_k = \frac{P_{\text{дв}} \eta_{\text{тр}}}{v} = \frac{180 \cdot 10^3 \cdot 0,95}{\frac{57,3}{3,6}} = 1,074 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

8. Ускорение, которое получит трамвай, если его двигатели развивают суммарную мощность 180 кВт:

$$m \dot{x} = \sum_{i=1}^n F_i,$$

где F_i – силы, действующие на трамвай.

Отсюда

$$a = \ddot{x} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{m} = \frac{1,074 \cdot 10^4 - 267,418 - 7,165 \cdot 10^3 - 776,741}{24350} = 0,104 \text{ м/с}^2.$$

Ответ. $I = 0,764$; $a = 0,104 \text{ м/с}^2$.

Задача 3.2.28. Определить те же параметры, что и в предыдущей задаче при $i = 0,06$ и $P_{\text{дв}} = 337 \text{ кВт}$.

Р е ш е н и е

1. Сила сопротивления качению трамвая

$$F_f = \omega mg \cos \alpha_{\text{д}} = 1,12 \cdot \frac{24350}{1000} \cdot 9,81 \cdot \cos 0,06 = 267,057 \text{ Н.}$$

2. Сила сопротивления движению на подъем

$$F_{\alpha} = mg \sin \alpha_{\text{д}} = 24350 \cdot 9,81 \cdot \sin 0,06 = 1,432 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

3. Сила сопротивления воздуха

$$F_{\text{в}} = k_{\text{в}} A_{\text{лоб}} v^2 = 0,42 \cdot 7,3 \cdot \left(\frac{57,3}{3,6} \right)^2 = 776,741 \text{ Н.}$$

4. Сила тяги, развиваемая трамваем при равномерном движении с заданной скоростью:

$$F_{\text{к}} = F_f + F_{\text{в}} + F_{\alpha} = 267,057 + 1,432 \cdot 10^4 + 776,741 = 1,536 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

5. Мощность, развиваемая тяговым электродвигателем при равномерном движении с заданной скоростью:

$$P_{\text{дв}} = \frac{F_{\text{к}} v}{\eta_{\text{тр}}} = \frac{1,536 \cdot 10^4 \cdot \frac{57,3}{3,6}}{0,95} = 2,573 \cdot 10^5 \text{ Вт} = 257,3 \text{ кВт.}$$

6. Коэффициент использования мощности двигателя

$$И = \frac{P_{\text{дв}}}{P_{\text{дв.мах}}} = \frac{257,3}{337} = 0,764.$$

7. Сила тяги, развиваемая трамваем при ускоренном движении:

$$P_{\text{гд}} = \frac{F_{\text{г}} \nu}{\eta_{\text{тр}}}.$$

Откуда

$$F_{\text{к}} = \frac{P_{\text{дв}} \eta_{\text{тр}}}{\nu} = \frac{337 \cdot 10^3 \cdot 0,95}{\frac{57,3}{3,6}} = 2,011 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

8. Ускорение, которое получит трамвай, если его двигатели развивают суммарную мощность 337 кВт:

$$m\ddot{x} = \sum_{i=1}^n F_i,$$

где F_i – силы, действующие на трамвай.

Отсюда

$$a = \ddot{x} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{m} = \frac{2,011 \cdot 10^4 - 267,057 - 1,432 \cdot 10^4 - 776,741}{24350} = 0,195 \text{ м/с}^2.$$

Ответ. $И = 0,764$; $a = -0,195 \text{ м/с}^2$.

Задача 3.2.29. Крутящий момент на одном из ведущих колес троллейбуса $M_{\text{к}} = 13,8 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Определить мощность, развиваемую тяговым электродвигателем, при равномерном движении троллейбуса, если известно, что его ведущие колеса вращаются без буксования с частотой $n_{\text{к}} = 41 \text{ об/мин}$, КПД трансмиссии $\eta_{\text{тр}} = 0,93$.

Р е ш е н и е

1. Мощность, подводимая к ведущим колесам:

$$P_{\text{к}} = P_{\text{дв}} \eta_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{к}} \nu}{3600} \text{ кВт.} \quad (3.3)$$

2. Касательная сила тяги

$$F_{\text{к}} = \frac{2M_{\text{к}}}{r_{\text{к0}}} \text{ Н.} \quad (3.4)$$

3. Скорость движения троллейбуса

$$\nu = 0,377 r_{\text{к0}} \eta_{\text{к}}, \text{ км/ч.} \quad (3.5)$$

Подставляя в уравнение (3.3) значение касательной силы тяги и скорости движения соответственно по выражениям (3.4) и (3.5), получим выражение для определения мощности тягового электродвигателя:

$$P_{\text{дв}} = 0,377 \frac{2M_{\text{к}} \eta_{\text{к}}}{3600 \eta_{\text{тр}}} = 0,377 \cdot \frac{2 \cdot 13,8 \cdot 1000 \cdot 41}{3600 \cdot 0,93} = 127,423 \text{ кВт.}$$

Ответ. $P_{\text{дв}} = 127,4 \text{ кВт.}$

Задача 3.2.30. Определить динамический фактор четырехосного трамвая с полной массой $m = 21,7 \text{ т}$ при его движении со скоростью $\nu = 21,5 \text{ км/ч}$, если касательная сила тяги равна $F_{\text{к}} = 21,2 \text{ кН}$. Коэффициент сопротивления воздуха $k_{\text{в}} = 0,42 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; площадь лобового сопротивления $A_{\text{лоб}} = 7,1 \text{ м}^2$. Определить возможность движения трамвая, если коэффициент сцепления колес с рельсами составит $\varphi = 0,1$. База трамвая $L = 7 \text{ м}$, центр масс расположен над серединой базы.

Решение

1. Динамический фактор по условиям тяги

$$D = \frac{F_r - F_d}{mg} = \frac{21,2 \cdot 10^3 - 0,42 \cdot 7,1 \cdot \left(\frac{21,5}{3,6}\right)^2}{21,7 \cdot 10^3 \cdot 9,81} = 0,099.$$

2. Касательная сила тяги трамвая, как полноприводной машины, по сцеплению

$$F_{\text{кп}} = \varphi mg = 0,1 \cdot 21,7 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 2,129 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

3. Динамический фактор по сцеплению ведущих колес с рельсами

$$D_\varphi = \frac{F_{\text{кп}} - F_{\text{в}}}{mg} = \frac{2,129 \cdot 10^4 - 0,42 \cdot 7,1 \cdot \left(\frac{21,5}{3,6}\right)^2}{21,7 \cdot 10^3 \cdot 9,81} = 0,1.$$

4. Условие непрерывного движения $D_\varphi > D$ выполняется.

Ответ. $D = 0,099$; движение трамвая по рельсовому пути с коэффициентом сцепления $0,1$ возможно.

Задача 3.2.31. Троллейбус движется с постоянной скоростью по асфальтированному участку дороги с коэффициентом сопротивления качению $f = 0,02$ на подъем с углом $\alpha_{\text{д}} = 5^\circ$. Определить динамический фактор троллейбуса.

Ответ. $D = 0,11$.

Задача 3.2.32. Определить коэффициент буксования ведущих колес троллейбуса, действительная скорость которого $v = 40$ км/ч, при угловой скорости вала тягового электродвигателя $\omega_{\text{дв}} = 205$ с⁻¹. Передаточное число трансмиссии $u_{\text{тр}} = 9,321$; радиус качения колес $r_{\text{к}} = 0,544$ м.

Ответ. $\delta = 0,071$.

Задача 3.2.33. При испытаниях троллейбуса в дорожных условиях произведено два заезда на одном и том же горизонтальном участке асфальтированной дороги со скоростями $v_1 = 18$ и $v_2 = 54$ км/ч. Были записаны величины крутящих моментов на ведущем ва-

лу главной передачи, которые при равномерном движении с указанными выше скоростями составили $M_1 = 17,52$ Н·м и $M_2 = 25,93$ Н·м. Определить коэффициент сопротивления воздуха и коэффициент сопротивления качению троллейбуса. Передаточное число трансмиссии $u_{тр} = 8,69$; КПД трансмиссии $\eta_{тр} = 0,94$; динамический радиус колеса $r_d = 0,53$ м; масса троллейбуса $m = 19,5$ т.

Ответ. $f = 1,412 \cdot 10^{-3}$; фактор обтекаемости $k_v A_{\text{лоб}} = 0,574$.

Задача 3.2.34. Сила сопротивления качению трамвая массой $m = 28,4$ т при движении по горизонтальному участку рельсового пути $F_f = 1,94$ кН. Чему равно удельное сопротивление рельсового пути при его движении на подъем с уклоном $\alpha_d = 25$ %?

Ответ. $w = 1,508$; $\psi = 51,508$.

Задача 3.2.35. Троллейбус движется с ускорением $a = 0,64$ м/с². Найти передаточное число главной передачи (трансмиссии), если угловое ускорение вала тягового электродвигателя $\varepsilon = 15,74$ с², размер шин 240-508, коэффициент деформации шины $\lambda_{ш} = 0,88$, высота профиля шины равна его ширине.

Ответ. $u_{тр} = 10,698$.

Задача 3.2.36. Трамвай массой $m = 27,1$ т движется со скоростью $v = 60$ км/ч по горизонтальному участку рельсовому пути с удельным сопротивлением $w = 1,52$. При этом суммарная сила тяги на ведущих колесных парах равна $F_{\Sigma} = 2,48$ кН. Фактор обтекаемости $k_v A_{\text{лоб}} = 1,28$ Н·с²/м². Коэффициент учета вращающихся масс $\delta_{\text{пм}} = 1,06$. Определить ускорение трамвая.

Ответ. $a = 0,836$ м/с².

Задача 3.2.37. Троллейбус массой $m = 16,5$ т движется на подъеме с уклоном $i = 6$ %. Коэффициент сопротивления качению $f = 0,025$. Тяговый электродвигатель развивает момент $M_{\text{дв}} = 587$ Н·м. Передаточное число трансмиссии $u_{тр} = 8,54$, КПД трансмиссии $\eta_{тр} = 0,88$. Расчетный радиус ведущих колес $r_{к0} = 0,535$ м. Коэффициент учета

вращающихся масс $\delta_{\text{пм}} = 1,1$. Определить ускорение троллейбуса. Сопротивлением воздуха пренебречь.

Ответ. $a = 0,8 \text{ м/с}^2$.

Задача 3.2.38. Троллейбус массой $m = 15,5 \text{ т}$ движется на подъем по асфальтовой дороге с коэффициентом сопротивления $f = 0,02$ со скоростью $v = 62 \text{ км/ч}$. При этом его касательная сила тяги составляет $F_k = 13,9 \text{ кН}$, фактор обтекаемости $k_{\text{вАлоб}} = 1,3 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2$. Определить наибольший уклон, который может преодолеть троллейбус в данных условиях.

Ответ. $i_{\text{max}} = 0,014$ или $\alpha_{\text{д}} = 0,802^\circ$.

Задача 3.2.39. При движении трамвая на подъем с начальной скоростью $v_0 = 65 \text{ км/ч}$ его скорость снизилась до $v_2 = 30 \text{ км/ч}$ через $s = 200 \text{ м}$. Удельное сопротивление движению трамвая равно $w = 0,25$; максимальный динамический фактор $D_{\text{max}} = 0,089$; коэффициент учета вращающихся масс $\delta_{\text{пм}} = 1,07$. Определить предельный уклон, который может преодолеть трамвай в заданных условиях.

Ответ. $i_{\text{пред}} = 0,134$ или $\alpha_{\text{д}} = 7,678^\circ$.

Задача 3.2.40. Троллейбус массой $m = 17,9 \text{ т}$ движется на подъеме с углом дороги $\alpha_{\text{д}} = 3^\circ 30'$. Его скорость $v = 40 \text{ км/ч}$. Определить силу и мощность сопротивления подъему.

Ответ. $F_{\alpha} = 1,093 \text{ кН}$; $P_{\alpha} = 12,144 \text{ кВт}$.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое тягово-скоростные свойства подвижного состава и какие критерии используются для их оценки?
2. Что понимается под динамическим фактором и от каких параметров подвижного состава он зависит?
3. Что понимается под тяговой и динамической характеристиками подвижного состава и какие показатели тягово-скоростных свойств по ним можно определить?

4. Как определить ускорение, время и путь разгона подвижного состава?

5. Каковы примерные максимальные ускорения могут получить троллейбус и трамвай при разгоне, имеются ли ограничения на величины ускорений?

6. Что такое характеристики разгона подвижного состава? Какие показатели тягово-скоростных свойств определяют по этим характеристикам?

7. Как определить величины максимального и предельного уклонов, которые могут преодолеть троллейбус и трамвай?

8. Что собой представляет уравнение мощностного баланса подвижного состава? По каким формулам вычисляются его составляющие?

9. Для решения каких задач используется уравнение мощностного баланса подвижного состава?

10. Каковы преимущества и недостатки сочлененных троллейбусов и трамваев?

11. Поясните, почему действительные тягово-скоростные свойства подвижного состава несколько отличаются от значений, приведенных в их технических характеристиках?

12. Почему при расчете силы сопротивления качению трамвая используются удельные величины?

13. Как определить силу сопротивления воздуха при встречном и попутном ветре при движении подвижного состава?

14. Что дает применение песка при буксовании колес трамвая и какой величины должны быть зерна песка?

15. Назовите составляющие силы сопротивления качению трамвайного колеса и их численные удельные значения.

3.2.3. Тормозные свойства подвижного состава

Задача 3.2.41. Троллейбус движется со скоростью $v_0 = 60$ км/ч по горизонтальной дороге, имеющей коэффициенты сопротивления качению $f = 0,02$ и сцепления $\varphi_x = 0,6$. На какой минимальной длине можно снизить его скорость до $v_2 = 30$ км/ч? Сопротивлением воздуха пренебречь. Принять $\delta_{п.м} = 1,05$.

Р е ш е н и е

1. Запишем уравнение движения троллейбуса при торможении и решим его относительно замедления:

$$\delta_{\text{пм}} m \ddot{x} = -(F_m + F_f).$$

В случае когда тормозная сила достигает значения по сцеплению $F_T = \varphi \times G$, предыдущее выражение примет вид

$$\delta_{\text{пм}} m \ddot{x} = \delta_{\text{пм}} m a = -(\varphi G + fG).$$

Откуда замедление троллейбуса a

$$a = -\frac{(\varphi + f)g}{\delta} = -\frac{(0,6 + 0,02)9,81}{1,05} = -5,793 \text{ м/с}^2.$$

2. При постоянном замедлении скорость троллейбуса изменяется по закону

$$v_2 = v_0 + at.$$

Тогда время, за которое скорость уменьшится от скорости v_0 до скорости v_2 :

$$t = \frac{v_2 - v_0}{a} = \frac{30 - 60}{3,6 \cdot (-5,793)} = 1,439 \text{ с.}$$

3. Зная время и замедление, определяем путь, пройденный троллейбусом:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2} = \frac{60}{3,6} \cdot 1,439 - \frac{5,793 \cdot 1,439^2}{2} = 17,985 \text{ м} \approx 18 \text{ м.}$$

Ответ. $s = 18 \text{ м.}$

Задача 3.2.42. Определить необходимый тормозной момент $M_{\text{к.т}}$ для обеспечения значения замедления $a_{\text{т.уст}} = 6 \text{ м/с}^2$ троллейбуса при испытаниях типа «ноль». Параметры троллейбуса: $m = 18,5 \text{ т}$; $r_{\text{к0}} = 0,544 \text{ м}$; $k_b = 0,55 \text{ Нс}^2/\text{м}^4$; $A_{\text{люб}} = 7,1 \text{ м}^2$. Принять $f = 0,015$; $\delta_{\text{пм}} = 1,05$. Силу сопротивления воздуха считать постоянной, вычислив ее при

$\frac{2}{3}v_0$. Определить в процентах влияние сопротивления воздуха и сопротивление качению на снижение требуемого тормозного момента.

Решение

1. Сила сопротивления воздуха

$$F_B = k_B A_{\text{лоб}} v^2 = 0,55 \cdot 7,1 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{60}{3,6} \right)^2 = 482,099 \text{ Н.}$$

2. Момент сопротивления качению

$$M_f = f G r_{k0} = 0,015 \cdot 18,5 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 0,544 = 1,481 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

3. Уравнение движения троллейбуса при торможении в общем случае

$$\delta_{\text{пм}} m a = - \left(\frac{M_{\text{кт}} + M_f}{r_{rj}} + F_B \right).$$

Требуемый тормозной момент $M_{\text{кт}}$:

$$M_{\text{кт}} = (-F_B - \delta_{\text{пм}} m a) r_{k0} - M_f = \\ = \left[-482,099 - 1,05 \cdot 18,5 \cdot 10^3 \cdot (-6) \right] \cdot 0,544 - 1,481 \cdot 10^3 = 6,166 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

4. Доля сопротивления воздуха

$$\frac{482,099 \cdot 0,544}{6,166 \cdot 10^4} \cdot 100 = 0,425\%.$$

5. Доля сопротивления качению

$$\frac{1,481 \cdot 10^3}{6,166 \cdot 10^4} \cdot 100 = 2,402\%.$$

Ответ. $M_{\text{кт}} = 6,043 \cdot 10^4$ Н·м. Сопротивление воздуха составляет 0,434 %, сопротивление качению – 4,5 %.

Задача 3.2.43. Троллейбус движется со скоростью $v_0 = 60$ км/ч по дороге с коэффициентом сцепления $\varphi_x = 0,6$. На расстоянии 50 м перед троллейбусом неожиданно возникло препятствие. Водитель применяет экстренное торможение. Определить возможность остановки троллейбуса до препятствия, приняв время реакции водителя $t_p = 1,0$ с; время срабатывания тормозного привода $t_3 = 0,2$ с; время нарастания замедления $t_n = 0,4$ с.

Р е ш е н и е

1. Остановочный путь троллейбуса

$$s_{\text{ост}} = v_0(t_p + t_3 + 0,5t_n) + \frac{v_0^2}{2\varphi_x g} =$$
$$= \frac{60}{3,6} \cdot (1,0 + 0,2 + 0,5 \cdot 0,4) + \frac{60^2}{3,6^2 \cdot 2 \cdot 0,6 \cdot 9,81} = 46,93 \text{ м.}$$

2. Троллейбус остановится за $50 - 46,93 = 3,07$ м до препятствия, т. е. ДТП не произойдет.

Ответ. $s_{\text{ост}} = 46,93$ м. Троллейбус будет остановлен на расстоянии 3 м до препятствия.

Задача 3.2.44. Полагая полное использование сцепных возможностей, определить при каком коэффициенте сцепления φ_x экстренное торможение троллейбуса будет эффективным, если тормозной момент тягового электродвигателя $M_{\text{т.дв}} = 25$ Н·м, момент инерции электродвигателя $J_{\text{дв}} = 1,2$ кг·м², передаточное число трансмиссии $u_{\text{тр}} = 8,95$, радиус качения колес $r_{\text{к0}} = 0,544$ м.

Р е ш е н и е

1. При совместном торможении тяговым электродвигателем $M_{\text{т.дв}}$ и механическими тормозами $M_{\text{тм}}$ замедление троллейбуса a можно определить по выражению

$$|a| = \frac{1}{\delta_k m} \left[\frac{M_{тм} + M_f}{r_{к0}} + \left(M_{т.дв} - \frac{J_{дв} u_{тр} |a|}{r_{к0}} \right) \frac{u_{тр}}{r_{к0} n_{тр}} + F_{\alpha} + F_{в} \right],$$

т. е. совместное торможение будет эффективным, когда выражение в круглых скобках положительно – тормозной момент тягового электродвигателя должен быть больше значения дроби.

При полном использовании сцепления замедление

$$a_T = \varphi_x g.$$

2. Подставляя это значение замедления в выражение в круглых скобках, получим

$$M_{т.дв} - \frac{J_{дв} u_{тр} \varphi_x g}{r_{к0}} > 0.$$

Откуда

$$\varphi_x < \frac{M_{т.дв} r_{к0}}{J_{дв} u_{тр} g} = \frac{25 \cdot 0,544}{1,2 \cdot 8,95 \cdot 9,81} = 0,129.$$

Ответ. $\varphi_x < 0,129$.

Задача 3.2.45. Определить необходимое значение коэффициента распределения тормозных моментов β_T двухосного троллейбуса, обеспечивающего полное использование сцепных возможностей при $\varphi_x = 0,4$. Параметры троллейбуса: база $L = 6,05$ м; высота центра масс $h_c = 1,7$ м; на передний мост приходится $0,3m$, а на задний – $0,7m$ (m – полная масса троллейбуса).

Решение

1. Положение центра масс, т. е. расстояние до передней a и задней b осей:

$$m_1 = \frac{b}{L} m.$$

Отсюда расстояние b

$$b = \frac{m_1}{m} L = \frac{0,3m}{m} 6,05 = 1,815 \text{ м};$$

$$a = L - b = 6,05 - 1,815 = 4,235 \text{ м}.$$

2. Коэффициент распределения тормозных моментов β_T двухосного троллейбуса, обеспечивающего полное использование сцепных возможностей ($M_{T1} = M_{\varphi1}$; $M_{T2} = M_{\varphi2}$):

$$\beta_T = \frac{M_{T1}}{M_{T1} + M_{T2}} = \frac{b + \varphi_{\chi} h_c}{L} = \frac{1,815 + 1,7 \cdot 0,4}{6,05} = 0,412.$$

Ответ. $\beta_T = 0,412$.

Задача 3.2.46. Определить усилие в сцепном устройстве сочлененного троллейбуса $F_{сч}$ и оценить возможность возникновения его складывания при экстренном торможении. Параметры сочлененного троллейбуса: полная масса троллейбуса $m = 17,95$ т; полная масса полуприцепа $m_{пр} = 15$ т; $r_{к0} = 0,544$ м. Суммарные моменты, развиваемые тормозными механизмами троллейбусом и полуприцепа, соответственно $M_T = 40$ кН·м; $M_{T.пр} = 30$ кН·м. Определить, насколько необходимо увеличить тормозной момент прицепа, чтобы обеспечить растягивающее усилие в сцепке при торможении.

Р е ш е н и е

1. Удельные тормозные моменты:
троллейбуса

$$\gamma_{т} = \frac{M_{т.}}{m} = \frac{40 \cdot 10^3}{17,95 \cdot 10^3} = 2,228;$$

полуприцепа

$$\gamma_{пр} = \frac{M_{т.пр}}{m_{пр}} = \frac{30 \cdot 10^3}{15 \cdot 10^3} = 2,0.$$

2. Усилие в сцепке

$$F_{сц} = \frac{mm_{пр}}{m+m_{пр}} \cdot \frac{\gamma_{пр} - \gamma}{r_{к0}} = \frac{17,95 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3}{17,95 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3} \cdot \frac{2,0 - 2,228}{0,544} = -3,425 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Знак «минус» говорит о сжимающем усилии в сцепке, т. е. возможно складывание сочлененного троллейбуса.

3. Для предотвращения складывания сочлененного троллейбуса тормозной момент полуприцепа следует довести до значения равенства удельных тормозных моментов:

$$\gamma_{пр} = \gamma = \frac{M_{т.пр}}{m_{пр}}.$$

Отсюда

$$M_{т.пр} = \gamma m_{пр} = 2,228 \cdot 15 \cdot 10^3 = 3,342 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

4. Следовательно, тормозной момент полуприцепа необходимо увеличить на

$$\Delta M_{т.пр} = M_{пр} - M_{т0.пр} = 3,342 \cdot 10^4 - 3,0 \cdot 10^4 = 3,42 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Ответ. Сжимающее усилие в сцепном устройстве равно $F_{сц} = 2320 \text{ Н}$ – возможно складывание сочлененного троллейбуса. Для обеспечения растягивающего усилия в сцепке необходимо увеличить тормозной момент полуприцепа не менее чем на $3420 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Задача 3.2.47. Трамвай массой 28 т движется по мокрому рельсовому пути и начинает тормозить. Определить максимальную тор-

можную силу, которую может развить трамвай в данных условиях, и наибольшее скольжение тормозящих колес, при котором колеса не блокируются.

Р е ш е н и е

1. По прил. 4 находим, что при торможении на мокром рельсовом пути коэффициент сцепления $\varphi_{\text{торм}} = 0,052$. Тогда максимальная тормозная сила трамвая (при этом колеса блокируются)

$$F_{\text{т.ф}} = \varphi_{\text{торм}} G = 0,052 \cdot 28 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 1,428 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

где $\varphi_{\text{торм}}$ – коэффициент сцепления при торможении;

G – вес трамвая.

2. Чтобы установить зависимость тормозной силы от скольжения, воспользуемся формулой

$$F_{\text{т}} = \varphi_{\text{торм}} G (1 - e^{-ks}),$$

где k – показатель степени (берется по прил. 6);

s – скольжение (изменяется от нуля до единицы).

Выполнив расчет по приведенной формуле в пакете MathCAD ($k = 301,32$), находим, что при скольжении не более 0,01 колеса не блокируются (тормозная сила при $s = 1\%$ $F_{\text{т}} = 1,358 \cdot 10^4$ Н, что составляет 95 % от максимальной силы по сцеплению, т. е. тормозящие колеса не блокируются).

Ответ. $F_{\text{т.ф}} = 14,3$ кН. Чтобы колеса не блокировались, скольжение должно быть не более 0,01.

Задача 3.2.48. Определить оптимальное распределение тормозных сил троллейбуса между передним и задним мостами, которые могут быть реализованы на горизонтальной асфальтовой дороге при нормальной нагрузке на задний мост, составляющей 68 % от статической нагрузки ($b/L = 0,32$; $a/L = 0,68$). Отношение высоты центра масс троллейбуса к его базе $h/L = 0,25$. Принять средние значения коэффициентов сцепления и сопротивления качению.

Р е ш е н и е

1. Средние значения коэффициентов сцепления и качения по данным прил. 3 и 2:

коэффициент сцепления

$$\varphi = \frac{0,7+0,8}{2} = 0,75;$$

коэффициент сопротивления качению

$$f = \frac{0,015+0,020}{2} = 0,018.$$

2. Соотношение между тормозными силами на переднем и заднем мостах будет оптимальным, когда распределение тормозных сил пропорционально нормальным нагрузкам на мосты:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{F_{m1\varphi}}{F_{m2\varphi}} = \frac{b+h(\varphi+f)}{a-h(\varphi+f)} = \frac{[0,32+0,25(0,75+0,018)] \cdot 100}{[0,68-0,25(0,75+0,018)] \cdot 100} = \frac{51,2}{48,8},$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты пропорциональности суммарной тормозной силы троллейбуса соответственно на переднем и заднем мостах, определяемые конструкцией тормозной системы;

$F_{r1\varphi}$ и $F_{r2\varphi}$ – максимальные тормозные силы на переднем и заднем мостах.

Ответ. 51,2 % суммарной тормозной силы должно приходиться на передний мост и 48,8 % – на задний мост, чтобы обеспечить оптимальное использование потенциальных тормозных возможностей троллейбуса.

Задача 3.2.49. Масса троллейбуса $m = 21,24$ т; база $L = 6,04$ м; центр масс расположен на расстоянии $a = 2,27$ м от оси передних колес на высоте $h_c = 1,5$ м над уровнем дороги. На передний мост приходится $k_1 = 50$ % суммарной тормозной силы, коэффициент сопротивления качению $f = 0,02$. Определить, какие колеса будут бло-

кироваться первыми на двух поверхностях дорог: одна с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,75$, вторая – с $\varphi = 0,2$.

Р е ш е н и е

1. На дороге с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,75$ замедление троллейбуса, связанное с наступлением блокирования передних колес, определяется по уравнению

$$\left(\frac{a}{g}\right)_1 = \frac{\varphi \frac{b}{L} + k_1 f}{k_1 - \varphi \frac{h}{L}} = \frac{0,75 \cdot \frac{2,27}{6,04} + 0,5 \cdot 0,02}{0,5 - 0,75 \cdot \frac{1,5}{6,04}} = 0,93,$$

где b – расстояние от центра масс до оси задних колес;

L – база троллейбуса;

k_1 – коэффициент пропорциональности суммарной тормозной силы на колесах переднего моста.

2. Замедление троллейбуса, связанное с наступлением блокирования задних колес, определяется по уравнению:

$$\left(\frac{a}{g}\right)_2 = \frac{\varphi \frac{a}{L} + (1 - k_1) f}{1 - k_1 + \varphi \frac{h}{L}} = \frac{0,75 \cdot \frac{6,04 - 2,27}{6,04} + (1 - 0,5) \cdot 0,02}{1 - 0,5 + 0,75 \cdot \frac{1,5}{6,04}} = 0,697.$$

Так как $(a/g)_1 > (a/g)_2$, задние колеса троллейбуса будут блокироваться раньше на дороге с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,75$.

3. На дороге с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,2$ замедление троллейбуса определяем по тем же уравнениям:

$$\left(\frac{a}{g}\right)_1 = \frac{\varphi \frac{b}{L} + k_1 f}{k_1 - \varphi \frac{h}{L}} = \frac{0,2 \cdot \frac{2,27}{6,04} + 0,5 \cdot 0,02}{0,5 - 0,2 \cdot \frac{1,5}{6,04}} = 0,189,$$

$$\left(\frac{a}{g}\right)_2 = \frac{\varphi \frac{a}{L} + (1 - k_1) f}{1 - k_1 + \varphi \frac{h}{L}} = \frac{0,2 \cdot \frac{6,04 - 2,27}{6,04} + (1 - 0,5) 0,02}{1 - 0,5 + 0,2 \cdot \frac{1,5}{6,04}} = 0,245.$$

Так как $(a/g)_1 < (a/g)_2$, передние колеса будут блокироваться раньше задних колес на дороге с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,2$.

Ответ. На дороге с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,75$ первыми будут блокироваться колеса заднего моста;

при коэффициенте сцепления $\varphi = 0,2$ – колеса переднего моста.

Задача 3.2.50. Четырехосный трамвай массой $m = 28,5$ т тормозит на горизонтальном участке рельсового пути, коэффициент сцепления которого $\varphi = 0,25$, со скорости $v = 60$ км/ч. Определить расчетное усилие прижатие тормозных композиционных колодок для достижения 90 % максимальной тормозной силы и расчетный тормозной коэффициент для заданных условий движения.

Р е ш е н и е

1. Максимальная тормозная сила развивается при полном использовании сцепления колес с рельсами

$$F_{T\varphi} = \varphi G = 0,25 \cdot 28,5 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 6,151 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

2. Определим тормозную силу, составляющую 90 % от максимальной тормозной силы:

$$F_{T90} = 0,9 \cdot 6,151 \cdot 10^4 = 5,536 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

3. Определим тормозную силу, которую развивает один тормозной механизм, принимая, что тормозные механизмы установлены на каждом колесе:

$$F_{T1} = \frac{F_{T90}}{Z_{TM}} = \frac{5,536 \cdot 10^4}{8} = 6,92 \cdot 10^3 \text{ Н,}$$

где $Z_{т.м}$ – число тормозных механизмов.

4. Для композиционных колодок расчетная сила их прижатия определяется по формуле

$$F_{к.р} = 1,22 F_{т1} \frac{0,102 F_{т1} + 20}{0,41 F_{т1} + 20} = 1,22 \cdot 6,92 \frac{0,102 \cdot 6,92 + 20}{0,41 \cdot 6,92 + 20} = 7,654 \text{ кН,}$$

где $F_{т1}$ – усилие прижатия колодки, кН.

5. Расчетный тормозной коэффициент

$$k_{т.р} = \frac{\sum_{i=1}^{Z_{тм}} F_{к.р..i}}{mg} = \frac{\sum_{i=1}^8 7,654}{28,5 \cdot 9,81} = 0,219,$$

что для трамвая при скорости 60 км/ч можно считать приемлемым (при чугунных колодках и скорости движения 80 км/ч, согласно ПТР, тормозной коэффициент должен быть не менее 0,33).

Ответ. Расчетное прижатие тормозных колодок должно быть 7,7 кН; расчетный тормозной коэффициент равен 0,219.

Задача 3.2.51. Определить путь, время торможения и замедление троллейбуса, движущегося со скоростью $v_0 = 55$ км/ч до полной остановки на горизонтальном участке асфальтовой дороги, имеющем коэффициент сцепления $\varphi = 0,6$. Коэффициент снижения эффективности торможения $k_3 = 1,2$. Время реакции водителя 0,8 с, время задержки срабатывания тормозной системы 0,2 с. Коэффициент учета вращающихся масс $\delta_{пм} = 1,1$.

Ответ. $S_T = 26,172$ м; $t_{ост} = 3,426$ с; $a = 4,46$ м/с².

Задача 3.2.52. Определить путь, время торможения и замедление трамвая, движущегося со скоростью $v_0 = 60$ км/ч, до полной остановки по горизонтальному участку рельсового пути, имеющего в режиме тяги коэффициент сцепления $\varphi = 0,21$. Коэффициент снижения эффективности торможения $k_3 = 1,25$. Время реакции водителя $t_{рв} = 0,83$ с; время срабатывания тормозной системы $t_{сраб} = 0,15$ с. Коэффициент учета вращающихся масс $\delta_{пм} = 1,12$.

Ответ. $s_T = 330,351 \text{ м}$; $t_{\text{ост}} = 40,622 \text{ с}$; $a = 0,42 \text{ м/с}^2$.

Задача 3.2.53. Троллейбус массой $m = 17,6 \text{ т}$ движется по дороге с уклоном $\alpha_d = 5^\circ$, имеющей коэффициент сцепления $\varphi = 0,7$. Определить максимальную тормозную силу по сцеплениям колес с дорогой.

Ответ. $F_{T,\varphi} = 120,4 \text{ кН}$.

Задача 3.2.54. Трамвай массой $m = 32,4 \text{ т}$ движется по рельсовому пути с уклоном $i = 40 \text{ ‰}$, имеющим коэффициент сцепления в режиме тяги $\varphi = 0,23$. Определить максимальную тормозную силу по условиям сцепления колес с рельсом.

Ответ. $F_{T,\varphi} = 21 \text{ кН}$.

Задача 3.2.55. Определить, возможно ли торможение тяговым электродвигателем троллейбуса массой $m = 17,8 \text{ т}$, движущегося по горизонтальной асфальтовой дороге, имеющей коэффициент сцепления колес с дорогой $\varphi = 0,65$, если крутящий момент на валу тягового электродвигателя составляет $M_{T,\text{дв}} = 150 \text{ Н}\cdot\text{м}$; передаточное число трансмиссии $u_{\text{тр}} = 8,56$; КПД трансмиссии $\eta_{\text{тр}} = 0,92$; расчетный радиус ведущих колес $r_{\text{к0}} = 0,544 \text{ м}$; момент инерции тягового электродвигателя $J_{\text{дв}} = 1,2 \text{ кг/м}^2$.

Условие возможности торможения тяговым электродвигателем $a_1 < a_2$, где a_1 – замедление троллейбуса от сопротивления движению; a_2 – замедление троллейбуса от действия тормозного момента тягового электродвигателя.

$$a_1 = \frac{\varphi g}{\delta_{\text{пм}}};$$
$$a_2 = \frac{M_{T,\text{дв}} r_{\text{к0}}}{J_{\text{дв}} u_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}}^2}.$$

Ответ. Торможение тяговым электродвигателем возможно, т. к. $a_1 = 6,33 \text{ м/с}^2 < a_2 = 9,39 \text{ м/с}^2$.

Задача 3.2.56. Определить, возможно ли торможение тяговым электродвигателем четырехосного трамвая массой $m = 27,5$ т, движущегося по горизонтальному рельсовому пути, имеющего коэффициент сцепления колес с рельсом в режиме тяги $\varphi = 0,23$, если крутящий момент на валу одного тягового электродвигателя составляет $M_{т.дв} = 50$ Н·м; число тяговых электродвигателей $Z_{дв} = 4$; передаточное число трансмиссии $u_{тр} = 6,53$; КПД трансмиссии $\eta_{тр} = 0,93$; расчетный радиус ведущих колес $r_{к0} = 0,35$ м; момент инерции тягового электродвигателя $J_{дв} = 0,62$ кг·м².

Условие возможности торможения тяговым электродвигателем $a_1 < a_2$, где a_1 – замедление трамвая от сопротивления движению; a_2 – замедление трамвая от действия тормозного момента тягового электродвигателя.

$$a_1 = \frac{\varphi g}{\delta_{пм}};$$

$$a_2 = \frac{M_{т.дв} r_{к0}}{J_{дв} u_{тр} \eta_{тр}^2}.$$

Ответ. Торможение тяговыми электродвигателями возможно т. к. $a_1 = 0,63$ м/с² < $a_2 = 5,0$ м/с².

Задача 3.2.57. Пренебрегая сопротивлением воздуха, определить, как изменится максимальное значение замедления, если в первом случае троллейбус затормаживается на горизонтальном участке дороги, а во втором – на участке дороги с уклоном $i = 10,5\%$. Оба участка дорог имеют одинаковые коэффициенты сцепления колес с дорогой $\varphi = 0,5$ и одинаковые коэффициенты сопротивления качению $f = 0,025$.

Ответ. Замедление при движении по горизонтальному участку дороги $5,15$ м/с²; при движении на подъем – $6,15$ м/с². Замедление троллейбуса увеличилось в $1,2$ раза.

Задача 3.2.58. Определить, как изменится величина замедления трамвая, если в первом случае он тормозится на горизонтальном участке рельсового пути, а во втором – на пути с уклоном $i = 52\%$.

Оба участка рельсового пути имеют одинаковые коэффициенты сцепления колес с рельсами $\varphi = 0,22$ и одинаковое удельное сопротивление $W = 1,43$.

Ответ. Замедление при движении по горизонтальному участку рельсового пути $0,631 \text{ м/с}^2$; при движении на подъем – $1,811 \text{ м/с}^2$. Замедление трамвая увеличилось в 1,8 раза.

Задача 3.2.59. Сочлененный троллейбус движется на подъем с уклоном $i = 12 \%$ по дороге с коэффициентом сопротивления качению $f = 0,02$ и начинает тормозить с замедлением $a_m = \ddot{x} = 2,5 \text{ м/с}^2$. Определить горизонтальную и вертикальную составляющие в сцепном устройстве сочлененного троллейбуса и нормальные нагрузки на все мосты. Масса троллейбуса $m = 17,2 \text{ т}$; база $L = 6,04 \text{ м}$; расстояние от центра масс до оси задних колес $b = 2 \text{ м}$; высота центра масс $h_{c1} = h_{c,пр} = 1,5 \text{ м}$; расстояние от оси задних колес троллейбуса до точки сцепки $l_{сц} = 2,3 \text{ м}$; высота расположения точки сцепки $h_{сц} = 0,25 \text{ м}$; масса полуприцепа $m_{пр} = 12,4 \text{ т}$; база полуприцепа $L_{пр} = 3,5 \text{ м}$; расстояние от центра масс полуприцепа до оси его колес $b_{пр} = 0,98 \text{ м}$. Тормозные силы на колесах мостов: первого $F_{т1} = 30,6 \text{ кН}$; второго $F_{т2} = 56,4 \text{ кН}$; третьего $F_{т3} = 62,7 \text{ кН}$.

Ответ. Усилие в сцепном устройстве: горизонтальное $F_{сц,г} = 112,7 \text{ кН}$; вертикальное $F_{сц,вг} = 44,04 \text{ кН}$.

Нормальные нагрузки на мосты: первый $G_1 = 44,31 \text{ кН}$; второй $G_2 = 167,2 \text{ кН}$; третий $G_3 = 76,76 \text{ кН}$.

Задача 3.2.60. Определить допустимую по тормозным свойствам скорость движения трамвая, оборудованного дисковыми тормозами, в темное время суток, если коэффициент сцепления колес с рельсами $\varphi = 0,21$.

Ответ. Допустимая по тормозным свойствам скорость движения трамвая, оборудованного дисковыми тормозами, в темное время суток составляет $5,58 \text{ м/с}$ или $20,1 \text{ км/ч}$,

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое тормозные свойства подвижного состава? Какие критерии применяются для их оценки?
2. Какие основные требования к тормозным системам регламентируют Правила № 13 ЕЭК ООН?
3. Что включает в себя уравнение движения подвижного состава при торможении? Каков физический смысл его составляющих и их влияние на тормозные свойства?
4. Как определить максимально возможное замедление подвижного состава в заданных условиях эксплуатации?
5. Что понимается под тормозной диаграммой? Каковы временные составляющие диаграммы и их примерные значения?
6. Назовите способы торможения подвижного состава. В каких условиях рекомендуется применять каждый из этих способов?
7. Назовите способы повышения эффективности торможения подвижного состава?
8. Каков принцип работы регуляторов тормозных моментов?
9. Каков принцип работы антиблокировочной системы?
10. Какие требования предъявляются к тормозным системам сцепленных машин?
11. Какими тормозными системами должен быть оборудован подвижной состав?
12. Какое максимальное замедление подвижного состава рекомендуется при служебном торможении и почему?
13. Изобразите расчетную схему троллейбуса и трамвая для исследования процесса их торможения.
14. При каком скольжении колеса достигается максимальная тормозная сила?
15. Объясните, почему нецелесообразно доводить тормозящее колесо до полного скольжения (юз).

3.2.4. Устойчивость подвижного состава

Задача 3.2.61. Как изменится критическая скорость троллейбуса по боковому опрокидыванию $v_{кр.оп}$, если высота центра масс h_c станет в 1,5 раза больше?

Р е ш е н и е

1. Критическая скорость по опрокидыванию троллейбуса

$$v_{\text{кр.оп}} = \sqrt{\frac{BLg}{2h_c\alpha}},$$

где B – ширина колеи;

L – база троллейбуса;

g – ускорение свободного падения;

h_c – высота центра масс;

α – средний угол поворота управляемых колес.

2. При увеличении высоты центра масс в 1,5 раза критическая скорость по опрокидыванию уменьшится в $\sqrt{1,5} = 1,22$ раза.

Ответ. Уменьшится в 1,22 раза.

Задача 3.2.62. Как изменится критическая скорость троллейбуса по боковому скольжению $v_{\text{кр.ф}}$ на одном и том же криволинейном участке дороги, если коэффициент сцепления уменьшился вдвое?

Р е ш е н и е

1. Критическая скорость по боковому скольжению

$$v_{\text{кр.ф}} = \sqrt{\frac{\varphi_y Lg}{\alpha}},$$

где φ_y – коэффициент сцепления в боковом направлении;

L – база троллейбуса;

g – ускорение свободного падения;

α – средний угол поворота управляемых колес.

2. При уменьшении коэффициента сцепления в 2 раза критическая скорость уменьшится в $\sqrt{2} = 1,41$ раза.

Ответ. Уменьшится в 1,41 раза.

Задача 3.2.63. Колея троллейбуса $B = 2,0$ м, а высота центра масс $h_c = 1,5$ м над поверхностью дороги. Какая причина потери поперечной устойчивости более вероятна – занос или опрокидывание, если коэффициент бокового сцепления шины с дорогой в одном случае $\varphi_y = 0,9$; в другом – $\varphi_y = 0,7$?

Р е ш е н и е

1. Критическая скорость по опрокидыванию

$$v_{\text{кр.оп}} = \sqrt{\frac{BLg}{2h_c\alpha}} = \sqrt{\frac{2,0Lg}{2 \cdot 1,5\alpha}} = 2,557\sqrt{\frac{L}{\alpha}} \text{ м/с,}$$

где B – ширина колеи;

L – база троллейбуса;

g – ускорение свободного падения;

h_c – высота центра масс;

α – средний угол поворота управляемых колес.

2. Критическая скорость по скольжению

$$v_{\text{кр.ф}} = \sqrt{\frac{\varphi_y Lg}{\alpha}},$$

где φ_y – коэффициент сцепления в боковом направлении;

L – база троллейбуса;

g – ускорение свободного падения;

α – средний угол поворота управляемых колес:

при $\varphi_y = 0,9$

$$v_{\text{кр.0,9}} = \sqrt{\frac{\varphi_y Lg}{\alpha}} = \sqrt{\frac{0,9Lg}{\alpha}} = 2,971\sqrt{\frac{L}{\alpha}} \text{ м/с;}$$

при $\varphi_y = 0,7$

$$v_{\text{кр.0,7}} = \sqrt{\frac{\varphi_y Lg}{\alpha}} = \sqrt{\frac{0,7Lg}{\alpha}} = 2,62\sqrt{\frac{L}{\alpha}} \text{ м/с.}$$

Таким образом, при $\varphi_y = 0,9$ критическая скорость по опрокидыванию меньше критической скорости по скольжению: $v_{кр.оп} < v_{кр.0,9}$, т. е. возможно опрокидывание. При $\varphi_y = 0,7$ критическая скорость по опрокидыванию больше критической скорости по скольжению: $v_{кр.оп} > v_{кр.0,9}$, т. е. возможен занос.

Ответ. При $\varphi_y = 0,9$ – опрокидывание; при $\varphi_y = 0,7$ – занос.

Задача 3.2.64. Масса кузова троллейбуса $m_{куз} = 11200$ кг. Радиус кривизны траектории $R = 50$ м. Определить угол крена кузова λ при равномерном движении троллейбуса со скоростью $v = 60$ км/ч. Плечо крена $h_\lambda = 0,4$ м. Коэффициент угловой жесткости упругих элементов подвески $c_\lambda = 195$ кН·м/рад.

Р е ш е н и е

1. Сила инерции при круговом движении

$$F_j = \frac{m_{куз} v^2}{3,6^2 R} = \frac{11200 \cdot 60^2}{3,6^2 \cdot 50} = 6,222 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

2. Ускорение в боковом направлении определим, воспользовавшись выражением для силы инерции, $F_j = ma_y$:

$$a_y = \frac{F_j}{m_{куз}} = \frac{6,222 \cdot 10^4}{11200} = 5,555 \text{ м/с}^2.$$

3. Угол крена кузова

$$\lambda_{куз} = \frac{m_{куз} h_\lambda a_y}{c_\lambda - m_{куз} g h_\lambda} = \frac{11200 \cdot 0,4 \cdot 5,555}{195 \cdot 10^3 - 11200 \cdot 9,81 \cdot 0,4} = 0,165 \text{ рад или } 9,454^\circ.$$

Ответ. $\lambda_{куз} = 0,165$ рад (приблизительно $9,5^\circ$).

Задача 3.2.65. Используя взвешивание троллейбуса на наклоняемых весах, определить высоту расположения его центра масс. Показания весов $R_{z2} = 82,5$ кН. Угол наклона опорной плоскости весов $\alpha = 30^\circ$. Данные троллейбуса: расстояние от центра масс до передней

оси $a = 4,04$ м; база $L = 6,04$ м; на задний мост на горизонтальной поверхности приходится $G_{2ст} = 75,5$ кН; радиус колеса $r_{к0} = 0,545$ м.

Р е ш е н и е

1. Составим уравнение моментов всех сил относительно точки опоры передних колес троллейбуса, стоящего на наклонной плоскости под углом α_d :

$$L G_2 \cos \alpha_d - a G \cos \alpha_d - (h_c - r_{к0}) G \sin \alpha_d = 0.$$

2. Решим полученное уравнение относительно высоты центра масс h_c :

$$h_c = L \frac{G_2}{G} \operatorname{ctg} \alpha_d - a \sin \alpha_d + r_{к0}.$$

3. Зная вес троллейбуса, приходящийся на горизонтальной поверхности на задний мост, можно определить вес троллейбуса:

$$G = \frac{L}{a} G_{2ст}.$$

4. Подставив вес троллейбуса в выражение для определения высоты центра масс, после преобразования получим:

$$\begin{aligned} h_c &= a \operatorname{ctg} \alpha_d \left(\frac{G_2}{G_{2ст}} - 1 \right) + r_{к0} = \\ &= 4,04 \operatorname{ctg} 30^\circ \left(\frac{82,5}{75,5} - 1 \right) + 0,545 = 1,194 \text{ м} \approx 1,2 \text{ м}. \end{aligned}$$

Ответ. Высота центра масс троллейбуса $h_c = 1,2$ м.

Задача 3.2.66. Определить продольный статический угол подъема сочлененного троллейбуса. Масса троллейбуса $m = 16,8$ т; масса полуприцепа $m_{пр} = 8,4$ т; расстояние от центра масс до оси передних

колес $a = 3,6$ м; высота центра масс $h_c = 1,5$ м; высота расположения тягово-сцепного устройства $h_{\text{сц}} = 0,25$ м.

Р е ш е н и е

1. Для определения продольного статического угла подъема сочлененного троллейбуса воспользуемся формулой

$$\operatorname{tg}\alpha_{\text{д}} = \frac{amg}{h_c mg + h_{\text{сц}} m_{\text{тр}} g} = \frac{3,6 \cdot 16,8 \cdot 10^3 \cdot 9,81}{1,5 \cdot 16,8 \cdot 10^3 \cdot 9,81 + 0,25 \cdot 8,4 \cdot 10^3 \cdot 9,81} = 2,215.$$

2. Угол подъема

$$\alpha_{\text{д}} = \operatorname{arctg} 2,215 = 1,147 \text{ рад} = 65,718^\circ.$$

Ответ. Продольный статический угол подъема сочлененного троллейбуса $\alpha_{\text{д}} = 65,7^\circ$.

Задача 3.2.67. Найти предельную величину подъема, которую может преодолеть сочлененный троллейбус, имеющий ведущие колеса среднего моста. Коэффициент сцепления ведущих колес с дорогой $\varphi = 0,4$. При расчете принять: масса троллейбуса $m = 15,7$ т; его база $L = 6$ м; расстояние от центра масс до оси передних колес $a = 4$ м; высота центра масс $h_c = 1,5$ м; масса полуприцепа $m_{\text{тр}} = 9,5$ т; высота расположения тягово-сцепного устройства $h_{\text{сц}} = 0,25$ м.

Р е ш е н и е

1. Предельный угол подъема, преодолеваемый сочлененным троллейбусом:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\alpha_{\text{д}} &= \frac{\varphi(L-a)mg}{mg(L-\varphi h_c) + m_{\text{тр}}g(L-\varphi h_{\text{сц}})} = \\ &= \frac{0,4 \cdot (6-4) \cdot 15,7 \cdot 10^3 \cdot 9,81}{15,7 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot (6-0,4 \cdot 1,5) + 9,5 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot (6-0,4 \cdot 0,25)} = 0,089. \end{aligned}$$

2. Находим угол подъема

$$\alpha_{\text{д}} = \operatorname{arctg} 0,089 = 0,089 \text{ рад} = 5,099^\circ.$$

Ответ. Предельный угол подъема, преодолеваемый сочлененным троллейбусом, $\alpha_d = 5,1^\circ$.

Задача 3.2.68. Определить по условиям сцепления колес с дорогой возможность движения троллейбуса на подъем с углом $\alpha_d = 12^\circ$, имеющей коэффициент сцепления $\varphi = 0,4$. База троллейбуса $L = 6,04$ м; расстояние от центра масс до оси передних колес $a = 2,2$ м; высота центра масс $h_c = 1,52$ м.

Р е ш е н и е

1. Предельный угол подъема, преодолеваемый троллейбусом:

$$\operatorname{tg} \alpha_d = \frac{a\varphi}{L - \varphi h_c}.$$

отсюда

$$\alpha_d = \operatorname{arctg} \frac{a\varphi}{L - \varphi h_c} = \operatorname{arctg} \frac{2,2 \cdot 0,4}{6,04 - 0,4 \cdot 1,52} = 0,161 \text{ рад} = 9,225^\circ.$$

Ответ. Так как предельный угол подъема меньше заданного, то движение троллейбуса в данных условиях невозможно.

Задача 3.2.69. Определить, возможно ли движение трамвая по условиям сцепления колес с рельсами на подъем с углом $\alpha_d = 2,5^\circ$, имеющих коэффициент сцепления $\varphi = 0,21$. База трамвая $L = 7,5$ м; расстояние от центра масс до оси передних колес $a = 3,75$ м; высота центра масс $h_c = 1,7$ м.

Р е ш е н и е

1. Предельный угол подъема, преодолеваемый трамваем

$$\operatorname{tg} \alpha_d = \frac{a\varphi}{L - \varphi h_c}.$$

отсюда

$$\alpha_{\text{д}} = \arctg \frac{a\varphi}{L - \varphi h_c} = \arctg \frac{3,75 \cdot 0,21}{7,5 - 0,21 \cdot 1,7} = 0,11 \text{ рад} = 6,303^\circ.$$

Ответ. Так как предельный угол подъема больше заданного, то движение трамвая в данных условиях возможно.

Задача 3.2.70. Определить возможность бокового опрокидывания троллейбуса при движении по дороге с коэффициентом сцепления колес с дорогой $\varphi = 0,4$. Ширина колеи троллейбуса $B = 1,8$ м; высота центра масс $h_c = 1,55$ м.

Р е ш е н и е

При движении на поперечном склоне скольжение наступит раньше опрокидывания, если выполняется условие

$$\varphi < \frac{B}{2h_c} = \frac{1,8}{2 \cdot 1,55} = 0,581.$$

Ответ. Так как условие скольжения выполняется, то опрокидывания троллейбуса не произойдет. Возможно только скольжение.

Задача 3.2.71. Определить высоту центра масс трамвая, если вес, приходящийся на заднюю тележку в статике, $G_{2\text{ст}} = 108,0$ кН; расстояние от центра масс до опоры передней тележки $a = 3,75$ м; радиус колеса $r_{\text{к0}} = 0,35$ м. При взвешивании трамвая угол подъема площадки весов $\alpha_{\text{д}} = 10^\circ$, нагрузка на заднюю тележку при этом $G_2 = 114,8$ кН.

Ответ. $h_c = 1,689$ м $\approx 1,7$ м.

Задача 3.2.72. Найти предельный угол подъема, ограниченный устойчивостью троллейбуса. При расчете принять: полная масса троллейбуса $m = 17,5$ т; на передний мост приходится $m_1 = 6$ т; база троллейбуса $L = 6,04$ м; высота центра масс $h_c = 1,5$ м. Сопротивлением качению и воздуха пренебречь.

Ответ. $\alpha_{\text{д}} = 0,944$ рад = $54,1^\circ$.

Задача 3.2.73. Определить по условиям сцепления предельный угол подъема, преодолеваемый трамваем, движущимся по рельсо-

вому пути с коэффициентом сцепления колес с рельсами $\varphi = 0,22$. База трамвая $L = 7,5$ м; расстояние от центра масс до оси опоры передней тележки $a = 3,75$ м; высота центра масс $h_c = 1,7$ м.

Ответ. $\alpha_d = 0,217$ рад = $12,433^\circ$.

Задача 3.2.74. Найти предельный угол подъема, ограниченный устойчивостью (по отрыву передних колес) трехосного сочлененного троллейбуса со средними ведущими колесами, движущегося с постоянной скоростью. При расчете принять: масса троллейбуса $m = 16,7$ т; масса полуприцепа $m_{пр} = 12,3$ т; высота центра масс троллейбуса и полуприцепа $h_{c1} = h_{c2} = 1,6$ м; высота расположения сцепного устройства $h_{сц} = 0,25$ м; расстояние от центра масс троллейбуса до оси его задних колес $b = 2$ м. Сопротивлением качению и воздуха пренебречь.

Ответ. Отрыв передних колес троллейбуса произойдет при движении по дороге с углом подъема $\alpha_d = 0,871$ рад = $49,905^\circ$.

Задача 3.2.75. Определить по условиям сцепления ведущих колес предельный угол подъема троллейбуса, движущегося по дороге с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,742$. Технические данные троллейбуса: база $L = 6,04$ м; расстояние от центра масс до оси задних колес $b = 2$ м; высота центра масс $h_c = 1,5$ м.

Ответ. По условиям сцепления ведущих колес предельный угол подъема троллейбуса $\alpha_d = 0,194$ рад = $16,788^\circ$.

Задача 3.2.76. Найти предельную величину подъема рельсового пути по условиям сцепления ведущих колес, которую может преодолеть трамвайный поезд с ведомым прицепным вагоном. Коэффициент сцепления рельсового пути равен $\varphi = 0,195$. Масса ведущего вагона $m = 22,56$ т; база $L = 7,5$ м; высота центра масс $h_c = 1,7$ м; масса прицепного вагона $m_{пр} = 14,37$ т; высота расположения тягово-сцепного устройства $h_{сц} = 0,55$ м.

Ответ. Предельная величина подъема рельсового пути по условиям сцепления ведущих колес с рельсом, которую может преодолеть трамвайный поезд с ведомым прицепным вагоном, $\alpha_d = 0,119$ рад = $6,218^\circ$.

Задача 3.2.77. Троллейбус движется по криволинейной траектории радиусом $R = 20$ м. Принять: колею троллейбуса $B = 1,8$ м; высоту центра масс $h_c = 1,5$ м. Определить, с какой скоростью может в данных условиях двигаться троллейбус без опрокидывания?

Ответ. Троллейбус без опрокидывания в данных условия может двигаться с максимальной скоростью $v = 10,85$ м/с = 71,46 км/ч.

Задача 3.2.78. С каким минимальным радиусом может совершать поворот троллейбус, движущийся на горизонтальном участке дороги, со скоростью 54 км/с без бокового опрокидывания? Принять колею $B = 1,8$ м; высоту центра масс $h_c = 1,5$ м.

Ответ. Троллейбус на горизонтальном участке дороги без опрокидывания может двигаться по радиусу $R = 38,226$ м со скоростью $v = 54$ км/ч.

Задача 3.2.79. Определить предельную скорость троллейбуса на вираже с радиусом $R = 100$ м и поперечным наклоном дороги $\beta_d = 4^\circ$. Колея троллейбуса $B = 1,8$ м; высота центра масс $h_c = 1,5$ м; коэффициент сцепления с дорогой $\varphi = 0,5$.

Ответ. Скольжение наступит раньше опрокидывания. Следовательно, предельная скорость троллейбуса на вираже с радиусом $R = 100$ м и поперечным наклоном дороги $\beta_d = 4^\circ$ $v = 24,07$ м/с = 86,652 км/ч.

Задача 3.2.80. Определить критическую скорость троллейбуса по боковому скольжению при движении на вираже радиусом 200 м и поперечным углом дороги $\beta_d = 7^\circ$. Коэффициент сцепления колес с дорогой $\varphi = 0,5$.

Ответ. Критическая скорость троллейбуса по боковому скольжению при движении на вираже радиусом 200 м с поперечным углом дороги $\beta_d = 7^\circ$ $v_{кр} = 36,081$ м/с = 129,892 км/ч.

Вопросы для самоконтроля

1. Что понимается под устойчивостью подвижного состава? Назовите виды устойчивости, предельные случаи потери устойчивости и критерии устойчивости.

2. Что понимается под траекторией устойчивости троллейбуса и под его курсовой устойчивостью?

3. От каких факторов зависят критические скорости подвижного состава по условиям опрокидывания и заноса (троллейбус)? Какие формулы используются для их вычисления?

4. Что такое коэффициент поперечной устойчивости и от чего он зависит?

5. Как влияет характеристика подвески на поперечную устойчивость подвижного состава?

6. Занос какого моста троллейбуса опаснее: переднего или заднего? Почему? Какие способы снижения вероятности возникновения заноса вы знаете? Каков физический смысл их воздействий?

7. Как влияют тормозные механизмы на устойчивость движения при торможении?

8. От каких факторов зависят критические скорости троллейбуса по условиям заноса и опрокидывания? Какие формулы используются для их вычисления?

9. От каких факторов зависят критические углы косогора по условиям заноса и опрокидывания? Какие формулы используются для их вычисления?

10. Что понимается под коэффициентом поперечной устойчивости и от чего он зависит?

11. Как влияет подвеска на поперечную устойчивость подвижного состава?

12. Как влияют тормозные механизмы на устойчивость движения троллейбуса при торможении?

13. От чего зависит продольная устойчивость троллейбуса? Каковы причины возможной потери устойчивости продольного движения?

14. Почему при движении по стрелочным переводам снижают скорость движения трамвая? Какие условия учитываются при расчете движения допустимой скорости трамвая по стрелочным переводам?

15. Что понимается под терминами «метацентр» и «метацентрическая высота»?

3.2.5. Криволинейное движение (управляемость) подвижного состава

Задача 3.2.81. Определить на какой предельный угол $\alpha_{\text{пред}}$ по условиям бокового скольжения могут быть повернуты передние управляемые колеса заднеприводного троллейбуса при его движении по сухой асфальтовой и по обледенелой дороге. Принять средние значения коэффициентов сопротивления качению f и сцепления φ , полагая $\varphi_y = \varphi_x$ (см. приложение 2 и 3).

Решение

1. Средние значения коэффициентов:

– сопротивления качению:

сухая асфальтовая дорога

$$f_c = \frac{0,007 + 0,015}{2} = 0,011;$$

обледенелая дорога

$$f_{\text{обл}} = \frac{0,015 + 0,030}{2} = 0,023$$

– сцепления:

сухая асфальтовая дорога

$$\varphi_c = \frac{0,7 + 0,8}{2} = 0,75;$$

обледенелая дорога

$$\varphi_{\text{обл}} = \frac{0,07 + 0,15}{2} = 0,11.$$

2. Условие качения ведомого управляемого колеса без скольжения при повороте его на некоторый угол α для заднеприводной машины имеет вид

$$\alpha \leq \arccos \frac{f}{\varphi} = \alpha_{\text{пред}}.$$

Тогда для сухой дороги

$$\alpha_{\text{пред}} = \arccos \frac{0,011}{0,75} = 1,556 \text{ рад} = 89,152^\circ;$$

для обледенелой дороги

$$\alpha_{\text{пред}} = \arccos \frac{0,023}{0,11} = 1,36 \text{ рад} = 77,922^\circ.$$

Ответ. На сухой дороге $\alpha_{\text{пред}} = 89,152^\circ$. На мокрой – $\alpha_{\text{пред}} = 77,922^\circ$.

Задача 3.2.82. Определить радиус поворота двухосного троллейбуса с учетом и без учета бокового увода колес при движении со скоростью $v = 60$ км/ч. Средний угол поворота передних управляемых колес $\alpha = 5^\circ$. Параметры троллейбуса: база $L = 5,98$ м; масса, приходящаяся на передний мост $m_1 = 5,5$ т, на задний – $m_2 = 12,1$ т; коэффициент сопротивления боковому уводу одной шины переднего моста $k_{y1} = 55$ кН/рад, а шины заднего моста $k_{y2} = 56$ кН/рад.

Р е ш е н и е

1. Коэффициенты сопротивления уводу мостов:

$$\text{переднего } k_{yM1} = 2k_{y1} = 2 \cdot 55 = 110 \text{ кН/рад};$$

$$\text{заднего } k_{yM2} = 4k_{y2} = 4 \cdot 56 = 224 \text{ кН/рад}.$$

2. Радиус поворота без учета увода (теоретический радиус поворота) шин

$$R_r = \frac{L}{\text{tg}\alpha} = \frac{5,98}{\text{tg}5^\circ} = 68,352 \text{ м},$$

где L – база троллейбуса;

α – средний угол поворота управляемых колес.

3. Радиус поворота с учетом увода (действительный радиус поворота) шин

$$R = \frac{L}{\alpha} \left[1 + \left(\frac{m_1}{k_{yM1}} - \frac{m_2}{k_{yM2}} \right) \frac{v^2}{3,6^2 L} \right] =$$

$$= \frac{5,98}{\frac{5\pi}{180}} \left[1 + \left(\frac{5,5 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} - \frac{12,1 \cdot 10^3}{224 \cdot 10^3} \right) \frac{60^2}{3,6^2 \cdot 5,98} \right] = 55,737 \text{ м,}$$

где m_1 и m_2 – соответственно массы, приходящиеся на передний и задний мосты;

v – скорость движения, км/ч.

Ответ. $R_r = 68,352$ м; $R = 55,737$ м.

Задача 3.2.83. Определить углы увода переднего и заднего мостов по данным предыдущей задачи и установить, какой поворачиваемостью обладает троллейбус.

Р е ш е н и е

1. Коэффициенты сопротивления уводу мостов:

переднего $k_{yM1} = 2k_{y1} = 2 \cdot 55 = 110$ кН/рад;

заднего $k_{yM2} = 4k_{y2} = 4 \cdot 56 = 224$ кН/рад.

2. Радиус поворота с учетом увода (действительный радиус поворота) шин

$$R = \frac{L}{\alpha} \left[1 + \left(\frac{m_1}{k_{yM1}} - \frac{m_2}{k_{yM2}} \right) \frac{v^2}{3,6^2 L} \right] =$$

$$= \frac{5,98}{\frac{5\pi}{180}} \left[1 + \left(\frac{5,5 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} - \frac{12,1 \cdot 10^3}{224 \cdot 10^3} \right) \frac{60^2}{3,6^2 \cdot 5,98} \right] = 55,737 \text{ м,}$$

где m_1 и m_2 – соответственно массы, приходящиеся на передний и задний мосты;

v – скорость движения, км/ч.

3. Боковые реакции (силы), действующие на мосты:
передний

$$R_{y1} = \frac{m_1 v^2}{3,6^2 R} = \frac{5,5 \cdot 10^3 \cdot 60^2}{3,6^2 \cdot 55,737} = 2,741 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

задний

$$R_{y2} = \frac{m_2 v^2}{3,6^2 R} = \frac{12,1 \cdot 10^3 \cdot 60^2}{3,6^2 \cdot 55,737} = 6,03 \cdot 10^4 \text{ Н},$$

где R – действительный радиус поворота.

4. Углы увода мостов:
переднего

$$\psi_1 = \frac{R_{y1}}{k_{yM1}} = \frac{2,741 \cdot 10^4}{110 \cdot 10^3} = 0,249 \text{ рад} = 14,267^\circ,$$

заднего

$$\psi_2 = \frac{R_{y2}}{k_{yM2}} = \frac{6,03 \cdot 10^4}{224 \cdot 10^3} = 0,269 \text{ рад} = 15,413^\circ.$$

5. Так как угол увода переднего моста меньше угла увода заднего моста, то троллейбус обладает избыточной поворачиваемостью.

Ответ. $\psi_1 = 0,249 \text{ рад} \approx 14,3^\circ$; $\psi_2 = 0,269 \text{ рад} \approx 15,4^\circ$.

Троллейбус обладает избыточной поворачиваемостью.

Задача 3.2.84. Определить критическую скорость по условиям увода $v_{\text{кр.}\psi}$ троллейбуса со следующими параметрами: $L = 6,04 \text{ м}$; $m_1 = 5,1 \text{ т}$; $m_2 = 12 \text{ т}$; $k_{y1} = 136 \text{ кН/рад}$, $k_{y2} = 281 \text{ кН/рад}$. Какой поворачиваемостью обладает троллейбус?

Решение

1. Критическая скорость троллейбуса по условиям увода

$$v_{\text{кр.}\psi} = \sqrt{\frac{L}{\frac{m_2}{k_{y2}} - \frac{m_1}{k_{y1}}}} = \sqrt{\frac{6,04}{\frac{12 \cdot 10^3}{281 \cdot 10^3} - \frac{5,1 \cdot 10^3}{136 \cdot 10^3}}} = 34,066 \text{ м/с} = 122,638 \text{ км/ч},$$

где L – база троллейбуса;

m_1 и m_2 – соответственно массы, приходящиеся на передний и задний мост;

k_{y1} и k_{y2} – соответственно коэффициенты сопротивления уводу колес переднего и заднего мостов.

2. Примем средний угол поворота управляемых колес $\alpha = 5^\circ$ и скорость движения $v = 60$ км/ч. Тогда радиус поворота троллейбуса

$$R = \frac{L}{\alpha} \left[1 + \left(\frac{m_1}{k_{yM1}} - \frac{m_2}{k_{yM2}} \right) \frac{v^2}{3,6^2 L} \right] =$$

$$= \frac{6,04}{\frac{5\pi}{180}} \left[1 + \left(\frac{5,1 \cdot 10^3}{136 \cdot 10^3} - \frac{12 \cdot 10^3}{281 \cdot 10^3} \right) \frac{60^2}{3,6^2 \cdot 6,04} \right] = 52,646 \text{ м}.$$

3. Для определения вида поворачиваемости троллейбуса необходимо вычислить боковые реакции на колесах и углы увода его мостов.

Боковые реакции на колеса:

переднего моста

$$R_{y1} = \frac{m_1 v^2}{3,6 R^2} = \frac{5,1 \cdot 10^3 \cdot 60^2}{3,6^2 \cdot 52,646} = 2,691 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

заднего моста

$$R_{y2} = \frac{m_2 v^2}{3,6 R^2} = \frac{12 \cdot 10^3 \cdot 60^2}{3,6^2 \cdot 52,646} = 6,332 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

4. Углы увода мостов:

переднего

$$\psi_1 = \frac{R_{y1}}{k_{y1}} = \frac{2,691 \cdot 10^4}{136 \cdot 10^3} = 0,198 \text{ рад} = 11,345^\circ;$$

заднего

$$\psi_2 = \frac{R_{y2}}{k_{y2}} = \frac{6,332 \cdot 10^4}{281 \cdot 10^3} = 0,225 \text{ рад} = 12,892^\circ.$$

Так как угол увода переднего моста меньше угла увода заднего моста: $\psi_1 < \psi_2$, делаем заключение, что троллейбус обладает избыточной поворачиваемостью.

Ответ. $v_{кр.δ} = 34,066 \text{ м/с} (122,638 \text{ км/ч})$.

Троллейбус обладает избыточной поворачиваемостью.

Задача 3.2.85. По данным предыдущей задачи определить радиус поворота троллейбуса, база которого $L = 6,04 \text{ м}$, с учетом и без учета бокового увода колес при движении со скоростью $v = 60 \text{ км/ч}$ и средним углом поворота управляемых колес $\alpha = 6^\circ$.

Р е ш е н и е

1. Радиус поворота троллейбуса без учета явления увода колес

$$R_r = \frac{L}{\text{tg}\alpha} = \frac{6,04}{\text{tg}6^\circ} = 57,467 \text{ м},$$

2. Радиус поворота троллейбуса с учетом увода колес

$$R = \frac{L}{\alpha} \left[1 + \left(\frac{m_1}{k_{yM1}} - \frac{m_2}{k_{yM2}} \right) \frac{v^2}{3,6^2 L} \right] =$$

$$= \frac{6,04}{\frac{6\pi}{180}} \left[1 + \left(\frac{5,1 \cdot 10^3}{136 \cdot 10^3} - \frac{12 \cdot 10^3}{281 \cdot 10^3} \right) \frac{60^2}{3,6^2 \cdot 6,04} \right] = 43,872 \text{ м},$$

где m_1 и m_2 – соответственно массы, приходящиеся на передний и задний мост;

v – скорость движения, км/ч;

$k_{ум1}$ и $k_{ум2}$ – соответственно коэффициенты сопротивления уводу колес переднего и заднего мостов.

Ответ. $R_r = 57,467$ м; $R = 43,872$ м.

Задача 3.2.86. Управляемые колеса троллейбуса, база которого $L = 6,04$ м, повернуты на средний угол $\alpha = 10^\circ 30'$. Троллейбус движется по траектории радиусом $R = 34,5$ м. Найти величину угла увода задних колес и вид поворачиваемости троллейбуса, если угол увода передних колес $\psi_1 = 5^\circ$.

Р е ш е н и е

1. Радиус поворота троллейбуса определяется по формуле

$$R = \frac{L}{\operatorname{tg}(\alpha - \psi_1) + \operatorname{tg}\psi_2}.$$

2. Угол увода колес заднего моста

$$\begin{aligned} \psi_2 &= \operatorname{arctg} \left[\frac{L - R \operatorname{tg}(\alpha - \psi_1)}{R} \right] = \operatorname{arctg} \left[\frac{6,04 - 34,5 \operatorname{tg}(10^\circ 30' - 5^\circ)}{34,5} \right] = \\ &= 0,079 \text{ рад} = 4,526^\circ. \end{aligned}$$

Так как угол увода передних колес больше угла увода задних ($\psi_1 = 5^\circ > \psi_2 = 4,526^\circ$), то троллейбус обладает недостаточной поворачиваемостью.

Ответ. Угол увода колес заднего моста $\psi_2 = 4,526^\circ$.

Троллейбус обладает недостаточной поворачиваемостью, так как угол увода передних колес больше угла увода задних ($\psi_1 = 5^\circ > \psi_2 = 4,526^\circ$).

Задача 3.2.87. Определить критическую скорость троллейбуса по условиям бокового увода колес, если его масса $m = 13,8$ т, база $L = 6,04$ м, коэффициент нагрузки на задние ведущие колеса $\lambda = 0,65$;

коэффициент сопротивления уводу передних колес $k_{y1} = 192$ кН/рад, задних $k_{y2} = 236$ кН/рад.

Решение

1. Вес троллейбуса

$$G = mg = 13,8 \cdot 9,81 = 1,354 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

2. Вес, приходящийся на задний мост

$$G_2 = \lambda G = 0,65 \cdot 1,354 \cdot 10^5 = 8,801 \cdot 10^4 \text{ Н;}$$

передний мост

$$G_1 = G - G_2 = 1,354 \cdot 10^5 - 8,801 \cdot 10^4 = 4,739 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

3. Критическая скорость движения троллейбуса по боковому уводу

$$v_{\psi} = \sqrt{\frac{gL}{\frac{G_2}{k_{y2}} - \frac{G_1}{k_{y1}}}} = \sqrt{\frac{9,81 \cdot 6,04}{\frac{8,801 \cdot 10^4}{236 \cdot 10^3} - \frac{4,739 \cdot 10^4}{192 \cdot 10^3}}} = 21,677 \text{ м/с} = 78,037 \text{ км/ч.}$$

Ответ. Критическая скорость движения троллейбуса по боковому уводу равна 21,677 м/с или 78,04 км/ч.

Задача 3.2.88. На какой средний угол необходимо повернуть управляемые колеса троллейбуса при его движении со скоростью $v = 54$ км/ч по дороге, имеющей радиус кривизны 100 м? Данные троллейбуса: масса $m = 16,4$ т; база $L = 6,04$ м; расстояние от центра масс до оси задних колес $b = 2$ м; коэффициент сопротивления уводу задних колес $k_{y2} = 236$ кН/рад, передних – $k_{y1} = 192$ кН/рад.

Решение

1. Задачу решаем по первому приближению. Полное решение подобной задачи приведено в лабораторной работе № 5 [5].

Расстояние от центра масс до оси передних колес троллейбуса

$$b = L - a = 6,04 - 2 = 4,04 \text{ м.}$$

2. При известном радиусе траектории движения троллейбуса для первого шага средний угол поворота управляемых колес α определим по формуле для расчета теоретического радиуса поворота R_r :

$$R_r = \frac{L}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Отсюда средний угол поворота управляемых колес

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{L}{R} = \operatorname{arctg} \frac{6,04}{100} = 0,06 \text{ рад} = 3,438^\circ.$$

3. Находим массы, приходящиеся на передний мост:

$$m_1 = \frac{b}{L} m = \frac{2}{6,04} 16,4 \cdot 10^3 = 5,43 \cdot 10^3 \text{ кг};$$

задний мост:

$$m_2 = \frac{a}{L} m = \frac{4,04}{6,04} 16,4 \cdot 10^3 = 1,097 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

4. Боковые силы, равные силам инерции, действующие на передний и задний мосты, при движении по траектории с заданным радиусом: на передний мост:

$$F_{j1} = \frac{m_1 v^2}{R_1},$$

где R_1 – расстояние от мгновенного центра поворота до середины переднего моста;

для первого шага

$$R_1 = \sqrt{L^2 + R_r^2} = \sqrt{6,04^2 + 100^2} = 100,182 \text{ м.}$$

$$F_{\delta 1} = F_{j1} = \frac{16,4 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{54}{3,5}\right)^2}{100,182} = 3,897 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

задний мост:

$$F_{\delta 2} = F_{j2} = \frac{m_2 v^2}{R_r} = \frac{16,4 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{54}{3,5}\right)^2}{100} = 3,904 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

5. Углы увода колес:
переднего моста

$$\psi_1 = \frac{F_{\delta 1}}{k_{y1}} = \frac{3,897 \cdot 10^4}{192 \cdot 10^3} = 0,203 \text{ рад} = 11,631^\circ;$$

заднего моста

$$\psi_2 = \frac{F_{\delta 2}}{k_{y2}} = \frac{3,904 \cdot 10^4}{236 \cdot 10^3} = 0,165 \text{ рад} = 9,454^\circ.$$

6. Угол поворота управляемых колес определим, используя формулу для расчета действительного радиуса поворота относительно угла поворота управляемых колес:

$$R = \frac{L}{\operatorname{tg}(\alpha - \psi_1) + \operatorname{tg}\psi_2}.$$

Отсюда

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{L}{R} - \operatorname{tg}\psi_2\right) + \psi_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{6,04}{100} - \operatorname{tg}0,165\right) + 0,203 = 0,097 = 5,558^\circ.$$

Ответ. При движении троллейбуса по траектории радиусом $R = 100$ м со скоростью $v = 54$ км/ч управляемые колеса требуется повернуть на угол $\alpha = 5,558^\circ$.

Задача 3.2.89. Определить допустимую скорость движения трамвая по стрелочному переводу, исходя из условий не превышения допустимого ударно-динамического воздействия гребней колес на остяк стрелочного перевода при наезде на него колес, допустимого непогашенного центростремительного ускорения вагона при движении по стрелочному переводу и скорости нарастания этого ускорения при входе вагона в переводную кривую. Данные стрелочного перевода: угол $\beta_n = 35^\circ$; $R = 100$ м; $2e = 45$ мм. База вагона по точкам опоры кузова $L = 7,5$ м.

Р е ш е н и е

1. Скорость, исходя из условий: не превышения допустимого ударно-динамического воздействия гребней колес на остяк стрелочного перевода при наезде на него колес

$$v_y = \sqrt{\frac{0,045 \cdot 0,061}{\sin^2 \beta_n + \frac{4e}{R}}} \leq 40 \text{ км/ч} = 11,11 \text{ м/с.}$$

Подставив данные стрелочного перевода, для средних значений получим

$$v_y = \sqrt{\frac{0,053}{\sin^2 35^\circ + \frac{2 \cdot 45 \cdot 10^{-3}}{100}}} = 0,401 \text{ м/с.}$$

2. Допустимая скорость трамвая по критерию непогашенного ускорения в случае движения по переводной кривой (возвышение наружного рельса отсутствует: $h_p = 0$)

$$v_{ny} = 3\sqrt{R} = 3\sqrt{100} = 30 \text{ км/ч.}$$

3. Норма скорости нарастания непогашенного центростремительного ускорения при входе вагона в кривую

$$v_g = 0,9\sqrt[3]{RL} = 0,9\sqrt[3]{100 \cdot 7,5} = 8,177 \text{ м/с} = 29,437 \text{ км/ч.}$$

Ответ. Скорость движения по заданному стрелочному переводу должна быть не более 29,4 км/ч.

Задача 3.2.90. Определить предельную скорость троллейбуса на повороте, выше которой движение будет неустойчивым. Радиус поворота $R = 40$ м; дорога не имеет поперечного уклона и характеризуется коэффициентом сцепления $\varphi = 0,7$. Ускорение при поступательном движении троллейбуса $a_y = 0,8 \text{ м/с}^2$; угловая скорость поворота управляемых колес $\omega_k = 0,4 \text{ с}^{-1}$. Колея троллейбуса $B = 1,8$ м; высота центра масс $h_c = 1,5$ м; расстояние от центра масс до оси передних колес $a = 4,04$ м.

Р е ш е н и е

1. Определим, что лимитирует движение в данных условиях скольжение или опрокидывание троллейбуса:

$$\frac{B}{2h_c} = \frac{1,8}{2 \cdot 1,5} = 0,6 < \varphi.$$

Так как критерий меньше коэффициента сцепления – опрокидывание наступит раньше скольжения.

2. Предельную скорость движения троллейбуса при повороте управляемых колес с некоторой угловой скоростью рассчитываем, решая уравнение

$$v^2 + k_1 v - k_2 = 0,$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты уравнения.

$$k_1 = \frac{b}{L} \cdot \frac{L^2 + R^2}{R} \omega_k = \frac{2}{6,04} \cdot \frac{6,04^2 + 40^2}{40} \cdot 0,4 = 5,419;$$

$$k_2 = gR \frac{B}{2h_c} - \frac{b}{L} La_y = 9,81 \cdot 40 \frac{1,8}{2 \cdot 1,5} - \frac{2,0}{6,04} \cdot 6,04 \cdot 0,8 = 233,84.$$

Подставив значение коэффициентов в исходное уравнение, получим

$$v^2 + 5,419v - 233,84 = 0.$$

Решая полученное уравнение, определим предельную скорость движения троллейбуса при повороте управляемых колес с угловой скоростью $0,4 \text{ с}^{-1}$:

$$v = \frac{-5,419 \pm \sqrt{5,419^2 + 4 \cdot 5,419 \cdot 233,84}}{2 \cdot 5,419} = 6,089 \text{ м/с} = 22,0 \text{ км/ч}.$$

Ответ. Бокового опрокидывания троллейбуса не произойдет, если он будет двигаться по траектории радиуса $R = 40 \text{ м}$ со скоростью, не превышающей $v = 22 \text{ км/ч}$, с ускорением $0,8 \text{ м/с}^2$ и при повороте управляемых колес с угловой скоростью $0,4 \text{ с}^{-1}$.

Задача 3.2.91. Троллейбус равномерно движется по криволинейному участку дороги без поперечного уклона радиусом $R = 40 \text{ м}$. Найти предельное значение скорости, до которой троллейбус может двигаться без опасности бокового опрокидывания. При решении задачи принять, что по условию бокового скольжения устойчивость троллейбуса обеспечивается. Технические данные троллейбуса: высота центра масс $h_c = 1,5 \text{ м}$; ширина колеи $B = 1,8 \text{ м}$.

Ответ. Предельное значение скорости, до которой троллейбус может двигаться без опасности бокового опрокидывания, $v_{\text{пред}} = 55,24 \text{ км/ч}$.

Задача 3.2.92. Радиус поворота, измеренный по следу наружного переднего управляемого колеса, равен 10,6 м. Считая, что шины троллейбуса не имеют увода, найти углы поворота внутреннего и наружного управляемых колес, а также их средний угол поворота. При решении задачи принять базу троллейбуса $L = 6,04$ м; ширину колеи $B = 1,8$ м; шкворневую базу $B_{ш} = 1,8$ м.

Ответ. Наружное управляемое колесо повернуто на $\alpha_n = 0,518$ рад = $29,679^\circ$; внутренние – на $\alpha_b = 0,718$ рад = $41,138^\circ$.
Средний угол поворота управляемых колес $\alpha = 0,658$ рад = $37,701^\circ$.

Задача 3.2.93. Найти габаритную полосу движения троллейбуса, база которого $L = 6,04$ м. Углы поворота передних управляемых колес: наружного $\alpha_n = 34,7^\circ$, внутреннего $\alpha_b = 42^\circ$. Расстояния от наиболее удаленной и наиболее близкой к центру поворота точек кузова троллейбуса до следов переднего наружного и заднего внутреннего колес соответственно: $l_n = 0,5$ м и $l_b = 0,35$ м. Колею передних колес принять равной колее задних колес.

Ответ. Габаритная полоса движения троллейбуса равна $\Delta_{габ} = 4,642$ м.

Задача 3.2.94. Троллейбус, база которого $L = 6,04$ м, движется по дуге окружности, радиус которой $R = 25$ м. На какой угол необходимо повернуть рулевое колесо, если передаточное число рулевого механизма $u_{рм} = 20,5$? Колеса принять жесткими в боковом направлении.

Ответ. Рулевое колесо необходимо повернуть на угол $\alpha_{рк} = 278,37^\circ$.

Задача 3.2.95. Определить минимальный радиус поворота и габаритный радиус троллейбуса, база которого = 6,04 м; максимальный угол поворота наружного управляемого колеса $\alpha_{nmax} = 35^\circ$; колея передних и задних колес $B = 2$ м; расстояние от наиболее удаленной от центра поворота точки троллейбуса до следа переднего наружного колеса $l_n = 0,5$ м. Явлением увода шин пренебречь.

Ответ. Минимальный радиус поворота $R_{min} = 7,626$ м, габаритный радиус $R_r = 11,03$ м.

Задача 3.2.96. Определить, как изменится величина радиуса поворота троллейбуса при наличии бокового увода шин по сравнению с жесткими шинами. Технические данные троллейбуса: база $L = 6,04$ м; средний угол поворота управляемых колес $\alpha_{\text{ср}} = 20^\circ$; угол увода передних колес $\psi_1 = 5,3^\circ$, задних колес $\psi_2 = 3,667^\circ$.

Ответ. Теоретический радиус поворота троллейбуса $R_{\text{т}} = 16,595$ м; действительный радиус поворота $R = 18,50$ м.

Задача 3.2.97. Троллейбус движется с уводом по криволинейной траектории, радиус которой $R = 20$ м, со средним углом поворота управляемых колес $\alpha_{\text{ср}} = 16,8^\circ$. Найти величину увода задних колес, если угол увода передних $\psi_1 = 6,667^\circ$, база троллейбуса $L = 6,04$ м.

Ответ. Угол увода задних колес $\psi_2 = 7,047^\circ$.

Задача 3.2.98. Троллейбус движется со скоростью 54 км/ч по траектории радиусом $R = 100$ м. Масса троллейбуса $m = 17,5$ т; база $L = 6,04$ м; расстояние от центра масс до оси задних колес $b = 2$ м; коэффициент сопротивления уводу колес переднего моста $k_{y1} = 220$ кН/рад, колес заднего моста $k_{y2} = 424$ кН/рад. Определить средний угол поворота управляемых колес и угловую скорость поворота троллейбуса.

Ответ. Угол поворота управляемых колес $\alpha_{\text{ср}} = 0,032$ рад = $1,873^\circ$.
Угловая скорость поворота троллейбуса $\omega = 0,15$ с⁻¹.

Задача 3.2.99. Троллейбус движется с постоянной скоростью $v = 54$ км/ч по криволинейной траектории радиусом $R = 100$ м. Определить силу тяги ведущих колес: а) без учета увода колес; б) с учетом увода колес заднего моста, равного $\psi_2 = 0,008$ рад. На сколько процентов отличается величина силы тяги в первом и втором случае?

Технические данные троллейбуса: масса $m = 17,5$ т; фактор обтекаемости $k_{\text{в}}A_{\text{лоб}} = 2,8$ Н·с²/м²; база $L = 6,04$ м; расстояние от центра масс до оси задних колес $b = 2$ м; коэффициент сопротивления дороги $f = 0,02$.

Ответ. Сила тяги ведущих колес: а) без учета увода колес $F_{\text{к2}} = 3,3$ кН; б) с учетом увода колес заднего моста $F_{\text{к2}} = 3,6$ кН. Силы тяги в первом и втором случае отличаются на 9,1 %.

Задача 3.2.100. Определить радиус поворота и угловую скорость поворота троллейбуса, движущегося со скоростью 36 км/ч по траектории постоянного радиуса. Технические данные троллейбуса: масса $m = 18,3$ т; база $L = 6,04$ м; расстояние от центра масс до оси задних колес $b = 2$ м; коэффициенты сопротивления уводу колес мостов: переднего $k_{y1} = 194$ кН/рад, заднего $k_{y2} = 272$ кН/рад; средний угол поворота управляемых колес $\alpha_{cp} = 8,5^\circ$.

Ответ. Радиус поворота и угловая скорость поворота троллейбуса, движущегося со скоростью 36 км/ч, соответственно равны $R = 58,736$ м; $\omega = 0,305$ с⁻¹.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое управляемость троллейбуса и какие критерии ее оценки вы знаете?
2. Что такое боковой увод колеса? По каким причинам он может возникнуть?
3. Что понимается под коэффициентом сопротивления боковому уводу колеса, его физический смысл и как его можно определить аналитически?
4. Что понимается под теоретическим и действительным радиусом поворота троллейбуса и как они определяются аналитически?
5. Что понимается под статической поворачиваемостью троллейбуса и от чего зависит вид поворачиваемости?
6. Как влияет вид статической поворачиваемости на траекторию и устойчивость движения троллейбуса?
7. Как определить критическую скорость троллейбуса по условиям увода колес и для какого вида статической поворачиваемости она характерна?
8. Что такое стабилизация управляемых колес, как она достигается и от каких факторов зависит? Что такое плечо обкатки?
9. От чего зависит усилие на рулевом колесе при повороте управляемых колес на месте?
10. По каким причинам могут возникнуть колебания управляемых колес троллейбуса и как они влияют на его управляемость?
11. Перечислите геометрические показатели подвижного состава.
12. Что понимается под складыванием сочлененной машины?

13. Чему равна критическая скорость троллейбуса с нейтральной поворачиваемостью, с недостаточной поворачиваемостью?

14. Как влияет подвеска на управляемость троллейбуса?

15. Каковы условия осуществления поворота заднеприводного троллейбуса с передними управляемыми колесами? Какая формула выражает условие отсутствия бокового скольжения управляемых колес?

3.2.6. Маневренность и проходимость подвижного состава

Задача 3.2.101. Определить, сможет ли заднеприводной троллейбус при коэффициенте сцепления колес $\varphi_x = 0,75$ преодолеть без разгона пороговое препятствие высотой $h_{\text{преп}} = 0,09$ м, расположенное перед передними колесами. Параметры троллейбуса : $m = 18355$ кг; $L = 6,04$ м; $a = 4,2$ м; $r_c = 0,545$ м.

Решение

1. Нагрузки на мосты:
передний

$$R_{z1} = G_1 = \frac{b}{L} G = \frac{L-a}{L} G = \frac{6,04-4,2}{6,04} 18355 \cdot 9,81 = 5,485 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

задний

$$R_{z2} = G_2 = \frac{a}{L} G = \frac{4,2}{6,04} 18355 \cdot 9,81 = 1,252 \cdot 10^5 \text{ Н}.$$

2. Толкающая сила на передних колесах

$$F_{x1} = \frac{R_{z1}}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{R_{z1} \sqrt{2r_c h_{\text{преп}} - h_{\text{преп}}^2}}{r_c - h_{\text{преп}}} = \frac{5,485 \cdot 10^3 \sqrt{2 \cdot 0,545 \cdot 0,09 - 0,09^2}}{0,545 - 0,09} = 3,355 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

3. Максимальная сила тяги задних ведущих колес

$$F_{k2\max} = \varphi G_2 = 0,75 \cdot 1,252 \cdot 10^5 = 9,39 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

Так как $F_{к2max} = 93,9 \text{ кН} > F_{x1} = 33,55 \text{ кН}$ – троллейбус сможет преодолеть данное препятствие.

Ответ. Сможет, т. к. $F_{к2max} > F_{x1}$.

Задача 3.2.102. По данным предыдущей задачи определить, сможет ли троллейбус преодолеть то же препятствие, расположенное перед задними колесами.

Р е ш е н и е

1. Коэффициент сцепления $\varphi = 0,75$ соответствует сухой асфальтобетонной дороге в хорошем состоянии. Коэффициент сопротивления качению для нее находится в пределах $0,007–0,015$. Принимаем среднее значение:

$$f = \frac{0,007 + 0,015}{2} = 0,011.$$

2. Находим силу сопротивления движению. Так как препятствие преодолевается на малой скорости, можно принять, что сила сопротивления движению обусловлена только сопротивлением качению:

$$F_x = F_f = fmg = 0,011 \cdot 18355 \cdot 9,81 = 1,981 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

3. Нормальная реакция на ведущих задних колесах

$$R_{z2} = G_2 = \frac{a}{L} G = \frac{4,2}{6,04} \cdot 18355 \cdot 9,81 = 1,252 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

4. Ведущие колеса могут преодолеть препятствие, если

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{\varphi_x F_x + R_{z2}}{\varphi_x R_{z2} - F_x}.$$

Тангенс угла α препятствия определим по приближенной формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r_c - H_{\text{пр}}}{\sqrt{2r_c H_{\text{пр}} - H_{\text{пр}}^2}} = \frac{0,545 - 0,09}{\sqrt{2 \cdot 0,545 \cdot 0,09 - 0,09^2}} = 1,517.$$

5. Определим значение правой части неравенства:

$$\frac{\varphi_x F_x + R_{z2}}{\varphi_x R_{z2} - F_x} = \frac{0,75 \cdot 1,981 \cdot 10^3 + 1,312 \cdot 10^5}{0,75 \cdot 1,312 \cdot 10^5 - 1,981 \cdot 10^3} = 1,376.$$

6. Троллейбус не сможет преодолеть данное препятствие перед задними колесами, так как

$$\operatorname{tg} \alpha > \frac{F_x \varphi_x + F_z}{F_z \varphi_x - F_x}; \quad 1,517 \text{ рад} > 1,375.$$

Ответ. Не сможет преодолеть препятствие перед задними

колесами, т. к. $\operatorname{tg} \alpha > \frac{F_x \varphi_x + F_z}{F_z \varphi_x - F_x}$.

Задача 3.2.103. При движении троллейбуса по мокрой асфальтовой дороге одно из колес ведущего моста буксует. Коэффициент сцепления буксующего колеса $\varphi = 0,3$. Определить суммарный момент на обоих ведущих колесах, если момент трения в дифференциале $M_{\text{тр}} = 130 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Параметры троллейбуса: $m = 18,2 \text{ т}$; $L = 6,04 \text{ м}$; $a = 3,95 \text{ м}$; $r_{к0} = 0,545 \text{ м}$.

Р е ш е н и е

1. Считая, что троллейбус заднеприводной, находим: вес, приходящийся на задний мост:

$$G_2 = \frac{a}{L} mg = \frac{3,95}{6,04} 18,2 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 1,168 \cdot 10^5 \text{ Н};$$

момент на буксующем колесе

$$M_6 = F_{\text{кф}} r_{к0} = \varphi \frac{G_2}{2} r_{к0} = 0,3 \frac{1,168 \cdot 10^5}{2} 0,545 = 1,13 \cdot 10^4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

2. Момент, подведенный к корпусу дифференциала $M_{\text{корп}}$, определим из выражения для расчета момента M_6 , подводимого к забегающему (буксующему) колесу:

$$M_6 = \frac{M_{\text{корп}} - M_{\text{тр}}}{2},$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент трения в блокирующемся дифференциале.

Откуда

$$M_{\text{корп}} = 2M_6 + M_{\text{тр}} = 2 \cdot 1,13 \cdot 10^4 + 130 = 2,273 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Момент на отстающем колесе

$$M_{\text{отс}} = \frac{M_{\text{корп}} + M_{\text{тр}}}{2} = \frac{2,273 \cdot 10^4 + 130}{2} = 1,143 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Суммарный момент на обоих ведущих колесах моста

$$M_{\Sigma \text{м}} = M_6 + M_{\text{отс}} = 1,13 \cdot 10^4 + 1,143 \cdot 10^4 = 2,273 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Ответ. Суммарный момент на обоих ведущих колесах равен 22,73 кН·м.

Задача 3.2.104. Используя данные предыдущей задачи, определить, сможет ли осуществлять движение троллейбус по горизонтальному участку дороги, если коэффициент сопротивления качению $f = 0,1$. Какой максимальный уклон может преодолеть троллейбус, если высота расположения его центра масс над уровнем дороги составляет $h_c = 1,5$ м? Сопротивлением воздуха пренебречь.

Р е ш е н и е

1. Считая, что троллейбус заднеприводной, находим: вес, приходящийся на задний мост:

$$G_2 = \frac{a}{L} mg = \frac{3,95}{6,04} \cdot 18,2 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 1,168 \cdot 10^5 \text{ Н};$$

момент на буксующем колесе

$$M_6 = F_{\text{кр}} r_{\text{к0}} = \varphi \frac{G_2}{2} r_{\text{к0}} = 0,3 \cdot \frac{1,168 \cdot 10^5}{2} \cdot 0,545 = 0,95484 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Момент, подведенный к корпусу дифференциала $M_{\text{корп}}$, определим из выражения для расчета момента M_6 , подводимого к забегавшему (буксующему) колесу:

$$M_6 = \frac{M_{\text{корп}} - M_{\text{тр}}}{2},$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент трения в блокирующемся дифференциале.

Отсюда

$$M_{\text{корп}} = 2M_6 + M_{\text{тр}} = 2 \cdot 0,95484 \cdot 10^4 + 130 = 130,191 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Момент на отстающем колесе

$$M_{\text{отс}} = \frac{M_{\text{корп}} + M_{\text{тр}}}{2} = \frac{130,191 \cdot 10^4 + 130}{2} = 130,095 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Суммарный момент на обоих ведущих колесах моста составит

$$M_{\Sigma\text{м}} = M_6 + M_{\text{отс}} = 0,95484 \cdot 10^4 + 130,095 \cdot 10^4 = 130,191 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5. Сила тяги, развиваемая ведущими колесами троллейбуса:

$$F_{\text{к}} = \frac{M_{\Sigma\text{м}}}{r_{\text{к0}}} = \frac{130,191 \cdot 10^4}{0,545} = 238,88 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

6. Сила сопротивления качению

$$F_f = fmg = 0,1 \cdot 18,2 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 1,785 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

Так как $F_{\text{к}} > F_f$ троллейбус может двигаться.

7. Максимальный преодолеваемый уклон

$$i_{\max} = \frac{\varphi_x a}{L - \varphi_x h_c} = \frac{0,3 \cdot 3,95}{6,04 - 0,3 \cdot 1,5} = 0,212 \text{ рад} = 12,147^\circ.$$

Ответ. В заданных условиях троллейбус может двигаться, так как $F_k > F_f$.
Максимальный преодолеваемый уклон $i_{\max} = 0,212$ ($\alpha_{\max} = 12,147^\circ$).

Задача 3.2.105. Найти продольный радиус проходимости, если база троллейбуса $L = 6,04$ м; расстояние от низшей точки, расположенной посередине базы, до поверхности дороги $h_{\text{кл}} = 0,3$ м; размер шин $11,5\text{-}22''$.

Р е ш е н и е

1. Радиус колеса

$$r_{\text{к0}} = 0,5 D_{\text{об}} + B_{\text{ш}} = 0,0254(0,5 \cdot 22 + 11,5) = 0,571 \text{ м},$$

где $D_{\text{об}}$ – диаметр обода;

$B_{\text{ш}}$ – ширина шины;

" – размеры в дюймах.

2. Радиус продольной проходимости (определяется как радиус окружности, проходящий через три точки)

$$R_{\text{пр.п}} = 0,5E + \sqrt{0,25E^2},$$

$$\text{где } E = \frac{0,25L^2 + h_{\text{кл}}^2 - 2r_{\text{к0}}h_{\text{кл}}}{2h_{\text{кл}}} = \frac{0,25 \cdot 6,04^2 + 0,3^2 - 2 \cdot 0,571 \cdot 0,3}{2 \cdot 0,3} = 14,78.$$

Тогда

$$R_{\text{пр.п}} = 0,5 \cdot 14,78 + \sqrt{0,25 \cdot 14,78^2} = 14,78 \text{ м}.$$

Ответ. Радиус продольной проходимости троллейбуса равен $14,78$ м.

Задача 3.2.106. Клиренс под задним ведущим мостом троллейбуса составляет $h_{\text{кл}} = 0,25$ м; колея ведущего моста со сдвоенными шинами колес $B_2 = 1,85$ м; размер шин 300–508. Определить радиус поперечной проходимости.

Р е ш е н и е

1. Расстояние между шинами в сдвоенных задних колесах

$$B_{\text{мш}} = B_2 - 2B_{\text{ш}} = 1,85 - 2 \cdot 0,3 = 1,25 \text{ м.}$$

2. Радиус поперечной проходимости

$$R_{\text{п.п}} = \frac{B_{\text{мш}}^2 + 4h_{\text{кл}}^2}{8h_{\text{кл}}} = \frac{1,25^2 + 4 \cdot 0,25^2}{8 \cdot 0,25} = 0,906 \text{ м.}$$

Ответ. Радиус поперечной проходимости троллейбуса $R_{\text{п.п}} = 0,906$ м.

Задача 3.2.107. Габаритная длина троллейбуса $L_r = 11,54$ м; база $L = 6,04$ м; задний свес составляет $l_2 = 51,4$ % базы; наименьшие расстояния наиболее выступающих точек в передней и задней частях троллейбуса от поверхности дороги соответственно $h_1 = 0,55$ м и $h_2 = 0,48$ м. Рассчитать углы переднего и заднего свеса.

Р е ш е н и е

1. Величина заднего свеса

$$l_{2\text{св}} = l_2 L = \frac{51,4}{100} 6,04 = 3,105 \text{ м.}$$

2. Величина переднего свеса

$$l_{1\text{св}} = L_r - (L + l_{2\text{св}}) = 11,54 - (6,04 + 3,105) = 2,395 \text{ м.}$$

3. Угол переднего свеса

$$\gamma_1 = \arctg \frac{h_1}{l_{1\text{св}}} = \arctg \frac{0,55}{2,395} = 0,226 \text{ рад} = 12,949^\circ.$$

4. Угол заднего свеса

$$\gamma_2 = \operatorname{arctg} \frac{h_2}{l_{2\text{св}}} = \operatorname{arctg} \frac{0,48}{3,105} = 0,153 \text{ рад} = 8,766^\circ.$$

Ответ. Угол переднего свеса $\gamma_1 = 0,225 \text{ рад} = 12,949^\circ$;
угол заднего свеса $\gamma_2 = 0,153 \text{ рад} = 8,766^\circ$.

Задача 3.2.108. Троллейбус имеет базу $L = 6,04 \text{ м}$; расстояние от центра масс до оси задних колес $b = 2 \text{ м}$; высота центра масс $h_c = 1,5 \text{ м}$. Определить максимальный угол подъема, который может преодолеть троллейбус по сцеплению ведущих колес с дорогой, если коэффициент сцепления $\varphi = 0,5$.

Решение

1. Наибольший угол подъема по условиям сцепления задних ведущих колес с дорогой

$$\alpha_{\text{д}} = \operatorname{arctg} \frac{\varphi b}{L - \varphi h_c} = \operatorname{arctg} \frac{0,5 \cdot 2}{6,04 - 0,5 \cdot 1,5} = 0,187 \text{ рад} = 10,714^\circ.$$

Ответ. Наибольший угол подъема по условиям сцепления задних ведущих колес с дорогой $\alpha_{\text{д}} = 0,187 \text{ рад} = 10,714^\circ$.

Задача 3.2.109. Как надо изменить расстояние b от центра масс до оси задних колес троллейбуса с приводом на передние колеса, чтобы он преодолевал такой же максимальный подъем ($\alpha_{\text{д}} = 10,714^\circ$), как и троллейбус с задними ведущими колесами. Данные троллейбуса: база $L = 6,04 \text{ м}$; высота центра масс $h_c = 1,5 \text{ м}$; коэффициент сцепления $\varphi = 0,5$; коэффициент сопротивления качению $f = 0,02$; расчетный радиус ведущих колес $r_{\text{к0}} = 0,544 \text{ м}$.

Решение

Наибольший угол подъема, преодолеваемый троллейбусом по условиям сцепления передних ведущих колес с дорогой

$$\alpha_{\text{д}} = \operatorname{arctg} \frac{\varphi(b - fr_{\text{к0}}) - fL}{L + \varphi h_c}.$$

Откуда искомое расстояние

$$b = \frac{1}{\varphi} [(L + \varphi h_c) \operatorname{tg} \alpha_d + f(\varphi r_{к0} + L)] = \\ = \frac{1}{0,5} [(6,04 + 0,5 \cdot 1,5) \operatorname{tg} 10,714^\circ + 0,02(0,5 \cdot 0,544 + 6,04)] = 2,822 \text{ м.}$$

Ответ. Для преодоления угла подъема в $10,714^\circ$ расстояние от центра масс до оси задних колес переднеприводного троллейбуса должно быть $= 2,822$ м, вместо 2 м.

Задача 3.2.110. Полная масса троллейбуса $m = 18,3$ т; база $L = 6,04$ м; расстояние от центра масс до оси задних колес $b = 2$ м. На троллейбусе установлены шины 300-508 с рабочим давлением $p_v = 0,6$ Па. Определить давление на дорогу передних и задних колес.

Решение

1. Определим вес, приходящийся на передний мост:

$$G_1 = \frac{b}{L} mg = \frac{2}{6,04} 18,3 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 5,944 \cdot 10^4 \text{ Н;}$$

задний мост:

$$G_2 = \frac{L-b}{L} mg = \frac{6,04-2}{6,04} 18,3 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 1,201 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

2. Находим нормальную нагрузку на переднее колесо:

$$G_{к1} = \frac{G_1}{2} = \frac{5,944 \cdot 10^4}{2} = 2,972 \cdot 10^4 \text{ Н;}$$

заднее колесо:

$$G_{к2} = \frac{G_2}{4} = \frac{1,201 \cdot 10^5}{4} = 3,002 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

3. Используя обозначение шины, находим радиусы свободный r_c и сечения $r_{сеч}$, считая шины тором ($B_{ш} = H_{ш}$):

$$r_c = 0,5 D_c = 0,5(D_{об} + 2H_{ш}) = 0,5(508 + 2 \cdot 300) = 554 \text{ мм} = 0,554 \text{ м};$$

$$r_{сеч} = B_{ш} = 300 \text{ мм} = 0,3 \text{ м}.$$

4. По формуле Хейдекеля определим деформации шин:

$$h_{ш} = \frac{G_k}{2\pi p_B \sqrt{r_c r_{сеч}}}:$$

передних колес

$$h_{ш1} = \frac{2,972 \cdot 10^4}{2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^6 \sqrt{0,554 \cdot 0,3}} = 0,019 \text{ м};$$

задних колес

$$h_{ш2} = \frac{3,002 \cdot 10^4}{2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^6 \sqrt{0,554 \cdot 0,3}} = 0,02 \text{ м}.$$

5. Расчеты показали, что деформации передних и задних шин практически одинаковы, т. е. одинаковы площади контактов передних и задних колес. Для определения площадей контакта шин с дорогой, рассчитываем:

длину пятна контакта

$$l_k = 1,5 \sqrt{(D_c - h_{ш})h_{ш}} = 1,5 \sqrt{(2 \cdot 0,554 - 0,02)0,02} = 0,222 \text{ м};$$

ширину пятна контакта

$$b_k = 2 \sqrt{(B_{ш} - h_{ш})h_{ш}} = 2 \sqrt{(0,3 - 0,02)0,02} = 0,15 \text{ м}.$$

6. Находим площадь пятна контакта, принимая, что она имеет форму эллипса:

$$A_{\text{конг}} = \frac{1}{4} \pi l_k b_k = \frac{1}{4} \pi \cdot 0,222 \cdot 0,15 = 0,026 \text{ м}^2.$$

7. Давление на дорогу:
передних колес

$$q_1 = \frac{G_{к1}}{A_{конт}} = \frac{2,972 \cdot 10^4}{0,026} = 1,143 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1,143 \text{ МПа};$$

задних колес

$$q_2 = \frac{G_{к2}}{A_{конт}} = \frac{3,002 \cdot 10^4}{0,026} = 1,155 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1,155 \text{ МПа}.$$

Ответ. Давление на дорогу передних колес составляет $q_1 = 1,143 \text{ МПа}$; задних колес $q_2 = 1,155 \text{ МПа}$.

Задача 3.2.111. Определить максимальную длину переднего свеса h_1 троллейбуса и максимальный угол поворота его внутреннего колеса $\alpha_{в.маx}$, обеспечивающих нормативный габаритный радиус $R_{габ} = 12,5 \text{ м}$. Данные троллейбуса: база $L = 5,9 \text{ м}$; ширина кузова $B_k = 2,5 \text{ м}$; колея передних колес $B_1 = 2,096 \text{ м}$.

Ответ. Максимальная длина переднего свеса $h_1 = 2,869 \text{ м}$.
Максимальный угол поворота внутреннего колеса $\alpha_{в.маx} = 41,75^\circ$,

Задача 3.2.112. Во время ямочного ремонта дороги была сделана яма шириной 200 мм . Определить, сможет ли преодолеть троллейбус массой $m = 18,2 \text{ т}$ эту яму, если на нем установлены шины 300-508, давление воздуха в которых $p_в = 0,62 \text{ МПа}$. База троллейбуса $L = 5,9 \text{ м}$; расстояние от центра масс до оси задних колес $b = 3 \text{ м}$.

Ответ. Условие преодоление ямы – ширина ямы меньше длины пятна контакта шины ($200 \text{ мм} < 252 \text{ мм}$), т. е. троллейбус с полной загрузкой сможет преодолеть яму шириной 200 мм .

Задача 3.2.113. По условиям предыдущей задачи определить, сможет ли преодолеть яму шириной 200 мм троллейбус в снаряженном

состоянии $m = 11,5$ т. Расстояние от центра масс до оси задних колес $b = 1,5$ м.

Ответ. Условие преодоление ямы – ширина ямы меньше длины пятна контакта шины ($200 \text{ мм} > 179 \text{ мм}$), т. е. троллейбус в снаряженном состоянии не сможет преодолеть яму шириной 200 мм .

Задача 3.2.114. При движении по дороге у троллейбуса под правыми колесами коэффициент сцепления $\varphi_{\text{п}} = 0,5$, а под левыми колесами $\varphi_{\text{л}} = 0,12$. Коэффициент сопротивления движению составляет $f = 0,022$. Определить, сможет ли троллейбус (масса $m = 11,5$ т, база $L = 5,9$ м, расстояние от центра масс до оси задних колес $b = 1,85$ м) двигаться в данных дорожных условиях.

Ответ. Движение возможно, если $F_{\text{к}} > F_{\text{f}}$.
В нашем случае $9,293 \cdot 10^3 \text{ Н} > 2,482 \cdot 10^3 \text{ Н}$, т. е. движение троллейбуса в заданных условиях возможно.

Задача 3.2.115. По условиям предыдущей задачи определить силу тяги ведущего моста, если дифференциал заблокирован.

Ответ. При заблокированном дифференциале мост развивает тяговое усилие $F_{\text{к}} = 2,401 \cdot 10^4 \text{ Н} = 24,01 \text{ кН}$.

Задача 3.2.116. С внутренней стороны криволинейного участка рельсового пути радиусом кривизны по внутреннему рельсу $R_{\text{рв}} = 16$ м ремонтники поставили свой автомобиль на расстоянии $l = 1,2$ м от внутреннего рельса. Определить сможет ли трамвай АКСМ 60102 пройти по этому участку, не задев ремонтного автомобиля. Данные трамвая: длина кузова $l_{\text{куз}} = 1527$ мм; ширина кузова $B_{\text{куз}} = 2500$ мм; база вагона $L = 7500$ мм; база тележки $L_{\text{тел}} = 1940$ мм.

Ответ. Наибольшее расстояние середины кузова вагона от внутреннего рельса составляет $0,92$ м. Автомобиль стоит на расстоянии $1,2$ м от внутреннего рельса, т. е. трамвай не заденет стоящий автомобиль.

Задача 3.2.117. Определить, сможет ли осуществлять движение трамвай по горизонтальному участку мокрого рельсового пути

($\varphi = 0,16$), если удельное сопротивление $W = 1,5$ Н/кН. Данные по трамваю: масса $m = 34,8$ т; радиус колеса $r_{к0} = 0,35$ м. Какой максимальный уклон может преодолеть трамвай в этих условиях, если высота расположения его центра масс над уровнем головки рельса $h_c = 1,75$ м? Сопротивлением воздуха пренебречь.

Ответ. В заданных условиях трамвай может двигаться, так как $F_{\Sigma k} \gg F_f$.
Максимальный преодолеваемый уклон $i_{\max} = 0,159$ ($\alpha_{\max} = 9,11^\circ$).

Задача 3.2.118. Рассчитать углы переднего и заднего свеса трамвая, несмотря на то, что для рельсового транспорта они не имеют практического значения. Длина кузова трамвая $L_k = 15,27$ м; база трамвая $L = 7,5$ м; база тележки $L_{\text{тел}} = 1,94$ м; задний свес $b_2 = 46,67\%$ базы; наименьшие расстояния наиболее выступающих точек в передней и задней частях кузова трамвая от головки рельса $h_1 = 0,3$ м и $h_2 = 0,38$ м соответственно.

Ответ. Угол переднего свеса $\gamma_1 = 0,128$ рад = $7,334^\circ$;
угол заднего свеса $\gamma_2 = 0,108$ рад = $6,188^\circ$.

Задача 3.2.119. Определить габаритный радиус троллейбуса с идеальной трапецией без учета и с учетом увода колес, если колесная база троллейбуса $L = 5,675$ м; длина переднего свеса $h_1 = 2,59$ м; ширина колеи передних колес $B_1 = 2,03$ м; ширина кузова $B_k = 2,5$ м; плечо обката управляемых колес $a = 0,7$ м; максимальный угол поворота внутреннего колеса $\alpha_v = 43^\circ$.

Ответ. Без учета увода габаритный радиус троллейбуса равен $R_{\text{габ}} = 10,465$ м; с учетом увода $R_{\text{габ}} = 10,766$ м.

Задача 3.2.120. Определить величину смещения середины кузова трамвая $y_{\text{см}}$ и величину выноса переднего внутреннего угла кузова вагона $y_{\text{вын}}$ при движении его по криволинейной траектории радиусом $R = 16$ м. Параметры трамвая: длина кузова $L_k = 15,3$ м; ширина кузова $B_k = 2,6$ м; база трамвая $L = 7,5$ м.

Ответ. Величина смещения $y_{\text{см}} = 0,439$ м;
величина выноса $y_{\text{вын}} = 1,389$ м.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое проходимость подвижного состава? Какие факторы влияют на потерю проходимости?
2. От каких факторов зависит возможность преодоления пороговых препятствий ведомыми и ведущими колесами троллейбуса? Каковы предельные значения высоты препятствий, преодолеваемых этими колесами?
3. Каковы показатели опорно-сцепной проходимости троллейбуса? По каким формулам их вычисляют?
4. Назовите свойства простого конического дифференциала. Как определить суммарный момент, реализуемый этим дифференциалом при различных условиях сцепления колес?
5. Какие способы повышения проходимости троллейбуса с дифференциальным приводом колес вы знаете? За счет чего они улучшают проходимость?
6. Что характеризуют величины и углы переднего и заднего свеса подвижного состава?
7. Какие показатели профильной проходимости в вертикальной и горизонтальной плоскости вы знаете?
8. Каковы значения допускаемых нагрузок на мосты троллейбуса?
9. Имеют ли ограничения нормальные нагрузки на мосты троллейбуса и если имеют, то назовите ограничения?
10. Какие типы дифференциалов вы знаете? Каковы назначение и свойства дифференциалов различных типов?
11. Что понимается под габаритным радиусом поворота и коридором движения одиночного и сочлененного троллейбуса?
12. Что понимается под радиусами горизонтальной и поперечной проходимости и как на них влияют величины переднего и заднего свесов кузова?
13. Почему длина трамвайного вагона ограничена до 15,3 м?
14. Изобразите схему преодоления колесом порогового препятствия.
15. Назовите величины микронеровностей асфальтовой дороги и рельсового пути.

3.2.7. Колебания и плавность хода подвижного состава

Задача 3.2.121. Определить коэффициенты приведенной жесткости передней и задней подвесок троллейбуса, если коэффициент жесткости упругого элемента $c_{p,yэ} = 6$ кН/м, а коэффициент жесткости шин $c_{ш} = 50$ кН/м.

Решение

1. Жесткости подвески переднего c_{p1} и заднего c_{p2} мостов

$$c_{p1} = 2c_{p,yэ} = 2 \cdot 6 = 12 \text{ кН/м};$$

$$c_{p2} = 4c_{p,yэ} = 4 \cdot 6 = 24 \text{ кН/м}.$$

2. Жесткости шин переднего $c_{ш1}$ и заднего $c_{ш2}$ мостов

$$c_{ш1} = 2c_{ш} = 2 \cdot 50 = 100 \text{ кН/м};$$

$$c_{ш2} = 4c_{ш} = 4 \cdot 50 = 200 \text{ кН/м}.$$

3. Коэффициенты приведенной жесткости подвесок переднего $c_{пр1}$ и заднего $c_{пр2}$ мостов

$$c_{пр1} = \frac{c_{p1}c_{ш1}}{c_{p1} + c_{ш1}} = \frac{12 \cdot 100}{12 + 100} = 10,714 \text{ кН/м};$$

$$c_{пр2} = \frac{c_{p2}c_{ш2}}{c_{p2} + c_{ш2}} = \frac{24 \cdot 200}{24 + 200} = 21,429 \text{ кН/м}.$$

Ответ. Коэффициенты приведенной жесткости: передней подвески $c_{пр1} = 10,714$ кН/м; задней – $c_{пр2} = 21,429$ кН/м.

Задача 3.2.122. Коэффициент жесткости одного упругого элемента передней подвески троллейбуса $c_{yэ1} = 42$ кН/м, задней – $c_{yэ2} = 36$ кН/м, подрессоренная масса $m_{п} = 13,8$ т, координаты центра масс $a_{п} = 4,04,1$ м, $b_{п} = 2,0$ м, радиус инерции $\rho_y = 2,8$ м. Определить собственные частоты вертикальных и продольных угловых колебаний кузова троллейбуса.

Р е ш е н и е

1. Жесткости передней c_{p1} и задней c_{p2} подвесок

$$c_{p1} = 2c_{y31} = 2 \cdot 42 = 84 \text{ кН/м};$$

$$c_{p2} = 4c_{y32} = 4 \cdot 36 = 144 \text{ кН/м}.$$

2. Собственная частота вертикальных колебаний кузова

$$\omega_{св} = \sqrt{\frac{c_{p1} + c_{p2}}{m_{п}}} = \sqrt{\frac{(84 + 144)10^3}{13,8 \cdot 10^3}} = 4,06 \text{ рад/с} = 2,63 \text{ Гц}.$$

3. Собственная частота продольно-угловых колебаний кузова

$$\begin{aligned} \omega_{спу} &= \sqrt{\frac{c_{p1}a^2 + c_{p2}b^2}{J_y}} = \sqrt{\frac{84 \cdot 10^3 \cdot 4,04^2 + 144 \cdot 10^3 \cdot 2,0^2}{13,8 \cdot 10^3 \cdot 2,8^2}} = \\ &= 4,242 \text{ рад/с} = 0,675 \text{ Гц}, \end{aligned}$$

где a и b – соответственно расстояния от центра масс до осей передних и задних колес;

J_y – момент инерции подрессоренной массы: $J_y = mr^2$.

Ответ. Собственная частота вертикальных $\omega_{св} = 16,522 \text{ рад/с}$ (2,63 Гц).

Собственная частота продольно угловых колебаний $\omega_{спу} = 4,242 \text{ рад/с}$ (0,675 Гц).

Задача 3.2.123. По данным предыдущей задачи определить координату центра упругости $x_{упр}$ относительно центра масс кузова. Как необходимо изменить коэффициент жесткости заднего упругого элемента подвески, чтобы оба центра совпадали?

Р е ш е н и е

1. Жесткости передней c_{p1} и задней c_{p2} подвесок троллейбуса

$$c_{p1} = 2c_{y31} = 2 \cdot 42 = 84 \text{ кН/м};$$

$$c_{p2} = 4c_{y32} = 4 \cdot 36 = 144 \text{ кН/м}.$$

2. Координата центра упругости [1]

$$x_{\text{упр}} = \frac{ac_{p1} - bc_{p2}}{c_{p1} + c_{p2}} = \frac{84 \cdot 10^3 \cdot 4,04 - 144 \cdot 10^3 \cdot 2,0}{(84 + 144) \cdot 10^3} = 0,225 \text{ м}, \quad (3.6)$$

где a и b – соответственно расстояния от центра масс до осей передних и задних колес;

c_{p1} и c_{p2} – соответственно жесткости передней и задней подвесок.

3. При совпадении координаты центра упругости и центра масс координата $x_{\text{упр}}$ равна нулю, т. е. $x_{\text{упр}} = 0$. Из выражения (3.1) определим жесткость задней подвески при условии совпадения координат центра упругости и центра масс:

$$c_{p2} = \frac{a}{b} c_{p1} = \frac{4,04}{2,0} 84 \cdot 10^3 = 1,697 \cdot 10^5 \text{ Н/м}.$$

4. Жесткость задней подвески равна $c_2 = 144000$ Н/м. Следовательно, чтобы совпали центры масс и упругости, жесткость задней подвески необходимо увеличить на

$$\Delta c_2 = 169700 - 144000 = 25700 \text{ Н/м}.$$

Ответ. Координата центра упругости $x_{\text{упр}} = -0,225$ м.

Для совпадения центра масс и центра упругости, жесткость задней подвески необходимо увеличить на 25700 Н/м.

Задача 3.2.124. Определить коэффициент жесткости упругого элемента передней подвески троллейбуса c_{p1} , если его статическая деформация $\Delta_{\text{ст.1}} = 0,17$ м. Параметры троллейбуса: подрессоренная масса $m_{\text{п}} = 15,5$ т; координаты центра масс: $a = 4,04$ м; $b = 2,0$ м.

Р е ш е н и е

1. Вес, приходящийся на передний мост:

$$G_1 = \frac{b}{L} m_{\text{п}} g = \frac{2,0}{4,04 + 2,0} 15,5 \cdot 10^3 \cdot 981 = 5,035 \cdot 10^4 \text{ Н},$$

где b – расстояние от центра масс до оси задних колес;

L – база машины;

$$L = a + b;$$

m_n – подрессоренная масса машины.

2. Коэффициент жесткости упругого элемента передней подвески

$$c_1 = \frac{G_1}{2f} = \frac{5,035 \cdot 10^4}{2 \cdot 0,17} = 1,481 \cdot 10^5 \text{ Н/м} = 148,1 \text{ кН/м},$$

где f – прогиб упругого элемента.

Ответ. Жесткость упругого элемента передней подвески
 $c_1 = 148,1 \text{ кН/м}$.

Задача 3.2.125. Статический прогиб передней подвески тележки трамвая с полной нагрузкой составляет $f_{ст} = 0,05 \text{ м}$. Определить техническую частоту и период колебаний.

Р е ш е н и е

1. Техническая частота колебаний

$$n = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{f_{ст}}} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9,81}{0,05}} = 133,758 \text{ кол/мин.}$$

2. Период колебаний

$$T = \frac{60}{n} = \frac{60}{133,758} = 0,449 \text{ с.}$$

Ответ. Техническая частота $n = 133,758 \text{ кол/мин}$;
период колебаний $T = 0,449 \text{ с}$.

Задача 3.2.126. Найти приведенные жесткости передней и задней подвесок троллейбуса. Технические данные троллейбуса: жесткости подвесок: передней $c_{p1} = 515 \text{ кН/м}$, задней $c_{p2} = 1400 \text{ кН/м}$;

жесткости шин: передних колес $c_{ш1} = 2524$ кН/м, задних колес $c_{ш2} = 6350$ кН/м. На сколько процентов приведенные жесткости подвесок отличаются от жесткости их упругих элементов?

Р е ш е н и е

1. Приведенная жесткость передней подвески

$$c_{пр1} = \frac{c_{p1}c_{ш1}}{c_{p1} + c_{ш1}} = \frac{515 \cdot 2524}{515 + 2524} = 427,726 \text{ кН/м.}$$

2. Приведенная жесткость задней подвески

$$c_{пр2} = \frac{c_{p2}c_{ш2}}{c_{p2} + c_{ш2}} = \frac{1400 \cdot 6350}{1400 + 6350} = 1,147 \cdot 10^3 \text{ кН/м.}$$

3. Отличие приведенных жесткостей подвесок от жесткостей их упругих элементов:
передней подвески

$$\Delta_1 = \frac{c_{p1} - c_{пр1}}{c_{p1}} 100 = \frac{515 - 427,726}{515} 100 = 16,9 \%;$$

задней подвески

$$\Delta_2 = \frac{c_{p2} - c_{пр2}}{c_{p2}} 100 = \frac{1400 - 1,147 \cdot 10^3}{1400} 100 = 18,1 \%.$$

Ответ. Приведенные жесткости подвесок: передней $c_{p1} = 427,726$ кН/м, задней $c_{p2} = 1,147 \cdot 10^3$ кН/м. Отличие приведенных жесткостей подвесок от жесткостей их упругих элементов: передней $\Delta_1 = 16,9 \%$, задней $\Delta_2 = 18,1 \%$.

Задача 3.2.127. Найти закон вертикального перемещения кузова трамвая, если амплитуда его вертикальных колебаний $A = 50$ мм, а техническая частота $f = 150$ кол/мин.

Решение

Закон перемещения подрессоренного кузова трамвая при колебаниях

$$z_k = A \sin \omega t = A \sin \left(2\pi \frac{n}{60} t \right) = 5 \cdot \sin \left(2\pi \frac{150}{60} t \right) = 5 \cdot \sin(15,708t).$$

Ответ. Закон перемещения подрессоренного кузова
 $z_k = 5 \cdot \sin(15,708t).$

Задача 3.2.128. Найти значения скорости и ускорения колебаний кузова троллейбуса за промежуток времени $t = 1,2$ с, а также их максимальные значения. Закон перемещения кузова $z_k = 2 \cdot \sin(4\pi t).$

Решение

1. Скорость перемещения кузова

$$v_k = \frac{dz_k}{dt} = 2 \cdot 4\pi \cos(4\pi t) = 8\pi \cos(4\pi \cdot 1,2) = 24,4 \text{ см/с} = 0,244 \text{ м/с}.$$

2. Максимальная скорость перемещения кузова будет при $\cos(\omega t) = 1.$

$$\text{Тогда } v_{k \max} = 2 \cdot 4\pi \cdot 1 = 25,1 \text{ см/с} = 0,251 \text{ м/с}.$$

3. Ускорение при колебаниях кузова

$$\begin{aligned} a &= \frac{d^2 z}{dt^2} = -2 \cdot 4\pi \cdot 4\pi \sin(4\pi t) = -32\pi^2 \sin(4\pi t) = -315,827 \sin(12,566t) = \\ &= -74 \text{ см/с}^2 = -0,74 \text{ м/с}^2. \end{aligned}$$

4. Максимальное ускорение будет при $\sin(\omega t) = 1.$

$$\text{Тогда } a_{k \max} = -32\pi^2 \cdot 1 = -316 \text{ см/с}^2 = -0,316 \text{ м/с}^2.$$

Ответ. При $t = 1,2$ с скорость перемещения кузова $v_k = 0,244$ м/с;
максимальная скорость $v_{k \max} = 0,251$ м/с.
Ускорение при колебаниях кузова $a_k = -0,74$ м/с²;
максимальное ускорение $a_{k \max} = -0,316$ м/с².

Задача 3.2.129. Поддрессоренная масса троллейбуса $m_n = 13,6$ т; статический прогиб подвески $f_{ст} = 22,8$ см; коэффициент сопротивления амортизатора $k_a = 12,5$ кН·с/м (на троллейбусе установлено $n_a = 4$ амортизатора). Троллейбус установлен на платформу, совершающую вертикальные колебания с резонансной скоростью и амплитудой $A = 2,54$ см. Определить амплитуду колебаний поддрессоренной массы троллейбуса.

Р е ш е н и е

1. Частота собственных колебаний поддрессоренной массы

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{f_{ст}}} = \sqrt{\frac{9,81}{0,228}} = 6,559 \text{ с}^{-1} = 6,6 \text{ с}^{-1}.$$

2. Суммарный коэффициент сопротивления амортизаторов

$$k_{\Sigma a} = n_a k_a = 4 \cdot 12,5 = 50 \text{ кН} \cdot \text{с/м}.$$

3. Колебательные движения поддрессоренной массы описываются уравнением

$$m_n \ddot{z} + k_{\Sigma a} \dot{z} + c_p z = A_F \sin(\omega t + \varphi),$$

где A_F = амплитуда переменной силы:

$$A_F = \sqrt{(c_p a_0)^2 + (k_{\Sigma a} a_0 \omega)^2};$$

$c_p a_0$ и $k_{\Sigma a} a_0 \omega$ – наибольшие значения силы упругости и силы затухания.

4. При резонансе возмущающая сила

$$F_{воз} = \sqrt{(c_p a_0)^2 + (k_{\Sigma a} a_0 \omega)^2},$$

здесь

$$c_p = \frac{m_{пг} g}{f_{ст}} = \frac{13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,81}{0,228} = 5,852 \cdot 10^5 \text{ Н/м};$$

$$a_0 = 0,0254 \text{ м.}$$

Тогда

$$F_{\text{воз}} = \sqrt{(c_p a_0)^2 + (k_{\Sigma a} a_0 \omega)^2} = \\ = \sqrt{(5,852 \cdot 10^5 \cdot 0,0254)^2 + (50 \cdot 10^3 \cdot 0,0254 \cdot 6,6)^2} = 8,383 \cdot 10^4 \text{ Н} = 83,83 \text{ кН.}$$

5. Амплитуда колебаний

$$z_0 = \frac{F_{\text{воз}}}{k_{\Sigma a} \omega} = \frac{83,83 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^3 \cdot 6,6} = 0,025 \text{ м} = 2,5 \text{ см.}$$

Ответ. Амплитуда колебаний равна 2,5 см.

Задача 3.2.130. Поддрессоренная масса подвижного состава m имеет базу $L = 2l$ и опирается на упругие элементы разной жесткости – передний c_{p1} и задний $c_{p2} = 2c_{p1}$. Найти две собственные частоты и вид соответствующих главных колебаний.

Решение

1. Пусть z – вертикальное перемещение центра масс поддрессоренной массы, а φ – угол ее поворота относительно центра масс. Тогда перемещение передней части поддрессоренной массы равно $z + l\varphi$, а задней части – $z - l\varphi$. Определяем силы, действующие в передней F_1 и задней F_2 подвесках:

$$F_1 = c_{p1}(z + l\varphi); \quad F_2 = 2c_{p1}(z - l\varphi).$$

Запишем уравнения колебаний поддрессоренной массы подвижного состава:

$$\begin{cases} m\ddot{z} + c_{p1}(z + l\varphi) + 2c_{p1}(z - l\varphi) = 0; \\ \frac{4}{12} m l^2 \ddot{\varphi} + c_{p1}l(z + l\varphi) - 2c_{p1}l(z - l\varphi) = 0. \end{cases}$$

Решение уравнений ищем в виде зависимостей

$$z_1 = a_1 \sin \omega t; \quad z_2 = a_2 \sin \omega t.$$

Подставляя решения в исходные уравнения, после преобразований получим

$$\begin{cases} (-m\omega^2 + 3c_{p1})z - c_{p1}l\varphi = 0; \\ -c_{p1}lz + \left(-\frac{1}{3}m\omega^2 l^2 + 3c_{p1}l^2\right)\varphi = 0. \end{cases}$$

2. Из последних уравнений находим уравнение частот:

$$\left(-m\omega^2 + 3c_{p1}\right)\left(-\frac{1}{3}m\omega^2 l^2 + 3c_{p1}l^2\right) - (c_{p1}l)^2 = 0.$$

Раскрыв скобки, имеем

$$\omega^4 - 12\frac{c_{p1}}{m}\omega^2 + 24\left(\frac{c_{p1}}{m}\right)^2 = 0.$$

3. Решения этого уравнения (собственные частоты) следующие:

$$\omega_1^2 = 2,54\frac{c_{p1}}{m}; \quad \omega_2^2 = 9,46\frac{c_{p1}}{m}.$$

4. Виды колебаний, соответствующие найденным частотам, определим из второго уравнения, которое запишем в виде

$$\frac{z}{l\varphi} = -\frac{1}{3}\frac{m}{c_{p1}}\omega^2 + 3.$$

Подставляя в уравнение значения квадратов собственных частот, получим

$$\left(\frac{z}{l\varphi}\right)_1 = +2,15; \quad \left(\frac{z}{l\varphi}\right)_2 = -0,15.$$

Результаты говорят, что подрессоренная масса совершает колебательные угловые движения, с одной стороны, вокруг точки, лежащей на расстоянии 2,16/ от ее центра масс к задней подвеске с частотой ω_1 , а с другой стороны – около точки, лежащей на расстоянии 0,15/ от ее центра масс к передней подвеске с частотой ω_2 .

Ответ. Собственные частоты колебаний подрессоренной массы.

$$\text{подвижного состава: } \omega_1^2 = 2,54 \frac{C_{p1}}{m}; \quad \omega_2^2 = 9,46 \frac{C_{p1}}{m}.$$

Задача 3.2.131. Подрессоренная масса кузова четырехосного трамвая составляет $m = 19,3$ т; статический прогиб упругих элементов подвески $f_{ст} = 30$ мм. Определить величину демпфирования в подвеске, при которой не будет наблюдаться колебательный процесс движения кузова в вертикальном направлении при собственных его колебаниях.

Ответ. Суммарное демпфирование в подвеске трамвая должно быть не более $4\beta_z < 2,948 \cdot 10^{10}$ Н·с/м.

Задача 3.2.132. Определить критическую скорость трамвая при движении по рельсовому пути с длиной рельсов $L_{p1} = 12,5$ м и $L_{p2} = 25$ м, если статический прогиб подвески составляет $f_{ст} = 50$ мм.

Ответ. При длине рельсов 12,5 м критическая скорость $v_{кр} = 27,951$ м/с = 100,62 км/ч; при длине рельсов 25 м $v_{кр} = 55,902$ м/с = 201,247 км/ч.

Задача 3.2.133. Определить угол наклона амортизатора, обеспечивающий гашение как вертикальных, так и боковых колебаний кузова трамвая.

Ответ. Угол наклона амортизатора может находиться в пределах от $\alpha_{гас1} = 0,588$ рад = 33,69° до $\alpha_{гас2} = 0,983$ рад = 56,322°.

Задача 3.2.134. Подвеска сиденья имеет жесткость $c_c = 12,75$ кН/м; масса водителя с сиденьем $m_c = 65$ кг; начальное перемещение сиденья $z_0 = 0,03$ м; скорость $v = 0,05$ м/с. Определить ускорение водителя в начальный момент времени, а также максимальные значения перемещения, скорости и ускорения.

Ответ. Ускорение водителя в начальный момент времени

$$a_v = 0,03 \text{ м/с}^2.$$

Максимальные значения параметров вертикальных колебаний: скорости $\dot{z} = 0,042$ м/с; ускорения $\ddot{z} = 5,886$ м/с².

Задача 3.2.135. Определить отношение частот собственных колебаний подрессоренной массы на задней подвеске троллейбуса в снаряженном состоянии и с полной нагрузкой. Масса троллейбуса, приходящаяся на заднюю подвеску: в снаряженном состоянии $m_{2сн} = 4240$ кг; с полной нагрузкой $m_{2п} = 13300$ кг. Жесткость упругих элементов для снаряженного состояния $c_{p2сн} = 706$ кН/м; для полного состояния $c_{p2п} = 864$ кН/м.

Ответ. Отношение частот собственных колебаний подрессоренной массы на задней подвеске троллейбуса в снаряженном состоянии и с полной нагрузкой составляет $\lambda = 1,601$.

Задача 3.2.136. Условный статический прогиб подвески равен $f_{ст1} = 1,0$ м. Чему равна собственная частота колебаний кузова? Во сколько раз изменится частота, если условный статический прогиб будет равен $f_{ст2} = 0,25$ м?

Ответ. Собственная частота колебаний кузова равна $\omega_c = 0,498$ Гц.

Если условный статический прогиб станет равным $f_{ст2} = 0,25$ м вместо $f_{ст1} = 1,0$ м, частота колебаний изменится в два раза.

Задача 3.2.137. Для регистрации вибраций трамвайного вагона к его потолку одним концом крепится пружина жесткостью $c = 10$ Н/см. На другом (нижнем) конце пружины закреплен груз весом $G = 98$ Н со стрелкой. При колебаниях вагона начинаются вертикальные колебания груза относительно вагона, которые регистрируются движением стрелки вдоль шкалы, закрепленной на стене вагона.

Составить уравнение движения груза, определить коэффициент динамичности и расстройки, если вагон совершает колебания согласно уравнению $\xi = a \sin pt$, где $a = 0,5$ см; $p = 16\pi$, с^{-1} . В начальный момент груз находится в покое в положении статического равновесия. Силой сопротивления движению груза пренебречь.

Ответ. Уравнение движения груза $z = 0,1 \sin 10t - 0,02 \sin 16\pi t$ см.

Коэффициент динамичности $k_d = 0,04$. Коэффициент расстройки $k_p = 5,03$.

Задача 3.2.138. Троллейбус имеет коэффициент распределения масс $\varepsilon = 1$. Передняя его часть с колесами движется с постоянной скоростью $v = 60$ км/ч по дорожным неровностям, которые описываются уравнением $z = a \sin \frac{\pi x}{l} = 0,025 \sin \frac{\pi x}{0,9}$. Определить амплитуду вынужденных вертикальных колебаний передней поддрессоренной части троллейбуса, если статическая деформация подвески $f_{\text{ст}} = 50$ мм. Массой колес пренебречь.

Ответ. Амплитуда вынужденных вертикальных колебаний передней поддрессоренной части троллейбуса составляет $A = 0,00154$ м = 1,54 мм.

Задача 3.2.139. Определить собственные частоты колебаний (галоупирования, подпрыгивания) и расположение центров колебаний троллейбуса при следующих данных: поддрессоренная масса $m_n = 15,3$ т; радиус инерции $\rho = 3,44$ м; база $L = 6,04$ м; расстояние от центра масс до оси задних колес $b = 2$ м; приведенная жесткость передней подвески $c_{p1} = 1169$ кН/м; приведенная жесткость задней подвески $c_{p2} = 2451$ кН/м.

Ответ. Собственные частоты колебаний $\omega_1 = 12,603 \text{ с}^{-1} = 2$ Гц;
 $\omega_2 = 15,387 \text{ с}^{-1} = 2,45$ Гц.

Положение центров колебаний $l_1 = -0,151$ м; $l_2 = 78,624$ м.

Задача 3.2.140. Определить длину волны L_v боковых колебаний (виляний) четырехосного трамвая и частоту ω его извилистого движения, если известно: диаметр колеса $D_k = 2r_k = 700$ мм; коничность обода колеса $n = 0,05$; двухосная тележка имеет поперечную связь

$\xi = 0,5$; расстояние между осями пятников тележек $2/l_{\text{пят}} = 7500$ мм; колея рельсового пути $2S = 1520$ мм.

Ответ. Длина волны боковых колебаний $L_{\text{в}} = 36,692$ м;
частота извилистого движения $\omega = 0,171$ с⁻¹.

Вопросы для самоконтроля

1. Каково влияние колебаний и вибраций на организм человека?
2. Какие показатели плавности хода подвижного состава вы знаете? Как они определяются?
3. Каково назначение упругих и диссипативных элементов подвески? Какие типы упругих элементов находят применение на подвижном составе и каковы их свойства?
4. Какие виды колебаний совершают подрессоренные и не-подрессоренные массы подвижного состава? Какие виды колебаний учи-тываются в простейших математических моделях?
5. От каких параметров зависят собственные частоты вертикальных и продольно-угловых колебаний подрессоренной массы и по каким формулам они определяются?
6. Как определить жесткости упругих элементов подвески и шин троллейбуса? Каково соотношение между ними?
7. Что такое центр упругости системы? Как определить его продольную координату относительно центра масс кузова?
8. Что понимается под галопированием? Какие параметры подвижного состава оказывают влияние на его склонность к галопированию?
9. С какой целью применяют подвески с нелинейными упругими элементами? Каковы преимущества независимой подвески?
10. Укажите основные меры, которые способствуют повышению плавности хода подвижного состава.
11. Какие типы упругих элементов вы знаете? Каковы их свойства?
12. Как влияют шины на плавность хода троллейбуса?
13. Из каких ступеней состоит двойное подрессоривание трамвая и какие элементы в них применяются?
14. Почему при исследовании колебаний трамвая с двойным подрессориванием можно пренебречь упругостью рельсового пути?
15. Какие методы применяются для оценки плавности хода трамвайных вагонов?

4. ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ

Для закрепления полученных знаний и освоения новых вопросов типовой и учебной программы в качестве самостоятельной работы предусмотрено написание рефератов, темы которых даются ниже.

1. Перспективы развития троллейбусостроения.
2. Перспективы развития трамваестроения.
3. Тенденции развития троллейбусных трансмиссий.
4. Тенденции развития трамвайных трансмиссий.
5. Перспективы использования скоростного трамвая.
6. Применение многозвенного подвижного состава.
7. Подвижной состав для сообщения с городами-спутниками.
8. Тенденции развития средств автономного движения троллейбусов.
9. Современные системы управления тяговыми электродвигателями подвижного состава.
10. Подвижной состав как колебательная механическая система.
11. Типы контактных подвесок и динамика их взаимодействия с токоприемниками подвижного состава.
12. Влияние конструкции и состояния контактной сети на эксплуатационную скорость подвижного состава.
13. Рельсовый путь и его механические характеристики.
14. Рельсовая колея и вписываемость трамвайного вагона в криволинейные участки рельсового пути.
15. Возвышение наружного рельса и переходные кривые.
16. Механико-математические модели трамвайного вагона для исследования его колебаний при движении по неровностям рельсового пути.
17. Механико-математические модели для исследования трогания и разгона подвижного состава.
18. Механико-математические модели для исследования торможения подвижного состава механическими и электрическими тормозами и при совместном торможении.
19. Критерии сравнительной оценки подвижного состава.
20. Габариты, планировка, вместимость и внутренние размеры кузова подвижного состава.
21. Весовые характеристики, осьность и показатели использования сцепного веса подвижного состава.

5. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ И ЗАДАНИЙ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Типовой и учебной программами по дисциплине «Теория подвижного состава» предусмотрена самостоятельная работа студентов, на которую отводится 52–54 часа. Во время самостоятельной работы предполагается изучение вопросов и выполнение ряда работ, некоторые из которых приводятся ниже:

- изучение материала по конспекту лекций и рекомендуемой литературе;
- посещение консультаций для уточнения непонятных вопросов;
- подбор материала и написание реферата по выбранной теме;
- подготовка к практическим работам;
- оформление результатов расчета, выполненного на практических работах;
- подготовка к выполнению лабораторных работ;
- оформление отчетов о выполненных лабораторных работах и повторение материалов, относящихся к выполненным лабораторным работам;
- защита отчетов о лабораторных работах;
- подготовка к сдаче зачета по дисциплине;
- повторение материалов дисциплины в период экзаменационной сессии.

6. ДИАГНОСТИКА КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТА

Оценка уровня знаний студента производится *по десятибалльной* шкале, и для оценки достижений студента используется следующий диагностический инструментарий:

- устный опрос во время практических и лабораторных занятий;
- проведение текущих контрольных работ по отдельным темам;
- защита выполненных на практических и лабораторных занятиях индивидуальных заданий;
- защита выполненных в рамках управляемой самостоятельной работы индивидуальных заданий;

- выступление студента на конференции по подготовленному реферату или исследованию;
- сдача зачета по дисциплине (3-й курс);
- защита курсовой работы (4-й курс);
- сдача экзамена (4-й курс).

Для изучения дисциплины «Теория подвижного состава» на кафедре «Тракторы» БНТУ разработан ряд учебно-методических пособий, которые рекомендуются студентам в качестве основной литературы (см. список литературы, приведенный в конце данного учебно-методического пособия).

7. КУРСОВАЯ РАБОТА

7.1. Цель и задачи курсовой работы

Главной целью выполнения курсовой работы по дисциплине «Теория подвижного состава» является закрепление, углубление и обобщение студентами знаний, полученных за время изучения дисциплины «Теория подвижного состава», и выработка у них умения самостоятельно применять эти знания для творческого решения конкретных инженерных задач по исследованию эксплуатационных свойств подвижного состава городского электрического транспорта.

Задача курсовой работы – решение студентами практической исследовательской задачи прикладного технического характера для заданного подвижного состава городского электрического транспорта, выполненной по индивидуальному заданию.

Рекомендации данного раздела должны способствовать высококачественному и своевременному выполнению студентами курсовой работы и уменьшению непроизводительных потерь времени на поиск необходимых материалов.

Курсовая работа выполняется в 7-м семестре. В содержание курсовых работ входит:

- определение требуемой мощности тягового электродвигателя для заданного ПС ГЭТ и выбор по каталогу тягового электродвигателя постоянного или переменного тока по рассчитанной мощности;
- расчет и построение электромеханической характеристики двигателя в тяговом и генераторных режимах;

- расчет и построение тягово-скоростной характеристики для заданного ПС ГЭТ;
- характеристика тягового двигателя и тягово-скоростная характеристика для заданного ПС ГЭТ, представленные в виде графиков;
- расчет и подбор требуемой мощности аккумуляторных батарей для внутреннего потребления электроэнергии или обеспечения автономного движения ПС;
- подбор мощности дизель-генераторной установки для обеспечения автономного движения ПС с заданной скоростью;
- подбор суперконденсаторов, обеспечивающих движение автономного хода ПС на заданное расстояние;
- выводы по результатам расчета или исследования.

Курсовая работа выполняется во внеурочное время, при этом студентам рекомендуется пользоваться готовыми программами для ПЭВМ, разработанными на кафедре «Тракторы» для исследования эксплуатационных свойств подвижного состава ГЭТ. Тематика курсовых работ определяется преподавателем и утверждается на заседании кафедры.

Во время выполнения курсовой работы студент пользуется консультациями его руководителя. В процессе выполнения курсовой работы студент должен следить за правильностью принятых допущений, расчетных схем подвижного состава, результатов расчета или исследования, руководствоваться аналогичными имеющимися механико-математическими моделями.

7.2. Структура пояснительной записки

Пояснительная записка к курсовой работе должна иметь следующую структуру:

1. Титульный лист.
2. Бланк задания.
3. Реферат.
4. Содержание.
5. Введение.
6. Тягово-динамический расчет подвижного состава
 - 6.1. Расчет снаряженной и полной массы подвижного состава.
 - 6.2. Расчет потребной мощности тягового электродвигателя.
 - 6.3. Выбор двигателя по каталогу и построение его характеристик.

6.4. Определение передаточного числа трансмиссии и расчетного радиуса ведущих колес.

6.5. Построение тягово-скоростной характеристики подвижного состава.

6.6. Определение разгонных свойств подвижного состава.

6.7. Определение величины преодолеваемого подъема.

7. Индивидуальное задание

8. Заключение.

9. Предметный указатель.

10. Список использованных источников.

11. Приложение (при необходимости).

12. Доклад по курсовой работе представляется в виде презентации Power Point.

Порядок изложения материала в курсовой работе должен быть подчинен цели работы. Структура раздела «Индивидуальное задание» определяется студентом **самостоятельно**, а дробление его материала на подразделы и их последовательность должны быть логически оправданы. При написании курсовой работы студент **обязан делать ссылки на источники информации**, из которых он заимствует материалы или технические характеристики машин и их узлов. **Не допускается пересказ текста других авторов без ссылки на них**, а также его цитирование без использования кавычек. Каждый раздел курсовой работы следует **завершать краткими выводами**, которые подводят итоги данного этапа исследования и на которых базируется формулировка основных результатов выполнения курсовой работы, приводимых в разделе «Заключение».

Отсутствие каких-либо разделов пояснительной записки, перечисленных выше, **не допускается**.

Пояснительная записка к курсовой работе выполняется средствами *MS Word*. Основной текст набирается шрифтом *Times New Roman Cyr* черного цвета, высотой 14 пт, через полтора интервала. Формулы набираются с использованием *MS Equation* или *Math Type*. Представление пояснительной записки в рукописном варианте не допускается. Поля в записке должны иметь следующие размеры: верхнее и нижнее – 20 мм, левое – 30 мм, правое – 15 мм. Оформление пояснительной записки должно соответствовать требованиям ГОСТ 7.32–2001. **Все расчеты выполняются в системе СИ.**

Студент несет ответственность за полноту и правильность представленных материалов и содержащуюся в них информацию.

7.3. Защита курсовой работы

Защита курсовой работы осуществляется перед комиссией в аудитории, оснащенной техническими средствами и программным обеспечением, необходимым для проведения доклада. К защите курсовой работы студент представляет:

- комплект печатных документов на листах формата А4 (пояснительная записка, комплект материалов презентации);
- материалы на электронном носителе (компакт-диск): пояснительная записка, файлы исходных данных, разработанная программа, файлы презентации, описание файлов курсовой работы.

Наименование разделов и параграфов в пояснительной записке, а также подписи к рисункам, графикам и таблицам должны иметь уникальные обозначения, формирование которых рекомендуется осуществлять в автоматическом режиме.

Слайды презентации должны содержать материалы по всем разделам пояснительной записки, а также заключение.

Описание файлов курсовой работы оформляется в соответствии с рисунком 7.1. Описание представляется в виде отдельного файла, который размещается первым на электронном носителе курсовой работы.

Описание файлов курсовой работы студента Иванова И.И., гр. 101159

Имя файла	Объем файла, кБ	Содержание

Рисунок 7.1 – Пример описи файлов курсовой работы

Содержание доклада, подготовленного в виде файла презентации, воспроизводится при помощи технических средств и программного обеспечения по ходу доклада. В процессе защиты демонстрируется иллюстративный материал, позволяющий раскрыть замысел курсовой работы. Если в процессе выполнения курсовой работы была разработана программа, то в докладе демонстрируется

функционирование разработанного программного обеспечения. Доклад совместно с презентацией не должен по времени превышать пяти–восемь минут.

Для обеспечения сохранности информации и защиты ее от внесения изменений и несанкционированного копирования файлы курсовой работы могут быть открыты только для чтения.

7.4. Оформление основных разделов пояснительной записки

7.4.1. Титульный лист

Титульный лист является первой страницей пояснительной записки курсовой работы. Он подписывается студентом-исполнителем и преподавателем – руководителем курсовой работы. Номер страницы на титульном листе не ставится. Пример оформления титульного листа приведен в приложении 9.

7.4.2. Бланк-задание

Бланк задания является второй страницей пояснительной записки. Он выдается руководителем курсовой работы. При получении задания студент расписывается на бланке о его получении и ставит дату получения бланка-задания.

Выполнение курсовой работы должно вестись в соответствии с графиком выполнения работы, помещенном на оборотной стороне бланка-задания. Результаты текущего выполнения работы визируются руководителем курсовой работы и являются основой для текущего контроля и аттестации студентов.

7.4.3. Реферат

Реферат помещается в записке после бланка задания. Он содержит заголовок в виде слова «реферат», написанного по центру строки большими буквами, полужирным шрифтом. Во второй строке, также по центру, размещается информация об объеме пояснительной записки, количестве рисунков и таблиц, числе использованных источников и приложений. В третьей строке пишутся ключевые слова,

набранные прописными (большими) буквами, которых должно быть не более 15. Еще ниже размещается текст реферата (краткая аннотация) выполненной работы.

Пример написания реферата.

РЕФЕРАТ

35 с., 12 рис., 5 табл., 8 источн., 2 прил.

СТАТИЧЕСКАЯ ПОВОРАЧИВАЕМОСТЬ ТРОЛЛЕЙБУСА, СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ, ИЗМЕНЕНИЕ РАДИУСА ПОВОРОТА, ЗАНОС МОСТА, DELPHI

В работе определяется вид статической поворачиваемости проектируемого двухосного троллейбуса на 110 пассажиров аналитическим методом, путем решения системы алгебраических уравнений методом Гаусса с ведущим элементом. В результате исследования получена небольшая недостаточная поворачиваемость троллейбуса при скоростях движения от 1 до 50 км/ч, что обеспечивает ему хорошую управляемость и курсовую устойчивость как при прямолинейном, так и при криволинейном движении.

7.4.4. Содержание

Содержание пояснительной записки к курсовой работе должно отражать ее структуру, включать в себя не более трех уровней вложенности (разделы, подразделы) и быть сгенерировано автоматическими средствами текстового процессора *MS Word*. Для быстрого перехода из содержания к заголовку раздела или подраздела в тексте пояснительной записки необходимо нажать клавишу *Ctrl* и щелкнуть по названию раздела или подраздела в содержании (курсор принимает вид руки).

7.4.5. Введение

Введение должно отражать цель и задачи выполнения конкретного задания курсовой работы. В нем обосновывается актуальность

темы и показывается необходимость проведения исследований по ней для решения конкретной технической задачи. Во введении указываются основные приемы, математические методы, инструмент, программные средства, используемые для решения поставленной задачи, и основные результаты, полученные в процессе выполнения курсовой работы.

7.4.6. Тягово-динамический расчет подвижного состава

7.4.6.1. Расчет снаряженной и полной массы подвижного состава

Определение снаряженной массы подвижного состава. *Снаряженная масса* $m_{сн}$ – масса троллейбуса или трамвая в снаряженном состоянии, но без водителя, кондуктора и пассажиров.

В результате обработки данных по снаряженным массам троллейбусов и трамваев в зависимости от номинального числа перевозимых пассажиров (все места для сидения заполнены, а на 1 м² полезной площади пола салона приходится пять пассажиров) на кафедре «Тракторы» БНТУ были получены следующие эмпирические формулы для расчета снаряженной массы подвижного состава в зависимости от номинального числа пассажиров:

т р о л л е й б у с:
двухосный

$$m_{сн} = 7831,40288 \cdot 10^{-4} z_{пас} + \frac{15,76980}{10^{-4}}, \text{ кг}; \quad (7.1)$$

сочлененный

$$m_{сн} = 2224206339 + \frac{-110090164558}{z_{пас}}, \text{ кг}; \quad (7.2)$$

т р а м в а й:
четырёхосный

$$m_{сн} = 32349,55401 + \frac{-230406093859}{z_{пас}}, \text{ кг}; \quad (7.3)$$

сочлененный (трехзвенный)

$$m_{\text{сн}} = \frac{-711818048262}{-530,51951 + z_{\text{пас}}}, \text{ кг.} \quad (7.4)$$

где $z_{\text{пас}}$ – номинальное число перевозимых пассажиров (пассажироместимость).

Пример 7.1

Определить снаряженную массу троллейбуса на 110 пассажиров, сочлененного троллейбуса на 170 пассажиров, трам-вая на 150 пассажиров и сочлененного трамвая на 300 пассажиров.

Решение

По формулам (7.1)–(7.4) рассчитываем снаряженные массы:

– троллейбуса

$z_{\text{пас}} = 110$ пассажиров

$$m_{\text{сн}} = 7831,40288 \cdot 10^{\frac{15,76980}{110}} = 1,089 \cdot 10^4 \text{ кг} = 10,9 \text{ т};$$

– сочлененного троллейбуса

$z_{\text{пас}} = 170$ пассажиров

$$m_{\text{сн}} = 2224206339 + \frac{-110090164558}{170} = 1,577 \cdot 10^4 \text{ кг} = 15,8 \text{ т};$$

– четырехосного трамвая

$z_{\text{пас}} = 150$ пассажиров

$$m_{\text{сн}} = 32349,55401 + \frac{-230406093859}{150} = 1,699 \cdot 10^4 \text{ кг} = 17,0 \text{ т};$$

– сочлененного (трехзвенного) трамвая

$z_{\text{пас}} = 300$ пассажиров

$$m_{\text{сн}} = \frac{-711818048262}{-530,51951 + 300} = 3,088 \cdot 10^4 \text{ кг} = 30,90 \text{ т}.$$

Определив снаряженную массу подвижного состава, приступают к нахождению его полной массы. *Полная масса* m подвижного состава – масса снаряженного подвижного состава с водителем, кондуктором и пассажирами, которая определяется по формуле

$$m = m_{\text{сн}} + m_{\text{пас}}(n + k + 2) + m_{\text{б}}(n + k),$$

где $m_{\text{сн}}$, $m_{\text{пас}}$, $m_{\text{б}}$ – соответственно масса снаряженная подвижного состава, пассажира (при расчетах принимают $m_{\text{п}} = 75$ кг); багажа (при расчетах принимают $m_{\text{б}} = 5$ кг);

n , k – число мест для проезда пассажиров сидя и стоя соответственно:

коэффициент 2 – учитывает массу водителя и кондуктора.

Количество мест для сидения в подвижном составе городского электрического транспорта принимают не более 1/3 расчетной (номинальной) пассажироместимости. Пассажироместимость подвижного состава выбирается на основе технико-экономического расчета, в соответствии с которым разработан размерный ряд вместимости для наземного городского транспорта: 35–40; 60–75; 80–95; 110–120; 160–180; 230–260 пассажиров [3]. Число мест для проезда пассажиров стоя определяется исходя из полезной площади салона подвижного состава.

Под *полезной площадью* понимается площадь пассажирского салона без учета площади, занимаемой сиденьями и ступеньками (на рисунке 7.2 заштрихованная площадь). При номинальной загрузке салона на одном квадратном метре полезной площади могут разместиться пять человек, в часы пик – до восьми человек.

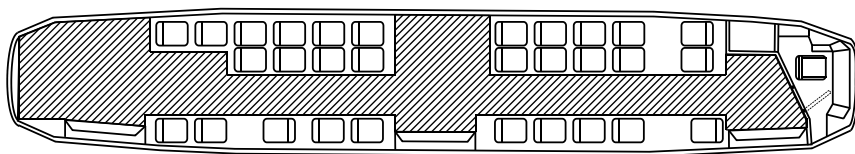


Рисунок 7.2 – Планировка пассажирского салона трамвая

Расчет габаритной и полезной площади подвижного состава. Выбор числа мест для сидения и проезда стоя. Планировка салона. Расчет начинается с определения габаритной площади по-

движного состава. *Габаритная площадь* подвижного состава – площадь по внешнему контуру кузова. Она включает в себя площади, занимаемые сидящими и стоящими пассажирами $A_{\text{пас}}$, кондукторами $A_{\text{конд}}$, подножками $A_{\text{п}}$, кабиной водителя $A_{\text{кв}}$, стенками кузова $A_{\text{ст}}$

$$A_{\text{габ}} = A_{\text{пас}} + A_{\text{конд}} + A_{\text{п}} + A_{\text{кв}} + A_{\text{ст}}. \quad (7.5)$$

Площадь салона, занимаемая пассажирами:

$$A_{\text{пас}} = A_{\text{сид}} Z_{\text{сид}} + A_{\text{ст}} Z_{\text{ст}}, \quad (7.6)$$

где $A_{\text{сид}}$ – площадь, отводимая на одного сидящего пассажира: $A_{\text{сид}} = 0,315 \text{ м}^2/\text{пас.}$;

$Z_{\text{сид}}$ – число сидений в салоне ПС;

$A_{\text{ст}}$ – площадь, отводимая на одного пассажира для проезда стоя, $A_{\text{ст}} = 0,2 \text{ м}^2/\text{пас.}$ (при $\alpha = 5 \text{ пас./м}^2$ [8]).

Площадь, занимаемая кондукторами:

$$A_{\text{МК}} = A_{\text{к}} Z_{\text{к}}, \quad (7.7)$$

где $A_{\text{к}}$ – площадь, отводимая на одного кондуктора: $A_{\text{к}} = 0,5 \text{ м}^2$;

$Z_{\text{к}}$ – количество мест для размещения кондукторов.

При бескассовой форме оплаты (компостировании абонементных талонов) и для вагонов метрополитена $A_{\text{МК}} = 0$.

Площадь, занимаемая подножками, определяется из выражения

$$A_{\text{п}} = A_1 n_1 + A_2 n_2, \quad (7.8)$$

где n_1 и n_2 – количество одинарных и двойных дверей соответственно;

$A_1 = 0,4 \text{ м}^2$ и $A_2 = 0,7 \text{ м}^2$ – площадь подножек у одинарных и двойных дверей соответственно.

Для низкопольных конструкций подвижного состава и вагонов метрополитена $A_{\text{п}} = 0$.

Двери кузовов подвижного состава располагаются с одной или с двух сторон таким образом, чтобы путь пассажира в вагонах средней вместимости не превышал 3–4 м, в шарнирно сочлененных 2,5–3 м, на метрополитене 2–2,5 м. В соответствии с действующими стандар-

тами и РТМ (руководящими техническими материалами) трамвайные четырехосные вагоны с жестким кузовом должны иметь три двери, из них не менее двух двойных. Троллейбус с длиной кузова $L_k < 9$ м – две одинарные (шириной не менее 0,7 м в свету каждая), $L_k = 9-9,5$ м – две двойные (ширина не менее 1,4 м в свету каждая), $L_k = 10,5-11$ м – две двойные или две двойные и одну одинарную; $L_k = 11,5-12$ м – три двойные или две двойные и одну одинарную; сочлененные при $L_k = 16,5-18$ м – три двойные или три двойные и одну одинарную. Вагоны метрополитена должны иметь четыре двери с шириной дверного прохода в свету при открытых дверях не менее 1,208 м [3].

Площадь, занимаемую кабиной водителя, можно принимать равной $2,5 \text{ м}^2$ для троллейбусов и вагонов трамвая; для вагонов метрополитена – 3 м^2 .

Площадь, занимаемая стенками кузова:

$$A_{ст} = b_{ст} \Pi, \quad (7.9)$$

где $b_{ст}$ – толщина стенки кузова, принимаемая равной 0,055 м (0,9 мм наружный лист; 1 мм – клей; 50 мм – квадратная труба; 3 мм – внутренний пластик) для троллейбуса и трамвая;

Π – внешний периметр кузова подвижного состава.

Максимальная длина подвижного состава по условиям вписывания в кривые участки пути согласно стандартам не должна превышать: трамвайных вагонов – 15,3 м; одиночных троллейбусов – 12 м; сочлененных троллейбусов – 16,5 м; для вагонов метрополитена (по осям автосцепок) – 19,21 м. Ширина подвижного состава, согласно стандарту принимается равной: 2,5 м для троллейбусов; (2,5–2,6) м – для трамваев; 2,7 м – для вагонов метро.

Если расчетная длина $L_{пс}$ превышает указанные значения длины подвижного состава, то необходимо проектировать шарнирно сочлененный подвижной состав, учитывая при этом, что в целях обеспечения достаточной маневренности и ограничения мешающего влияния электрического транспорта на участников городского движения его длина должна быть $L_{пс} < 24-25$ м

При решении планировочной задачи возникает проблема расположения сидений в пассажирском салоне. На подвижном составе применяется поперечное, продольное и смешанное расположение

сидений. Продольные пассажирские сиденья, как правило, выполняются многоместными, а поперечные – одно- и двухместными. Характерные варианты планировки пассажирских салонов отечественных и зарубежных троллейбусов, трамваев, метрополитена и монорельсовых дорог приведены на рисунке 7.3 [4–10].

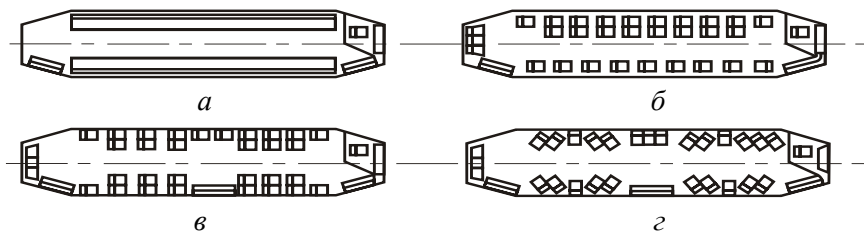


Рисунок 7.3 – Варианты расположения сидений: *a* – продольное; *б* – поперечное в три ряда; *в* – поперечное в четыре ряда; *г* – смешанное

При выборе размеров пассажирских сидений необходимо руководствоваться требованиями стандартов. Ширина одноместного сиденья должна быть не менее 0,43 м, двухместного – 0,86 м, многоместного – кратным 0,43 м. Глубина сидения принимается равной 0,4 м. Зазор между сиденьем и стенкой кузова – 0,03 м. Шаг сидений – не менее 0,735 м. При планировке продольных диванов для ног пассажиров должна быть предусмотрена полоса шириной 0,1 м (рисунок 7.4).

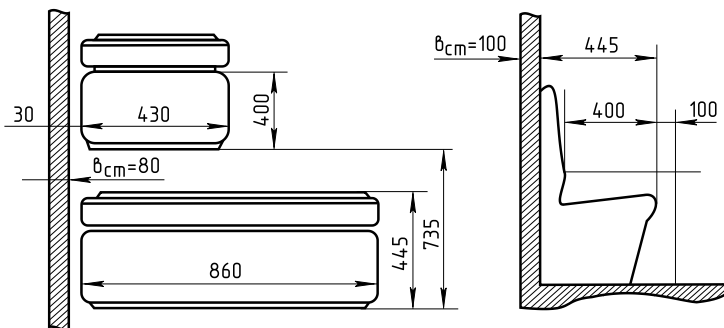


Рисунок 7.4 – Планировочные размеры пассажирских сидений

На выбор размещения сидений салона и дверей подвижного состава Существенно влияет расположение мостов троллейбуса или опор кузова тележек трамвая.

Отношение длины $L_{\text{пс}}$ трамвайных вагонов и троллейбусов к базе L по соображениям плавности хода и вписывания в коридор движения минимальной ширины должно составлять

$$k_8 = \frac{L_{\text{пс}}}{L} = 2 - 2,2. \quad (7.10)$$

Для вагонов метрополитена

$$k_8 = \frac{L_{\text{пс}}}{L} \approx 1,55.$$

Величину заднего свеса l_2 троллейбуса и нормальные реакции дороги следует определять, исходя из условия несущей способности шин ходовых колес. Так как несущая способность шин колес ведомого и ведущего мостов троллейбуса обычно одинакова, то статическая нагрузка троллейбуса распределяется между мостами пропорционально количеству ходовых колес (рисунок 7.5, а):

$$R_{z1} = k_1 G = \frac{n_1}{n} G,$$

$$R_{z2} = k_2 G = \frac{n_2}{n} G,$$

где n_1 и n_2 – количество ходовых колес ведомого и ведущего мостов;
 n – общее количество колес троллейбуса

$$l_2 = \frac{L_{\text{пс}}}{2} - k_1 L.$$

Полагая распределение статической нормальной нагрузки на ходовые части вагонов трамвая и метрополитена одинаковым (к чему необходимо стремиться), можно определить длину переднего l_1 и заднего l_2 свесов, а также реакции путевой структуры R_z (рисунок 7.5, б):

$$h_1 = h_2 = \frac{L_{\text{пс}} - L}{2} \quad \text{и} \quad R_7 = \frac{G}{2} \quad (7.11)$$

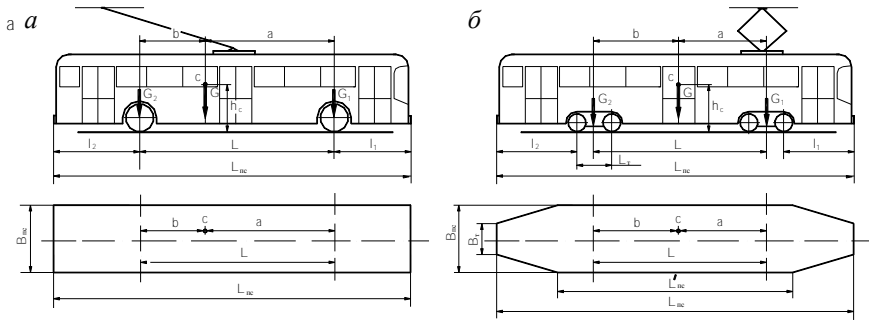


Рисунок 7.5 – Расчетные схемы для определения габаритных и весовых показателей подвижного состава: а – троллейбус; б – трамвай

При вписывании в габарит трамвайных вагонов стремятся получить максимальную длину вагона при сохранении его полной ширины в средней части кузова. Из условия равенства выносов $Y_{\text{вын}}$ кузова вагона внутрь и наружу при вписывании в кривую (рисунок 7.6, а) соотношение между длиной прямоугольной части кузова $L'_{\text{пс}}$ и его базой L определяется выражением

$$\frac{L'_{\text{пс}}}{L} = \sqrt{2}, \text{ м.} \quad (7.11)$$

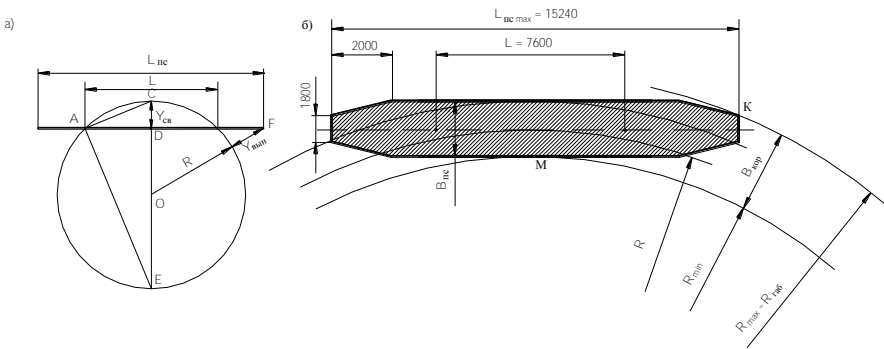


Рисунок 7.6 – Схема расчета выноса и сноса трамвая при движении в кривой (а)

и габарит четырехосного трамвая в плане (б)

При увеличении длины кузова вагона до 15,3 м контур основания вагона выполняется со срезами боковых стенок кузова по концам и шириной торцов $B_T < B_{ис}$. Ширина торцовых стенок трамвайных вагонов колеи 1524 мм сужается до размера $B_T = 1,8-1,1$ м (см. рисунок 7.6, б).

Шарнирно сочлененный подвижной состав наземного городского электрического транспорта может иметь две кузовные секции, две кузовные секции и укороченную межкузовную вставку или три кузовные секции (рисунок 7.7).

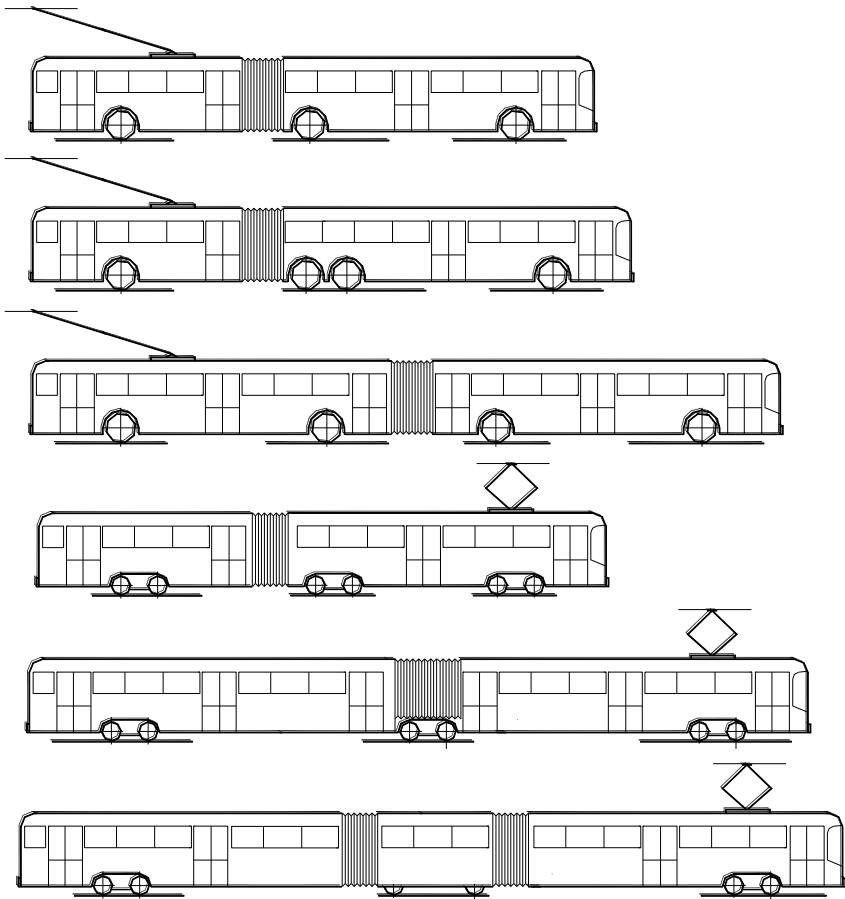


Рисунок 7.7 – Основные типы шарнирно сочлененных кузовов

Сочлененные поезда метрополитена и монорельсовых дорог могут иметь большее количество сочлененных кузовных секций. Сочленение кузовов может быть опорным, мостовым консольным и прицепного типа (см. рисунок 7.7). При проектировании двух кузовного шарнирно-сочлененного подвижного состава соотношение длин головной секции кузова $L_{гол}$ и полуприцепа $L_{пр}$ определяют из условия вписывания в кривые с минимальной шириной дорожного коридора. Обычно принимают наименьшее увеличение ширины полосы движения на поворотах. Наилучшую маневренность имеют сочлененные троллейбусы, у которых отношение длин полуприцепа и головной секции $L_{пр}/L_{гол} = 0,75$ [4]. При проектировании двух- и трехкузовного рельсового подвижного состава целесообразным с точки зрения повышения маневренности сочлененного трамвая может оказаться применение двух кабин водителя (трамвай АКСМ 843).

После определения габаритных размеров кузова ПС, размещения ходовых частей, выбора типа и количества дверей приступают к планировке салона. В окончательном варианте вместимость спроектированного подвижного состава не должна отличаться от задания больше чем на +5 пассажиров.

При расчетах, если отсутствуют массово-геометрические характеристики узлов подвижного состава, можно использовать данные по серийным аналогам ПС или по массам основных узлов ПС, приведенные в приложении 1.

Окончательный вариант решения планировочной задачи вычерчивается в масштабе с помощью ПЭВМ. Чертеж должен содержать два вида: общий вид сбоку и вид сверху (планировку салона). На виде сверху указывается размещение кабины водителя, дверей, подножек, сидений, накопительных площадок, проходов, место кондуктора. Пример оформления планировочной задачи показан на рисунок 7.8.

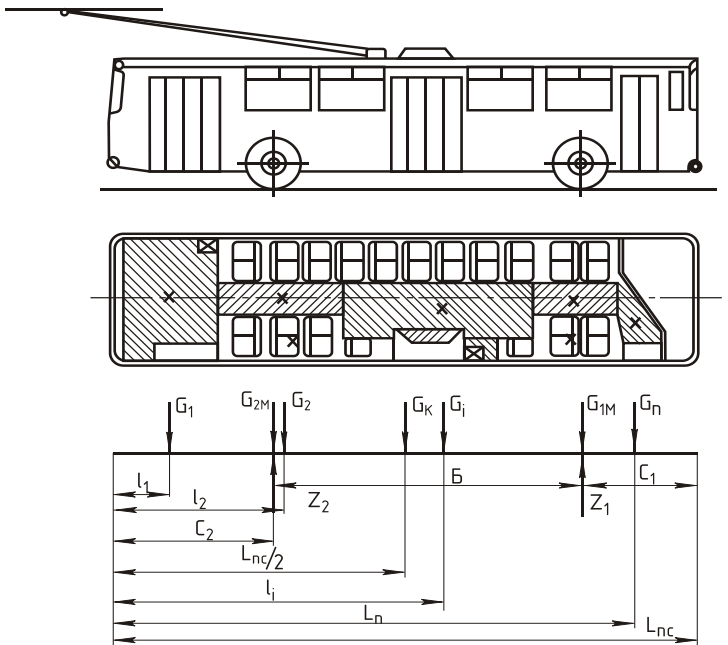


Рисунок 7.8 – Планировка салона и расчетная схема нагрузок двухосного троллейбуса

Пример 7.2

Рассчитать полную массу и число мест для сидения двухосного троллейбуса и четырехосного трамвая номинальной пассажироместимостью соответственно 110 и 140 человек и имеющих снаряженные массы 10,9 и 15,9 т.

Решение

Расчет для обоих видов подвижного состава ведем в табличном виде с использованием формул (7.5)–(7.11).

Исходные данные или параметр	Расчетная формула или обозначение параметра	Результаты расчета	
		троллейбус	трамвай
1	2	3	4
1. Пассажироместимость, чел.	$Z_{\text{пас}}$	110	140
2. Снаряженная масса, кг	$m_{\text{сн}}$	10900	15900
3. Длина / ширина кузова ПС, м	$L_{\text{пс}} / B_{\text{пс}}$	12 / 2,5	15,3 / 2,6 со скосами

1	2	3	4
4. База ПС, м	L	6	7,5
5. Коэффициент базы	$k_b = L_{\text{пс}}/L = 2,0-2,2$	2,0; удовлетворяет	2,04; удовлетворяет
6. Габаритная площадь троллейбуса, м ²	$A_{\text{габ}} = L_{\text{пс}}B_{\text{пс}}$	30	нет
6.1. Ширина торцевого сужения вагона, т. к. $L_{\text{пс}} = 15,3$ м	$B_{\text{т}}$	нет	1,8
6.2. Длина прямоугольной части кузова вагона, м	$L_{\text{пс}}^* = L\sqrt{2}$ $L = 7,5$ м	нет	10,61
6.3. Длина сужения кузова трамвая, м	$l_{\text{суж}} = 0,5\sqrt{(L_{\text{пс}} - L_{\text{пс}}^*)^2 + (B_{\text{пс}} - B_{\text{т}})^2}$	нет	2,36
6.4. Габаритная площадь трамвая со скосами м ²	$L_{\text{пс}} = 15,3$ м; $B_{\text{пс}} = 2,8$ м; $B_{\text{т}} = 1,8$ м; $l_{\text{суж}} = 2,36$ м. $A_{\text{габ}} = L_{\text{пс}}B_{\text{пс}} - l_{\text{ск}}(B_{\text{пс}} - B_{\text{т}})$	нет	37,904
7.1. Периметр кузова троллейбуса, м	$\Pi_{\text{пс}} = 2(L_{\text{пс}} + B_{\text{пс}})$	29,0	нет
7.2. Периметр кузова трамвая с сужением, м	$\Pi_{\text{пс}} = 2(L_{\text{пс}}^* + B_{\text{т}}) + 4l_{\text{суж}}$	нет	34,26
8. Толщина стенок кузова ПС, м	$b_{\text{ст}}$	0,055	0,055
9. Площадь, занимаемая стенками кузова ПС, м ²	$A_{\text{стен}} = b_{\text{ст}}\Pi_{\text{пс}}$	1,595	1,884
10. Площадь кабины водителя, м ²	$A_{\text{кв}}$	2,5	2,5
11. Число кондукторов, чел. / площадь, занимаемая кондукторами, м ² .	$Z_{\text{конд}} / A_{\text{конд}} = 0,5Z_{\text{конд}}$	1 / 0,5	1 / 0,5
12. Число дверей / число подножек, шт.	$Z_{\text{дв}} / Z_{\text{подн}}$	3 / 0	3 / 3
13. Площадь подножек, м ²	$A_{\text{подн}} = 0,7Z_{\text{дв}}$	0	2,1
14. Мест для сидения	$Z_{\text{сид}}$	35 (уточненное 17 место)	50 (уточненное 21 место)
15. Площадь, занимаемая сидящими пассажирами, м ²	$A_{\text{пас.сид}} = 0,34Z_{\text{сид}}$	11,9 (5,78)	17,0 (7,14)
16. Масса сидящих пассажиров, кг	$m_{\text{сид}} = (70 + 5)Z_{\text{сид}}$	2625 (1360)	3750 (1575)
17. Место для проезда стоя, номинальное	$Z_{\text{ст.н}} = Z_{\text{пас}} - Z_{\text{сид}}$	75 (93)	100 (119)
18. Площадь, для проезда стоя, м ²	$A_{\text{пас.ст}} = 0,2Z_{\text{ст}}$	15,0 (18,6)	20,0 (23,8)

1	2	3	4
19. Место для проезда стоя в часы пик	$Z_{ст.маж} = 8A_{пас.ст}$	120 (149)	160 (190)
20. Масса пассажиров, проезжающих стоя, кг, номинальная / в часы пик	$m_{пас.ст} = (m_{пас} + m_{б})Z_{пас.ст}$	5625 / 9000 (7440 / 11920)	7500 / 12000 (8925 / 14250)
21. Площадь, занимаемая пассажирами, м ²	$A_{пас} = A_{пас.сид} + A_{пас.ст}$	26,9 (24,38)	37,0 (30,94)
22. Уточненная габаритная площадь ПС, м ²	$A_{габ} = A_{пас} + A_{конд} + A_{подн} + A_{кв} + A_{стен}$	31,5 > 30; не удовлетворяет. Идти к п. 14 (28,98 ≈ 29). Удовлетворяет	43,98 > 37,904 не удовлетворяет. Идти к п. 14 (37,924 ≈ 37,904). Удовлетворяет
23. Полная масса Пс (уточненная), кг номинальная / в часы пик	$m = m_{сн} + m_{пас}(Z_{пас} + 2) + m_{б}Z_{пас}$	(19850 / 24330)	(26540 / 31870)

Примечание. Полу жирным шрифтом в скобках даны уточненные цифры.

Так как уточненная габаритная площадь ПС в первом приближении больше исходной габаритной площади $A_{габ}$, повторяем расчет с п. 14, уменьшая число мест для сидения, до выполнения условия, когда уточненная габаритная площадь примерно равна исходной габаритной площади ПС. Чтобы наверняка подобрать число мест для сидения, запишем зависимость габаритной площади от числа мест для сидения:

$$A_{габ} = A_{стен} + A_{кв} + A_{конд} + A_{подн} + 0,34z_{сид} + 0,2(z_{пас} - z_{сид}) \quad (7.13)$$

Результаты расчетов для трамвая вместимостью 140 пассажиров по выражению (7.13) представлены на рисунке 7.9.

Из рисунка 7.9 видно, что на габаритной площади $A_{габ} = 37,904 \text{ м}^2$ при вместимости трамвая 140 пассажиров можно установить приблизительно 21 сиденье. Принимаем число мест для сидения $z_{сид} = 21$ и повторяем расчет, начиная с п. 14 по п. 22. Уточнив число мест для сидения и проезда стоя, определяем номинальную массу по-

движного состава и массу в часы пик, которые заносим в п. 23 таблицы расчета.

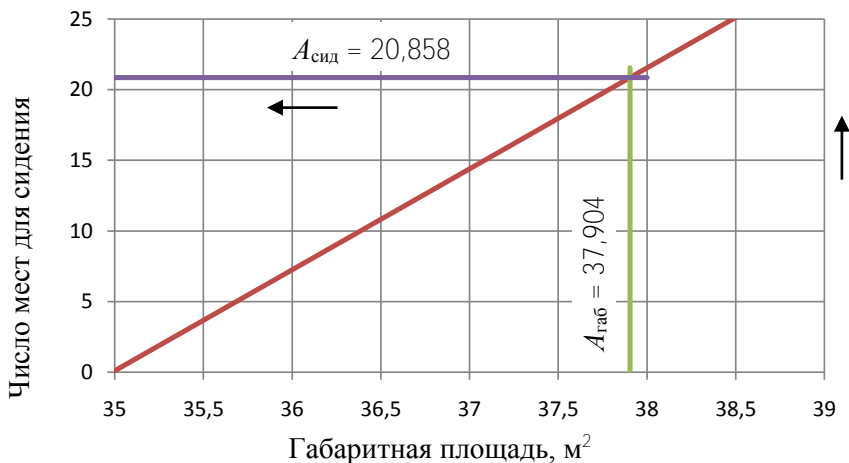


Рисунок 7.9 – Зависимость числа мест для сидения от габаритной площади

По графику число мест для сидения можно определить лишь приближенно. Для точного определения числа мест для сидения решим выражение (7.13) относительно числа мест для сидения, получим

$$z_{сид} = 7,143[A_{габ} - (A_{стен} + A_{кв} + A_{конд} + A_{подн}) - 0,2z_{пас}]. \quad (7.14)$$

Подставляя данные соответствующих площадей и число пассажиров в выражение (7.14), определяем число мест для сидения:

$$z_{сид} = 7,143[37,904 - (1,884 + 2,5 + 0,5 + 2,1) - 0,2 \cdot 140] = 20,858 \approx 21.$$

Таким образом, предложенные аналитические зависимости позволяют определить число мест для сидения при известной габаритной площади подвижного состава и его вместимости и в дальнейшем рассчитать полную массу, как номинальную, так и в часы пик. Расчеты показали, что полные массы рассматриваемого подвижного состава при номинальной загрузке: троллейбуса 19,85 т; трамвая 26,54 т, а в часы пик – троллейбуса 24,33 т; трамвая 31,87 т.

Выражения (7.13) и (7.14) позволяют решить и обратную задачу. Расставив требуемое число сидений в салоне подвижного состава при известной габаритной площади, можно определить число мест для проезда стоя, в том числе и в часы пик. Следовательно, можно будет определить номинальную массу подвижного состава и его массу в часы пик.

Определение нормальных нагрузок на ходовые части (развесовки) подвижного состава. Задача определения нагрузки на ходовую часть ПС сводится к уточнению принятых при решении планировочной задачи координат размещения ходовых частей под кузовом подвижного состава.

Развеску троллейбусов можно производить по критерию равенства статических нормальных нагрузок, передаваемых колесами на дорогу и условия одинакового использования их несущей способности.

При определении развесовки рельсового подвижного состава расчетным режимом является режим экстренного торможения нормально нагруженного вагона.

Исходными данными для определения развесовки подвижного состава являются:

- принятая планировка салона подвижного состава;
- условие равномерности распределения нагрузки от веса кузова G_k ;
- вес ходовых частей подвижного состава;
- вместимость пассажиров подвижного состава;
- величина замедления a_t , или тормозной путь S_t рельсового подвижного состава;
- величина допустимой статической нормальной нагрузки на мосты троллейбуса.

Согласно ГОСТ 7495–74 [2] нагрузка, приходящаяся на передний управляемый мост троллейбуса в часы пик, не должна превышать 36 % его общего веса и практически равна допустимой нагрузке на шины переднего моста. Нагрузка на задний мост должна быть не более максимально допустимой нагрузки на дорогу, равной 100 кН. Однако для автобусов и троллейбусов нагрузка на задний мост в обоснованных случаях может приниматься равной 130 кН. В соответствии с [1] на передний мост шарнирно сочлененного троллейбуса должно приходиться не более 20–22 % общего веса, на средний мост и мост полуприцепа – 39–40 %. Тормозной путь нормально нагруженного трам-

вайнного вагона в соответствии с ГОСТ 8802–69 [10] не должен при экстренном торможении со скорости 30 км/ч превышать 16 м.

Для троллейбусов решение задачи распределения веса сводится к определению размеров переднего l_1 и заднего l_2 свесов. При максимальной нагрузке (см. рисунок 10). Величина l_2 определяется из уравнения статического равновесия

$$G_k \cdot \frac{L_{\text{пс}}}{2} + \sum_{i=1}^n G_i \cdot l_i - (R_{z1} - G_{1M}) \cdot (l_1 + L) - (R_{z2} - G_{2M}) l_2 = 0,$$

откуда

$$l_2 = \frac{G_k \cdot \frac{L_{\text{пс}}}{2} + \sum_{i=1}^n G_i \cdot l_i - (K_1 \cdot G - G_{1M}) L}{G + \sum_{i=1}^n G_i},$$

где $R_{z1} + R_{z2} = G = G_k + G_{1M} + G_{2M} + \sum_{i=1}^n G_i$;

G_{1M} – вес переднего управляемого моста троллейбуса;

G_{2M} – вес ведущего моста троллейбуса;

G_i – i -я составляющая нагрузки от веса пассажиров;

l_i – координата центра масс нагрузки G_i .

При проектировании можно принимать $G_{1M} = 8,5$ кН и $G_{2M} = 16$ кН (за исключением мостов троллейбусов с двумя центральными редуторами).

Если $R_{z1\text{max}}/G > 36\%$, то необходимо изменить планировку пассажирского салона и добиться снижения R_{z1} до допустимой величины:

$$R_{z1} \leq R_{z1\text{max}} = \frac{G \left(\frac{L}{2} - l_2 \right) - \sum_{i=1}^n G_i \cdot (l_i - l_2)}{L} + G_{1M}.$$

Аналогично

$$C_2 = \frac{G_{\text{кгол}} \cdot \frac{L_{\text{гол}}}{2} + \sum_{i=1}^n G_{i\text{гол}} \cdot l_{i\text{гол}} - (K_1 \cdot G - G_{1T}) \cdot \frac{L_{\text{гол}}}{K_8}}{(K_1 + K_2) \cdot G - G_{1T} - G_{2T}},$$

где $G_{\text{кгол}}$ – вес кузова головной засти троллейбуса;

$G_{i\text{гол}}$ – составляющая нагрузки от веса пассажиров головной части троллейбуса;

$l_{i\text{гол}}$ – координата центра масс нагрузки $G_{i\text{гол}}$.

$$h_1 = \frac{K_\delta - 1}{K_\delta} \cdot L_{\text{гол}} - l_2.$$

Решение задачи развесовки шарнирно-сочлененного троллейбуса сводится к определению положения мостов, т. е. расстояний h_1 , h_2 и h_3 (рисунок 7.10).

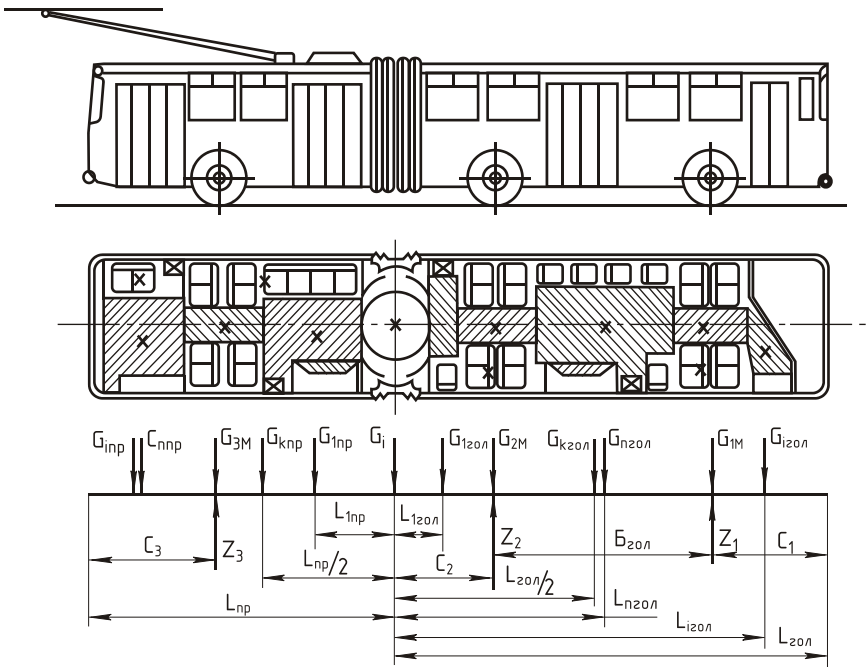


Рисунок 7.10 – Планировка салона и расчетная схема нагрузок сочлененного троллейбуса

Эти расстояния определяются из уравнений статического равновесия троллейбуса и полуприцепа. Для сочлененного троллейбуса величину заднего свеса полуприцепа можно определить по формуле

$$l_3 = L_{\text{пр}} \cdot \left[1 - \frac{G_{\text{мпр}} + 2 \cdot \sum_{i=1}^n G_{i\text{пр}} \cdot \frac{l_{i\text{пр}}}{L_{\text{пр}}}}{2 \cdot (K_3 \cdot G - G_{\text{м}})} \right],$$

где $G_{\text{мпр}}$ – вес моста полуприцепа;

$G_{i\text{пр}}$ – i -я составляющая нагрузки от веса пассажиров полуприцепа;

$l_{i\text{пр}}$ – координата центра тяжести нагрузки $G_{i\text{пр}}$;

$K_3 = R_{z3}/G = n_3/n$;

R_{z3} – нормальная реакция дороги на мост полуприцепа;

n_3 – количество ходовых колес полуприцепа.

Задачу развесовки рельсового подвижного состава решают по критерию максимального использования сцепного веса при экстренном торможении. В режиме торможения возникают инерционные силы, способствующие перераспределению нагрузок, передаваемых ходовыми частями вагона на путевую структуру. Пренебрегая влиянием инерционных сил тележки на перераспределение нагрузок между осями, величину l_2 четырехосного трамвая (рисунок 7.11) можно найти из условия равенства нагрузок, передаваемых тележками на рельсы в режиме экстренного торможения.

Из уравнения равновесного состояния подвижного состава

$$G_{\text{к}} \frac{L_{\text{пс}}}{2} + \sum_{i=1}^n G_i l_i + F_{\text{к}} \left(h_c + h_{\text{т}} + \frac{D_{\text{к}}}{2} \right) - (G - G_{\text{тел}})(2l_2 + L) = 0$$

следует

$$l_2 = \frac{G_{\text{к}} \frac{L_{\text{пс}}}{2} + \sum_{i=1}^n G_i l_i + F_{\text{к}} \left(h_c + h_{\text{т}} + \frac{D_{\text{к}}}{2} \right) - \left(\frac{G}{2} - G_{\text{тел}} \right) L}{(G_{\text{к}} + G_{\text{пас}})}, \quad (7.15)$$

где $F_{\text{к}} = m_{\text{к}} a_{\text{т}} = m_{\text{к}} \frac{v^2}{2L_{\text{т}}} (1 + \gamma) \cdot \frac{G_{\text{к}}}{g} \cdot \frac{v^2}{2L_{\text{т}}}$, Н;

$m_{\text{к}}$ – масса кузова;

$\gamma = 0,12$ – коэффициент инерции вращающихся масс;

$h_c = 0,8$ м – расстояние от центра тяжести кузова вагона до плоскости пятников;

$h_T = 0,4$ м – расстояние от плоскости пятников до оси колесной пары;

D_k – диаметр колеса;

G_k – вес кузова;

$G_{\text{тел}}$ – вес тележки.

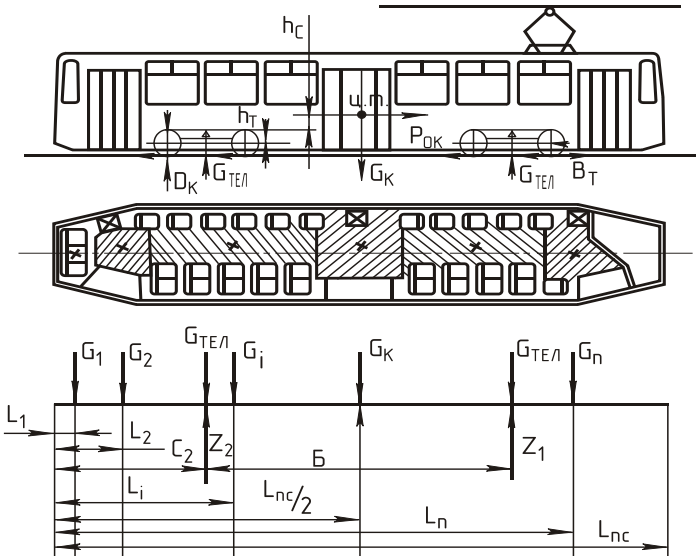


Рисунок 7.11 – Планировка салона и расчетная схема нагрузок четырехосного трамвайного вагона

Если величина l_2 , определенная по формуле (7.15), значительно отличается от той, которая была найдена по выражению (7.11), необходимо изменить ранее принятое расположение тележек. В том случае, если в кузове ПС предусмотрены две кабины водителя, расчетной формулой для определения величины заднего свеса l_2 является формула (7.11).

После определения нормальных нагрузок на тележки вагона необходимо проверить удельную нагрузку на один метр погонной длины рельсового пути:

$$\Delta G = \frac{G_{\max}}{L_{\text{псц}}}, \text{ кН/м},$$

где $G_{\max} = G_{\text{сн}} + G_{\text{пас.маx}}$ – вес подвижного состава при максимальном наполнении ($\alpha = 10 \text{ пас/м}^2$);

$L_{\text{псц}}$ – длина трамвайного вагона по осям сцепок.

Для вагонов трамвая $\Delta G \leq 20 \text{ кН/м}$; метро – $\Delta G \leq 30 \text{ кН/м}$.

7.4.6.2. Расчет требуемой мощности тягового электродвигателя

Основными эксплуатационными показателями подвижного состава, оказывающими влияние на выбор параметров системы тягового электропривода, являются полная (эксплуатационная) масса подвижного состава (m , кг), длительная мощность тягового электродвигателя ($P_{\text{дв.}\infty}$, кВт), число электродвигателей ($Z_{\text{дв}}$), номинальная (длительная) скорость (v_n , км/ч или м/с) и максимальная скорость ($v_{\text{маx}}$, км/ч или м/с). Перечисленные величины обычно указываются в техническом задании на проектирование подвижного состава, либо устанавливаются по результатам анализа транспортной работы подвижного состава на городских маршрутах, условий его эксплуатации и технико-экономических расчетов, либо подтверждаются опытом эксплуатации подобных или близких по назначению транспортных средств.

При выборе тягового электродвигателя решаются следующие вопросы:

- определение требуемой мощности тягового электродвигателя;
- выбор электродвигателя в соответствии с режимом его работы по условиям нагрузки;
- выбор электродвигателя по условиям пуска;
- выбор конструктивного исполнения электродвигателя в соответствии с условиями окружающей среды;
- определение передаточного числа трансмиссии подвижного состава.

В настоящее время используются несколько методов предварительного расчета требуемой мощности тягового электродвигателя при проектировании или модернизации подвижного состава:

- сравнением с существующими моделями;
- по заданной установившейся скорости движения и массе;
- метод эквивалентного тока.

При выполнении курсовой работы расчет максимальной требуемой мощности тягового электродвигателя рекомендуется выполнять по второму методу, используя формулы, разработанные на кафедре «Тракторы» БНТУ:

для троллейбуса

$$P_{\max} = \frac{V_{\max}}{3600\eta_{\text{тр}}z_{\text{дв}}} \left(\psi_{\text{д}} mg + \frac{k_{\text{в}} A_{\text{лоб}} v_{\max}^2}{3,6^2} \right), \text{ кВт}; \quad (7.16)$$

для трамвая

$$P_{\max} = \frac{V_{\max}}{3600\eta_{\text{тр}}z_{\text{дв}}} \left[(w + i) mg + \frac{k_{\text{в}} A_{\text{лоб}} v_{\max}^2}{3,6^2} \right], \text{ кВт}, \quad (7.17)$$

где v_{\max} – максимальная скорость движения, км/ч;

$\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии подвижного состава;

$z_{\text{дв}}$ – число тяговых двигателей;

$\psi_{\text{д}}$ – суммарное сопротивление дороги;

m – полная масса троллейбуса, кг (масса трамвая подставляется в формулу в т);

$k_{\text{в}}$ – коэффициент сопротивления воздуха;

$A_{\text{лоб}}$ – площадь лобового сопротивления подвижного состава, м²;

w – суммарное основное удельное сопротивление движению трамвая;

i – уклон рельсового пути, ‰.

Дадим несколько рекомендаций по установлению максимальной скорости движения подвижного состава. Так, правилами дорожного движения скорость транспортных средств в населенных пунктах ограничена 60 км/ч. Однако для лучшей приемистости городского подвижного состава максимальную скорость желательно принимать в пределах $v_{\max} = 62\text{--}65$ км/ч; для скоростного трамвая v_{\max} может достигать 75–80 км/ч и даже 100 км/ч. Следует также учитывать, что тяговый электродвигатель должен обеспечить подвижному составу с

номинальной нагрузкой не только заданную скорость, но и ускорение, которое даст ему возможность достижения этой скорости за определенное время. Нормируется время от момента включения тягового электродвигателя подвижного состава до скорости 50 км/ч (время разгона) на горизонтальном участке дороги и напряжении в контактной сети 550 В, которое должно быть не более 15–20 с, что соответствует среднему пусковому ускорению $a_{\text{пуск}} = 50/3,6/(15-20) = 0,9-0,7 \text{ м/с}^2$. Величины ускорений существенно влияют на скорость движения подвижного состава по перегону. Однако для обеспечения безопасности пассажиров и их комфорта пусковые ускорения не должны превышать 1,5–1,8 м/с^2 .

КПД трансмиссии можно принимать постоянным, не зависящим от режима движения подвижного состава и вычислять по формуле

$$\eta_{\text{тр}} = \eta_{\text{ц.н}}^{Z_{\text{ц.н}}} \eta_{\text{ц.в}}^{Z_{\text{ц.в}}} \eta_{\text{к}}^{Z_{\text{к}}} \eta_{\text{к.ш}}^{Z_{\text{к.ш}}},$$

где $\eta_{\text{ц.н}}$, $\eta_{\text{ц.в}}$, $\eta_{\text{к}}$ – КПД зубчатых передач соответственно цилиндрических с внешним и внутренним зацеплением и конических;

$Z_{\text{ц.н}}$, $Z_{\text{ц.в}}$, $Z_{\text{к}}$ – число пар соответствующих зубчатых зацеплений;

$\eta_{\text{к.ш}}$ – КПД карданного шарнира;

$Z_{\text{к.ш}}$ – число карданных шарниров.

Число зубчатых зацеплений и карданных шарниров определяют по кинематической схеме подвижного состава. В практике расчетов обычно принимают следующие значения КПД: $\eta_{\text{ц.н}} = 0,98$; $\eta_{\text{ц.в}} = 0,99$; $\eta_{\text{к}} = 0,97$; $\eta_{\text{к.ш}} = 0,995$.

Суммарное сопротивление дороги рассчитывается по формуле

$$\psi_{\text{д}} = f + \sin \alpha_{\text{д}} = f_0 + 7 \cdot 10^{-7} v^2 + \sin \alpha_{\text{д}},$$

где f_0 – коэффициент сопротивления движению при малой скорости; берется из прил. 2.

При расчетах по приведенным формулам рекомендуется принимать:

– сопротивление дороги $\psi_{\text{д}} = 0,025-0,04$;

– основное удельное сопротивление движению трамвая $W = 1,2-1,5 \text{ Н/кН}$;

– уклон рельсового пути $i = 30-40 \text{ ‰}$.

Площадь лобового сопротивления $A_{\text{лоб}}$ подвижного состава определяется как произведение его габаритных размеров (ширины кузова B_k на высоту H_k):

$$A_{\text{лоб}} = B_k H_k.$$

Рассчитанную мощность тягового электродвигателя рекомендуется сравнивать с мощностью электродвигателей подвижного состава аналогов. По итогам анализа делается заключение о правильности расчета мощности тягового электродвигателя и возможности его применения в проектируемом подвижном составе.

По определенной мощности P_{max} выбирается тяговый электродвигатель из числа выпускаемых промышленностью по мощности, близкой к расчетной, желательно наиболее высокооборотный (уменьшаются масса и габариты), но в то же время обеспечивающий приемлемое передаточное число трансмиссии $u_{\text{тр}}$, которое рассчитывается по условиям движения подвижного состава на максимальной скорости v_{max} , км/ч:

$$u_{\text{тр}} = \frac{0,377 r_p n_{\text{дв max}}}{v_{\text{max}}},$$

где r_p – расчетный радиус ведущего колеса;

$n_{\text{дв max}}$ – максимальная частота вращения тягового электродвигателя.

В троллейбусах применяются трансмиссии с передаточным числом $u_{\text{тр}} = 8-12$, в трамваях – $u_{\text{тр}} = 6-8$.

Для троллейбусов за расчетный радиус колеса в первом приближении можно принимать статический радиус $r_{\text{ст}}$ шины:

$$r_p \approx r_{\text{ст}} = r_c - h_{\text{ш}},$$

где r_c – свободный радиус шины;

$h_{\text{ш}}$ – деформация шины под нормальной нагрузкой на мост.

Диаметры колес трамвайных находятся в пределах 610–780 мм, вагонов метро 610–950 мм.

Таким образом, тяговый электродвигатель, мощность которого соответствует мощности, рассчитанной по формулам (7.16) и (7.17),

обеспечит движение подвижному составу в выбранных условиях эксплуатации как с максимальной скоростью при номинальном заполнении салона, так и с эксплуатационной скоростью, которая значительно меньше максимальной.

Пример 7.3

Определить требуемую мощность тягового электродвигателя для троллейбуса вместимостью $Z_{\text{пас}} = 110$ пассажиров, сочлененного троллейбуса на $Z_{\text{пас}} = 170$ пассажиров, трамвая на $Z_{\text{пас}} = 150$ пассажиров и сочлененного трамвая на $Z_{\text{пас}} = 300$ пассажиров.

Решение

Снаряженная масса этих машин была определена выше и составила: для троллейбуса 10,9 т; сочлененного троллейбуса 15,8 т; трамвая – 17,0 т; сочлененного трамвая – 30,9 т.

Полные массы машин при номинальной загрузке салона:

троллейбус $m = 10900 + 110 \cdot (70 + 5) + 2 \cdot 70 = 1,929 \cdot 10^4$ кг;

сочлененный троллейбус $m = 15800 + 170 \cdot (70 + 5) + 2 \cdot 70 = 2,869 \cdot 10^4$ кг;

трамвай $m = 17000 + 150 \cdot (70 + 5) + 2 \cdot 70 = 2,839 \cdot 10^4$ кг;

сочлененный трамвай $m = 30900 + 300 \cdot (70 + 5) + 3 \cdot 70 = 5,361 \cdot 10^4$ кг.

Для всех машин в соответствии с вышеназванными рекомендациями максимальную скорость принимаем $v_{\text{max}} = 62,5$ км/ч.

Для троллейбусов принимаем по одному тяговому электродвигателю $Z_{\text{дв}} = 1$, для трамвая выбираем четыре тяговых электродвигателя: $Z_{\text{дв}} = 4$, для сочлененного трамвая – шесть тяговых электродвигателей: $Z_{\text{дв}} = 6$.

КПД трансмиссий ПС рассчитываем в соответствии с их кинематическими схемами:

– троллейбус в трансмиссии имеет карданный вал с двумя шарнирами, коническую и цилиндрическую с наружным зацеплением зубчатые передачи, КПД трансмиссии $\eta_{\text{тр}} = 0,995^2 \cdot 0,97 \cdot 0,98 = 0,941$;

– сочлененный троллейбус в трансмиссии имеет те же детали и в том же количестве, что и одиночный. Следовательно, КПД его трансмиссии составит

$$\eta_{\text{тр}} = 0,995^2 \cdot 0,97 \cdot 0,98 = 0,941;$$

– трансмиссия трамвая имеет четыре редуктора, к которым крутящий момент передается через карданные валы с двумя шарнирами. Каждый редуктор трамвая содержит коническую и цилиндрическую с наружным зацеплением зубчатые передачи. Следовательно, КПД его редуктора с приводом составит

$$\eta_{\text{тр}} = 0,995^2 \cdot 0,97 \cdot 0,98 = 0,941;$$

– трансмиссия сочлененного трамвая содержит шесть редукторов, к которым крутящий момент передается от тягового электродвигателя карданными валами с двумя шарнирами. КПД его редуктора с приводом составит

$$\eta_{\text{тр}} = 0,995^2 \cdot 0,97 \cdot 0,98 = 0,941.$$

Троллейбусы двигаются по дорогам, имеющим суммарный коэффициент сопротивления $\psi_{\text{д}} = 0,040$. При движении по рельсовому пути, имеющему уклон $i = 35 \text{ ‰}$, удельное сопротивление для трамваев $w = 1,2 \text{ Н/кН}$.

Статистический анализ габаритных размеров троллейбусов и трамваев показывает, что они имеют площадь лобового сопротивления $A_{\text{лоб}} \approx 6,5 \text{ м}$. Причем для троллейбусов коэффициент сопротивления воздуха принимаем $k = 0,4 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$, а для трамваев – $k = 0,25 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$.

Рассчитываем требуемую мощность тяговых электродвигателей по формулам (7.16) и (7.17):

троллейбус

$$P_{\text{max}} = \frac{62,5}{3600 \cdot 0,941 \cdot 1} \left(0,040 \cdot 1,929 \cdot 10^4 \cdot 9,81 + \frac{0,4 \cdot 6,5 \cdot 62,5^2}{3,6^2} \right) = 154,111 \approx 154 \text{ кВт};$$

сочлененный троллейбус

$$P_{\text{max}} = \frac{62,5}{3600 \cdot 0,941 \cdot 1} \left(0,040 \cdot 2,869 \cdot 10^4 \cdot 9,81 + \frac{0,4 \cdot 6,5 \cdot 62,5^2}{3,6^2} \right) = 222,164 \approx 222 \text{ кВт};$$

трамвай (мощность одного электродвигателя)

$$P_{\max} = \frac{62,5}{3600 \cdot 0,941 \cdot 4} \left((1,2 + 35) \cdot 28,39 \cdot 9,81 + \frac{0,25 \cdot 6,5 \cdot 62,5^2}{3,6^2} \right) = 48,761 \approx 50 \text{ кВт};$$

сочлененный трамвай (мощность одного электродвигателя)

$$P_{\max} = \frac{62,5}{3600 \cdot 0,941 \cdot 6} \left((1,2 + 35) \cdot 53,61 \cdot 9,81 + \frac{0,25 \cdot 6,5 \cdot 62,5^2}{3,6^2} \right) = 60,047 \approx 60 \text{ кВт}.$$

Требуемую мощность тягового электродвигателя также можно определить, воспользовавшись понятием удельной мощности (мощность, приходящаяся на килограмм снаряженной массы):

для троллейбуса удельная мощность составляет $P_{\text{уд}} = 0,0145 \text{ кВт/кг}$;

для трамвая $P_{\text{уд}} = 0,0115 \text{ кВт/кг}$.

Тогда для троллейбуса

$$P_{\text{дв}} = 0,0145 \cdot 10900 = 158,05 \approx 158 \text{ кВт};$$

для сочлененного троллейбуса

$$P_{\text{дв}} = 0,0145 \cdot 15800 = 229,1 \approx 229 \text{ кВт};$$

для трамвая

$$P_{\text{дв}} = 0,0115 \cdot 17000/4 = 48,875 \approx 49 \text{ кВт};$$

сочлененного трамвая

$$P_{\text{дв}} = 0,0115 \cdot 30900/6 = 59,225 \approx 59 \text{ кВт}.$$

Как видно из расчетов по формулам (7.16) и (7.17) и использования удельной мощности, результаты определения потребной мощности тяговых электродвигателей имеют хорошее совпадение. Расхождение не превышает 3 %.

По каталогу тяговых электродвигателей выбирается электродвигатель, мощность которого близка к рассчитанной (необязательно брать электродвигатель большей мощности). Однако из электродвигателей примерно равной мощности следует выбирать такой, который имеет максимальные обороты якоря в пределах 3500–4000 об/мин.

После выбора тягового электродвигателя приступают к подбору шин для троллейбусов. Для этого необходимо определить полную массу троллейбуса в часы пик, а затем нагрузки на колеса при резком разгоне ($a = 2 \text{ м/с}^2$) и экстренном торможении ($a_{\text{зам max}} = \varphi \cdot g$). Для решения этой задачи воспользуемся упрощенным методом, который дает хорошие результаты при подборе шин.

База троллейбуса $L = 6 \text{ м}$, высота центра масс над дорогой $h_c = 1,5 \text{ м}$, коэффициент сцепления $\varphi = 0,75$.

Полная масса двухосного троллейбуса на 110 пассажиров при номинальной загрузке салона пассажирами

$$\begin{aligned} m_{\text{н}} &= m_{\text{сн}} + m_{\text{пас}} \cdot (z_{\text{пас}} + 2) + m_{\text{баг}} \cdot z_{\text{пас}} = \\ &= 10900 + 70 \cdot (110 + 2) + 5 \cdot 110 = 1,943 \cdot 10^4 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Задний мост троллейбуса имеет сдвоенные колеса, т. е. всего на троллейбусе установлено шесть колес. Считая распределение нагрузки по колесам равномерным, определим нормальную нагрузку на одно колесо:

$$G_{\text{к.н}} = 1,943 \cdot 10^4 \cdot 9,81 / 6 = 3,177 \cdot 10^4 \text{ Н} = 32 \text{ кН}.$$

При экстренном торможении наибольшее замедление, которое может развить троллейбус:

$$a_{\text{зам max}} = \varphi \cdot g = 0,75 \cdot 9,81 = 7,36 \text{ м/с}^2.$$

Сила инерции при экстренном торможении троллейбуса с номинальной загрузкой салона равна $F_{j\text{н}} = m_{\text{н}} \cdot a_{\text{зам max}} = 1,943 \cdot 10^4 \cdot 7,36 = 1,43 \cdot 10^5 \text{ Н}$. При этом нагрузка на одно переднее колесо составит

$$\begin{aligned} G_{\text{к.н}}^{\text{торм}} &= \frac{b \cdot G_{\text{н}} + h_c \cdot F_{j\text{н}}}{2 \cdot L} = \frac{2 \cdot 1,929 \cdot 10^4 \cdot 9,81 + 1,5 \cdot 1,42 \cdot 10^5}{2 \cdot 6} = \\ &= 4,41 \cdot 10^4 \approx 50 \text{ кН}. \end{aligned}$$

Теперь определим полную массу двухосного троллейбуса в часы пик. Как указывалось выше, обычно число мест для сидения составляет 25–30 % от пассажироместимости подвижного состава. Для расчета примем, что число мест для сидения составляет 30 % от пассажироместимости троллейбуса, т. е. оно равно $Z_{\text{пас.сид}} = 0,3 \cdot 110 = 33$ чел. Число мест для проезда стоя равно $Z_{\text{пас.ст}} = 110 - 33 = 77$ чел. При этом полезная площадь составит $A_{\text{пол}} = 77/5 = 15,4 \text{ м}^2$. В часы пик на этой площади разместятся $Z_{\text{пас.ст}} = 15,4 \cdot 8 = 123,2 \approx 123$ чел. Кроме того, примем, что в часы пик не все пассажиры имеют багаж, а только 50 %. Тогда полная масса троллейбуса в часы пик составит:

$$m_{\text{max}} = m_{\text{сн}} + m_{\text{пас}} \cdot (Z_{\text{пас.сид}} + Z_{\text{пас.ст}} + 2) + m_{\text{баг}} \cdot 0,5 \cdot (Z_{\text{пас.сид}} + Z_{\text{пас.ст}}) = \\ 10900 + 70 \cdot (28 + 123 + 2) + 5 \cdot 0,5 \cdot (28 + 123) = 2,199 \cdot 10^4 = 22000 \text{ кг}.$$

Максимальная нагрузка на одно колесо

$$G_{\text{к. max}} = m_{\text{max}} \cdot g / n_{\text{к}} = 22000 \cdot 9,81 / 6 = 3,597 \cdot 10^4 \text{ Н} \approx 36,0 \text{ кН},$$

где $n_{\text{к}}$ – число колес).

На передний мост приходится максимальная нагрузка

$$G_{1\text{max}} = 2 \cdot G_{\text{к. max}} = 2 \cdot 36,0 = 72,0 \text{ кН};$$

на задний мост

$$G_{2\text{max}} = 4 \cdot G_{\text{к. max}} = 4 \cdot 36,0 = 144 \text{ кН}.$$

Координаты центра масс: расстояния от центра масс до осей передних a и задних b колес:

$$a = \frac{G_{2\text{max}}}{G_{\text{max}}} L = \frac{144}{22 \cdot 9,81} \cdot 6 = 4,003 \approx 4 \text{ м};$$

$$b = \frac{G_{1\text{max}}}{G_{\text{max}}} L = \frac{72}{22 \cdot 9,81} \cdot 6 = 2,002 \approx 2 \text{ м}.$$

Сила инерции при экстренном торможении в часы пик

$$F_{j\text{max}} = m_{\text{max}} \cdot a_{\text{т. max}} = 2,2 \cdot 10^4 \cdot 7,36 = 1,619 \cdot 10^5 \text{ Н}.$$

При этом нагрузка на одно переднее колесо составит

$$G_{к.маx}^{торм} = \frac{b \cdot G_{маx} + h_c \cdot F_{jмаx}}{2 \cdot L} = \frac{2 \cdot 2,2 \cdot 10^4 \cdot 9,81 + 1,5 \cdot 1,619 \cdot 10^5}{2 \cdot 6} =$$

$$= 5,621 \cdot 10^4 \approx 56 \text{ кН.}$$

Нормальные нагрузки на одно колесо заднего моста при интенсивном разгоне

$$G_{к.маx}^{разг} = \frac{a \cdot G + h_c F_j}{4 \cdot L} = \frac{4 \cdot 2,2 \cdot 10^4 \cdot 9,81 + 1,5 \cdot 2,2 \cdot 10^4 \cdot 2}{4 \cdot 6} =$$

$$= 3,872 \cdot 10^4 \approx 39 \text{ кН.}$$

Выполненные расчеты показали, что при экстренном торможении нормальная нагрузка на колесо больше, чем при интенсивном разгоне. Поэтому шины подбираем по максимальной нормальной нагрузке на колесо $G_k = 56$ кН. По каталогу ОАО «Белшина» выбираем шины 11,00R20, максимальная нагрузка на шину $G_{к.маx} = 33,5$ кН при давлении воздуха в ней $p_v = 0,82$ МПа.

При аварийном торможении в часы пик нагрузка на шину будет превышать максимальную в $56/33,5 = 1,7$ раза, в статическом состоянии (установившееся движение) троллейбуса – в $36/33,5 = 1,1$ раза. Следовательно, в часы пик требуется вести троллейбус очень аккуратно, избегая резких торможений и разгона. При номинальной нагрузке салона пассажирами действующие нормальные нагрузки на шины не превышают допустимых.

Выполненные аналогичные расчеты для сочлененного троллейбуса показали, что для него также могут быть применены шины 11,00R20 ОАО «Белшина», которые в часы пик несколько перегружены.

Для троллейбусов были выбраны тяговые электродвигатели, имеющие максимальные обороты якоря $n_{я.маx} = 3900$ об/мин. Чтобы определить передаточное число трансмиссии, обеспечивающее движение троллейбуса с заданной скоростью $v = 62,5$ км/ч, необходимо знать расчетный радиус ведущих колес. В качестве расчетного радиуса можно принимать, как указывалось выше, статический радиус колеса. Так как в каталоге шин ОАО «Белшина» для выбранной

шины даны только свободный диаметр шины $D_c = 1082$ мм и ширина профиля шины $B_{ш} = 286$ мм, то статический радиус колеса рассчитаем по формуле

$$r_{ст} = \frac{D_c}{2} - h_{ш},$$

где D_c – свободный диаметр шины;

$h_{ш}$ – деформация шины.

Деформацию шины определим по формуле Хейдекеля:

$$h_{ш} = \frac{G_k}{2 \cdot \pi \cdot p_v \cdot \sqrt{r_c \cdot r_{сеч}}},$$

где G_k – нормальная нагрузка на шину;

p_v – давление воздуха в шине;

r_c – свободный радиус шины;

$r_{сеч}$ – радиус сечения шины.

Свободный радиус шины равен половине ее свободного диаметра:

$$r_c = 1,082/2 = 0,541 \text{ м.}$$

Из обозначения выбранной шины видно, что это тороидальная шина, т. е. радиус сечения шины равен половине ширины профиля шины:

$$B_{ш} = 0,286/2 = 0,143 \text{ м.}$$

Тогда при номинальной нагрузке на колесо шина прогнется на

$$h_{ш} = \frac{32000}{2 \cdot \pi \cdot 0,82 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{0,541 \cdot 0,143}} = 2,234 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Статический радиус шины при номинальной загрузке салона

$$r_{ст} = 0,541 - 2,234 \cdot 10^{-4} = 0,52 \text{ м.}$$

Передаточное число трансмиссии:

$$u_{\text{тр}} = \frac{0,377 \cdot 0,52 \cdot 3900}{62,5} = 12,201.$$

Определим максимальные массы четырехосного и сочлененного трамваев, снаряженные массы которых были рассчитаны выше и составили $m_{\text{сн}} = 17$ т для четырехосного и $m_{\text{сн}} = 30,9$ т – для сочлененного трамвая. Примем, что число мест для проезда сидя в трамваях составляет 30 % от пассажироместимости, т. е. для четырехосного трамвая

$$Z_{\text{пас.сид}} = 0,3 \cdot 150 = 45 \text{ человек}$$

(число мест для проезда стоя $Z_{\text{пас.ст}} = 150 - 45 = 105$), для сочлененного трамвая

$$Z_{\text{сид}} = 0,3 \cdot 300 = 90 \text{ человек}$$

(число мест для проезда стоя $Z_{\text{пас.ст}} = 300 - 90 = 210$).

Площадь салона четырехосного трамвая для проезда стоя

$$A_{\text{пас.ст}} = 105/5 = 21 \text{ м}^2,$$

сочлененного трамвая

$$A_{\text{пас.ст}} = 210/5 = 42 \text{ м}^2.$$

В часы пик на этих площадях разместятся:
в четырехосном трамвае

$$Z_{\text{пас.ст.макс}} = 21 \cdot 8 = 168 \text{ пассажиров,}$$

в сочлененном трамвае

$$Z_{\text{пас.ст.макс}} = 42 \cdot 8 = 336 \text{ пассажиров.}$$

В часы пик масса четырехосного трамвая составит

$$m_{\text{макс}} = m_{\text{сн}} + m_{\text{пас}} \cdot (Z_{\text{пас.сид}} + Z_{\text{пас.ст}} + 2) + m_{\text{баг}} \cdot (Z_{\text{пас.сид}} + Z_{\text{пас.ст}}) = \\ = 17000 + 70 \cdot (45 + 168) + 5 \cdot (45 + 168) = 3,297 \cdot 10^4 \text{ кг};$$

сочлененного трамвая

$$m_{\max} = m_{\text{сн}} + m_{\text{пас}} \cdot (z_{\text{пас.сид}} + z_{\text{пас.ст}} + 2) + m_{\text{баг}} \cdot (z_{\text{пас.сид}} + z_{\text{пас.ст}}) = \\ = 30900 + 70 \cdot (90 + 336) + 5 \cdot (90 + 336) = 6,285 \cdot 10^4 \text{ кг};$$

Проверим удельную нагрузку на погонной длине один метр рельсового пути, учитывая, что длина по сцепке четыреххосного трамвая равна $l_{\text{сц}} = 15,5$ м, а длина по сцепке сочлененного трамвая – 31 м: удельная нагрузка для четыреххосного трамвая

$$\Delta G = \frac{G_{\max}}{l_{\text{сц}}} = \frac{32,97 \cdot 9,81}{15,5} = 20,867 \text{ кН/м};$$

удельная нагрузка для сочлененного трамвая

$$\Delta G = \frac{G_{\max}}{l_{\text{сц}}} = \frac{62,85 \cdot 9,81}{31} = 19,889 \text{ кН/м}.$$

Выполненные расчеты показали превышение удельной нагрузки на один метр погонной длины рельсового пути в часы пик для четыреххосного трамвая в 1,043 раза. Сочлененный трамвай укладывается в допустимые пределы удельной нагрузки на один метр погонной длины рельсового пути $\Delta G_{\text{доп}} \leq 20$ кН/м.

Для трамваев были выбраны тяговые электродвигатели с максимальными оборотами якоря $n_{\text{я.макс}} = 4050$ об/мин и низкопольные тележки с диаметром колес $D = 610$ мм или расчетным радиусом колеса $r_p = D/2 = 0,61/2 = 0,305$ м.

Передаточное число редуктора (трансмиссии)

$$u_{\text{тр}} = \frac{0,377 \cdot 0,305 \cdot 4050}{62,5} = 7,451.$$

Таким образом, в результате расчетов для двуххосного и сочлененного троллейбусов, а также для четыреххосного и сочлененного трамваев были определены их снаряженные массы, массы в часы пик, нагрузки на шины и тележки, выбраны шины ОАО «Белшины» для троллейбусов и диаметры колес для трамваев, рассчитаны передаточные числа трансмиссии, обеспечивающие движение исследуе-

мых машин с заданной скоростью $v = 62,5$ км/ч. Кроме того, расчеты показали некоторую перегруженность шин передних мостов троллейбусов с максимальной загрузкой салонов при резком торможении в 1,7 раза. Удельная нагрузка на один метр погонной длины рельсового пути в часы пик для четырехосного трамвая превышает допустимую в 1,043 раза.

7.4.6.3. Расчет тепловых параметров тягового электродвигателя

Нормы температуры для тяговых электродвигателей. Работа электрических машин всегда сопровождается их нагревом, который зависит от величины тока (нагрузки), времени работы под нагрузкой и интенсивности охлаждения. От величины и продолжительности нагрева зависит срок службы изоляции. Рассчитывая и оценивая нагрев тягового электродвигателя, обычно используют не температуру электродвигателя или его частей, а величину превышения этой температуры над температурой окружающей среды. Предельно допустимое значение температуры обмоток тягового электродвигателя, которые обычно лимитируют нагревание, устанавливается в зависимости от класса изоляции. В таблице 7.1 приведены наибольшие значения температуры **Ошибка! Закладка не определена.** различных частей электрических машин (ГОСТ 2582–81).

Таблица 7.1 – Допустимые нормы превышения температуры электрических машин

Части электрической машины	Метод испытаний	Допустимые предельные превышения температуры, °С, для изоляции класса			
		Е	В	F	Н
Обмотка якоря	Метод сопротивления	105	120	140	160
Обмотки возбуждения	Метод сопротивления	115	130	155	180
Коллектор	Метод температур	95	95	95	105

Допустимые нормы превышения температуры электродвигателей устанавливаются в зависимости от их мощности (ГОСТ 2582–81) и для определенной мощности тягового электродвигателя гарантируют

механическую прочность и надежность коммутации. Поэтому если тяговый электродвигатель при работе подвижного состава на линии не перегружается, т. е. не нагревается выше установленной нормами температуры (см. таблицу 7.1), то выбранный электродвигатель должен работать удовлетворительно. По нормативам тяговый электродвигатель характеризуется продолжительной и часовой мощностью.

Продолжительной мощностью электродвигателя называется та мощность на валу, при которой электродвигатель может длительно работать на неподвижной установке при нормально закрытых люках без перегрева каких-либо его частей выше установленных норм.

Продолжительный ток электродвигателя – это ток, соответствующий его продолжительной мощности.

Часовой мощностью электродвигателя называется та наибольшая мощность на валу, при которой электродвигатель может работать на неподвижной установке при нормально закрытых люках в течение одного часа без перегрева каких-либо его частей выше установленных норм.

Часовой ток электродвигателя – это ток, соответствующий его часовой мощности.

Кроме понятия продолжительного и часового токов при расчете тепловых параметров тягового электродвигателя для изменяющегося во времени тока применяют три эквивалента:

- средний ток;
- средний квадратичный ток;
- эквивалентный по превышению температуры ток.

Средний ток $I_{\text{ср}}$ – это неизменный ток, при котором через обмотки электродвигателя за рассматриваемый промежуток времени $t_{\text{в}}$ пройдет такое же количество электричества, как и при изменяющемся токе:

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{t_{\text{в}}} \int_0^{t_{\text{в}}} i dt.$$

Средний квадратичный ток $I_{\text{ср.кв}}$ – это неизменный ток, который за рассматриваемый промежуток времени $t_{\text{в}}$ образует в обмотках электродвигателя такое же количество теплоты, как и данный изменяющийся ток. Этот ток часто называют *эквивалентным током по теплоте*:

$$I_{\text{ср.кв}} = I_{\text{э.т}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{в}}} \int_0^{t_{\text{в}}} i^2 dt} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}}$$

Эквивалентный по превышению температуры ток $I_{\text{э.п}}$ – это неизменный ток, который вызовет установившееся превышение температуры обмоток электродвигателя, равное максимальному превышению температуры от действия изменяющегося тока в рассматриваемом промежутке времени $t_{\text{в}}$.

При использовании автоматических выключателей в цепи тягового электродвигателя возникает вопрос, на какой ток должны быть отрегулированы автоматы. Это приводит к необходимости установления максимальной перегрузки (наибольшей мощности) тягового электродвигателя, которую он может отдать в течение короткого промежутка времени без механической деформации и появления кругового огня. Нормами устанавливаются испытания тягового электродвигателя в течение 60 секунд током, равным удвоенному значению часового тока. Следовательно, при тяговых расчетах максимальная (пиковая) сила тока при трогании подвижного состава на наибольшем подъеме не должна превышать удвоенного значения часового тока.

Для электродвигателей переменного тока допустимые превышения температур неподвижных обмоток принимаются те же, что и для обмоток возбуждения (см. таблицу 7.1), а для вращающихся обмоток – те же, что и для обмоток якоря. Превышение температуры контактных колец над температурой окружающей среды допускается не более 105 °С.

Определение перегрева тягового электродвигателя за достаточно продолжительное время работы подвижного состава на линии составляет предмет теплового расчета электродвигателя. Расчет нагрева тягового электродвигателя – достаточно важная задача. Ее решение в значительной степени зависит от особенностей конструкции и характеристик конкретного электродвигателя. На практике рассчитывают нагрев не всего электродвигателя, а проверяют наиболее опасные по нагреву его части – обмотки. При этом делается допущение, что нагрев обмоток соответствует закону нагрева однородного тела.

В результате теплового расчета может быть установлен лишь **перегрев, но не абсолютная температура**, так как тепловой режим

тягового электродвигателя определяется разностью температур электрической машины и окружающей среды. Перегревы устанавливаются нормами, исходя из температуры окружающей среды 25 °С. Так как перегрев по нормам для обмоток самовентилируемого электродвигателя с изоляцией класса В при длительном режиме работы установлен 85 °С (при измерении по термометру), то обмотки электродвигателя выдерживают абсолютную температуру не более 110 °С. При температурах выше 110 °С изоляция начинает портиться и двигатель может выйти из строя. В случае когда температура в городе бывает выше 25 °С, перегрев тягового электродвигателя должен быть меньше, чем предусмотрено нормами, т. е.

$$\tau = 110^{\circ} - \tau_0,$$

где τ – перегрев электродвигателя в градусах;

τ_0 – температура окружающего воздуха.

Отсюда следует, что при температуре воздуха ниже 25 °С, например, зимой, можно допустить перегрев электродвигателя выше нормативного значения.

Тяговые электродвигатели изготавливаются серийно, определенных типов и мощностей. Поэтому для проектируемого подвижного состава и заданных условий эксплуатации тяговый электродвигатель приходится выбирать из числа типовых электродвигателей с последующей их проверкой на нагрев. Так как подробные проверочные расчеты на нагрев довольно сложны, то во избежание повторных расчетов предварительный выбор тягового электродвигателя необходимо делать максимально обоснованно.

Расчет электродвигателя на нагрев производят, исходя из уравнения теплового баланса

$$\Delta P dt = A \tau dt + C dt,$$

где ΔP – суммарные потери мощности в электродвигателе, Вт;

A – коэффициент теплоотдачи электродвигателя (количество тепла, отдаваемого электродвигателем в окружающую среду за 1 с при разности температур электродвигателя и окружающей среды 1 °С), Дж/с °С;

τ – превышение температуры электродвигателя относительно температуры окружающей среды, °С;

C – теплоемкость электродвигателя (количество тепла, необходимое для нагрева электродвигателя на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$), Дж/с $^{\circ}\text{C}$.

Решение этого дифференциального уравнения при $\Delta P = \text{const}$ в режиме тяги имеет вид

$$\tau = (\tau_{\text{нач}} - \tau_{\text{уст}}) e^{-\frac{1}{T_{\text{H}}}} + \tau_{\text{уст}},$$

где $\tau_{\text{нач}}$ – начальное превышение температуры электродвигателя над температурой окружающей среды;

$\tau_{\text{уст}} = \frac{\Delta P}{A}$ – установившееся превышение температуры электродвигателя;

$T_{\text{H}} = \frac{C}{A}$ – постоянная времени нагрева электродвигателя, с.

При $\tau_{\text{нач}} = 0$ уравнение принимает вид

$$\tau = \tau_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{1}{T_{\text{H}}}} \right),$$

а при охлаждении от температуры $\tau_{\text{нач}}$ до температуры окружающей среды $\tau_{\text{уст}} = 0$ (рисунок 7.12)

$$\tau = \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{1}{T_{\text{H}}}}.$$

Наибольшее значение температуры перегрева $t_{\text{p,max}}$, полученное при расчете, приводится к температуре наружного воздуха, принятой для расчета:

$$t_{\text{p}} = t_{\text{p,max}} k_{\text{сз}} k_{\text{нв}},$$

где $k_{\text{сз}}$ – коэффициент, учитывающий снижение расхода воздуха на охлаждение электродвигателя при постановке фильтров (для зимних условий $k_{\text{сз}} = 1,1$, для летних $k_{\text{сз}} = 1,0$);

$k_{\text{нв}}$ – коэффициент приведения превышения температуры обмоток электродвигателя к расчетной температуре окружающего воздуха

духа (значения $k_{сз}$ принимают по таблице 7.2 в зависимости от температуры окружающей среды).

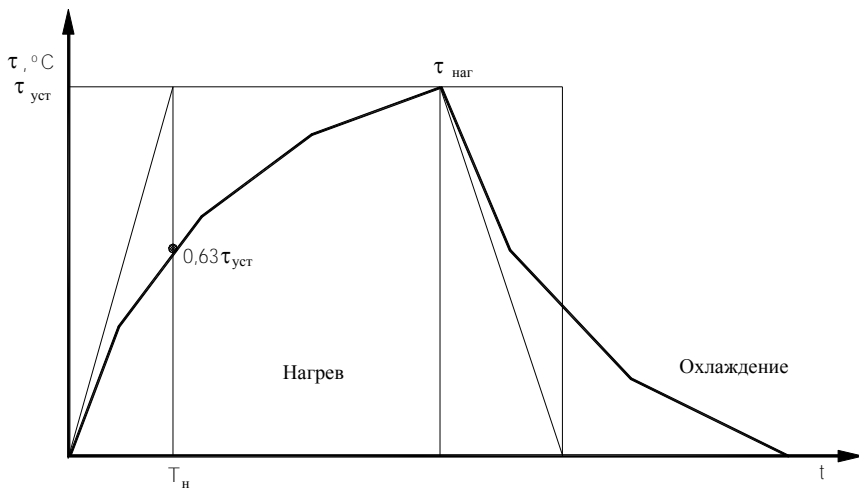


Рисунок 7.12 – График изменения температуры электродвигателя при нагреве и охлаждении

Таблица 7.2 – Значение коэффициента $k_{нв}$

Обмотки	Коэффициент $k_{нв}$ для температуры наружного воздуха, °С							
	0	5	10	15	20	25	30	35
Полусов	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04
Якоря	0,94	0,95	0,96	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02

Выполнение условия $\tau_{\max} \leq \tau_{\text{доп}}$ может проверяться прямым или косвенным методом. Однако практическое применение прямого метода весьма трудоемко. Из косвенных методов широкое применение нашли метод эквивалентного тока, метод эквивалентного момента и метод эквивалентной мощности.

Метод эквивалентного тока. Потери в электродвигателях примерно пропорциональны квадрату тока, протекающему в обмотках двигателя. Зная график изменения тока, протекающего по обмоткам электродвигателя, можно для каждого конкретного режима работы определить значение эквивалентного тока I_s , характеризующее его нагрев.

Условие нормальной работы электродвигателя по нагреву

$$I_3 \leq I_{\text{ном}}. \quad (7.18)$$

Условие (7.18) справедливо, если постоянные потери ΔP_c за время цикла не изменяются, а также выполняются условия, необходимые при применении метода средних потерь. Пригодность тягового электродвигателя по току можно также определить, воспользовавшись соотношениями:

$$I_3^2 \leq \frac{I_\infty^2}{k_B k_H k_3} \quad \text{или} \quad I_3 \leq \frac{I_\infty}{k_3},$$

где I_∞ – ток продолжительного режима;

$$k_3 = \sqrt{k_B k_H k_3} = 1,1-1,2.$$

Метод эквивалентного момента. Этот метод применим для электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением, асинхронных электродвигателей и других электродвигателей, когда крутящий момент электродвигателя пропорционален току.

Эквивалентный момент – это такой постоянный крутящий момент, который вызывает такой же нагрев электродвигателя, как и реально изменяющийся крутящий момент электродвигателя:

$$M_3 = \sqrt{\frac{1}{t_B} \int_0^{t_B} M^2(t) dt} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}}.$$

Условие правильности выбора электродвигателя $M_3 \leq M_n$.

Метод эквивалентной мощности. Если угловая скорость якоря электродвигателя в процессе его работы изменяется незначительно и можно считать, что $P = M\omega$ и $M = P/\omega$, то эквивалентная мощность

$$P_3 = \sqrt{\frac{1}{t_B} \int_0^{t_B} P^2(t) dt} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}}$$

Условие правильности выбора электродвигателя по мощности $P_3 \leq P_n$.

Таким образом, тяговый электродвигатель для проектируемого подвижного состава подбирается по требуемой мощности, а затем проверяется на нагрев с учетом длительного тока, протекающего по его обмоткам.

Пример 7.4

Тяговый электродвигатель постоянного тока имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 185$ кВт; номинальное число оборотов $n_{\text{ном}} 2100$ об/мин; номинальный ток $I_{\text{ном}} = 74$ А; номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 550$ В; КПД электродвигателя при номинальном режиме $\eta_{\text{ном}} = 90\%$.

Оценить тепловой режим электродвигателя при движении троллейбуса по маршруту, состоящему из трех участков. Каждый участок имеет следующие характеристики: время движения по первому участку $t_1 = 12$ мин, крутящий момент на валу электродвигателя $M_{д1} = 680$ Н·м; время движения по второму участку $t_2 = 25$ мин, крутящий момент на валу электродвигателя $M_{д2} = 825$ Н·м; время движения по третьему участку $t_3 = 18$ мин, крутящий момент на валу электродвигателя $M_{д3} = 795$ Н·м. Ток возбуждения и сопротивление якорной цепи не изменяются. За время нахождения троллейбуса на остановках его электродвигатель практически не охлаждается.

Заданный цикл работы электродвигателя относится к продолжительному режиму с переменной нагрузкой. Так как ток возбуждения и сопротивление цепи якоря не изменяются, а за время остановок электродвигатель не охлаждается, то для проверки электродвигателя по нагреву можно воспользоваться методом эквивалентного момента.

Решение

1. Угловая скорость якоря электродвигателя и его крутящий момент при работе на номинальном режиме:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \pi n_{\text{НОМ}} / 30 = \pi \cdot 2100 / 30 = 219,911 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \omega_{\text{НОМ}} = 185 \cdot 10^3 / 219,911 = 841,249 \approx 841 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. По формуле (7.19) рассчитываем эквивалентный момент:

$$M_3 = \sqrt{\frac{1}{t_B} \int_0^{t_B} M^2(t) dt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} =$$

$$= \sqrt{\frac{680^2 \cdot 12 + 825^2 \cdot 25 + 795^2 \cdot 18}{12 + 25 + 18}} = 785,561 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

3. Сопоставляя рассчитанный эквивалентный момент $M_3 = 786 \text{ Н} \cdot \text{м}$ с номинальным моментом электродвигателя $M_{\text{НОМ}} = 841 \text{ Н} \cdot \text{м}$, видим, что эквивалентный момент меньше номинального $M_3 < M_{\text{НОМ}}$, т. е. электродвигатель не будет перегреваться выше допустимого уровня.

Пример 7.5

Асинхронный тяговый электродвигатель троллейбуса имеет номинальную мощность $P_{\text{НОМ}} = 180 \text{ кВт}$ при $\text{ПВ}_{\text{НОМ}} = 25 \%$ (ПВ – относительная продолжительность включения электродвигателя):

$$\text{ПВ} = 100 \cdot t_p / t_p + t_o,$$

здесь t_p – цикл (время) работы электродвигателя под нагрузкой;

t_o – цикл (время) отключения электродвигателя)

и номинальное число оборотов якоря $n_{\text{НОМ}} = 1980 \text{ об/мин}$.

Оценить нагрев электродвигателя, если водитель, используя инерцию троллейбуса, периодически включает электродвигатель на 5 мин, после чего отключает его на 3 мин. В режиме тяги электродвигатель развивает крутящий момент $M_d = 837,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Решение

1. Данный цикл относится к повторно кратковременному режиму. Угловая скорость якоря электродвигателя и его крутящий момент при работе на номинальном режиме при $P_{\text{НОМ}}$:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \pi n_{\text{НОМ}} / 30 = \pi \cdot 1980 / 30 = 207,24 \text{ рад/с} ;$$

$$M_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \omega_{\text{НОМ}} = 180 \cdot 10^3 / 207,240 = 868,558 \approx 868 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Продолжительность включения электродвигателя в цикле ПВ:

$$\text{ПВ} = \frac{100 \cdot t_p}{t_p + t_0} = \frac{100 \cdot 5}{5 + 3} = 62,5 \% .$$

3. Эквивалентный крутящий момент электродвигателя при стандартной $\text{ПВ}_{\text{НОМ}} = 25 \%$:

$$M_3 = M_{\text{д}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{НОМ}}}} = 837,5 \cdot \sqrt{\frac{62,5}{25}} = 1,324 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

4. Сравниваем приведенные к одной $\text{ПВ}_{\text{НОМ}} = 25 \%$ крутящие моменты эквивалентный $M_3 = 1,324 \text{ кН} \cdot \text{м}$ и номинальный $M_{\text{НОМ}} = 868 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Так как $M_3 > M_{\text{НОМ}}$, то тяговый электродвигатель в таком цикле будет перегреваться сверх допустимого уровня.

7.4.6.4. Расчет и построение характеристик тягового электродвигателя

На подвижном составе городского электрического транспорта применяются тяговые электродвигатели постоянного и переменного тока. В процессе работы тягового электродвигателя происходит однозначное взаимное изменение его параметров: напряжения, электродвижущей силы и тока. Соотношения его параметров, представленные в табличной или графической форме, являются *характеристиками тягового электродвигателя*. В электрической тяге используются три основные зависимости, рассчитанные при проектировании и отнесенные к валу тягового электродвигателя:

$n(l)$ – частоты вращения якоря от его тока при заданном напряжении питания тягового электродвигателя;

$M(l)$ – крутящий момент тягового электродвигателя от тока якоря с учетом КПД электродвигателя;

$\eta_d(l)$ – КПД тягового электродвигателя от тока якоря.

Эти три характеристики называют *электромеханическими*. Пересчитав электромеханические характеристики тягового электродвигателя на поверхность качения ведущего колеса, получают электромеханические характеристики колесно-моторного блока:

$v(l)$ – скорость движения колеса (подвижного состава) от тока якоря тягового электродвигателя. Эту зависимость получают из характеристики $n(l)$, используя соотношение

$$v = 0,188 \frac{n_y D_k}{u_{тр}}, \text{ км/ч,}$$

где n_y – частота вращения якоря тягового электродвигателя, об/мин, соответствующая его крутящему моменту M ;

D_k – диаметр качения колеса, м;

$u_{тр}$ – передаточное число трансмиссии.

$F_k(l)$ – силы тяги колеса (моста или колесной пары) от тока якоря тягового электродвигателя, которую получают на основании зависимости $M(l)$ из выражения

$$F_k = \frac{2M}{D_k} u_{тр} \eta_{тр},$$

где $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии;

$\eta_{км}(l)$ – КПД колесно-моторного блока оттока якоря тягового электродвигателя.

Иногда характеристики $n(l)$ и $v(l)$ называют *скоростными*, а $F_k(l)$ и $F_{пс}(l)$ – *тяговыми* характеристиками соответственно колесно-моторного блока и подвижного состава. Характеристику $F_{пс}(v)$, полученную путем исключения силы тока I из зависимостей $F_k(l)$ и $v(l)$, т. е. фиксируя значение скорости v и силы тяги F_k , при одних и тех же значениях силы тока I , также называют *тяговой характеристикой*.

Чтобы получить полную картину работоспособности данного электродвигателя, необходимо рассчитать и построить семейство электромеханических и механических характеристик, а также зависимость КПД электродвигателя от крутящего момента и зависимость КПД электродвигателя от тока, зависимость крутящего момента электродвигателя от тока якоря.

Ниже даны примеры расчета и построения характеристик тяговых двигателей переменного и постоянного тока. В процессе этого расчета уточняются параметры выбранного тягового электродвигателя и проверяется его работоспособность в наиболее тяжелых условиях.

Тяговые электродвигатели переменного тока. В настоящее время наблюдается тенденция применения в троллейбусах асинхронных тяговых электродвигателей переменного тока. Для расчета их характеристик используются зависимости:

– номинальная угловая скорость вращения электродвигателя

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi m_a}{30}; \quad (7.20)$$

– номинальный момент электродвигателя

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{ном}}}; \quad (7.21)$$

– критический момент электродвигателя

$$M_{\text{кр}} = 2,2M_{\text{ном}}; \quad (7.22)$$

– номинальное скольжение

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_c - n_a}{n_c}, \quad (7.23)$$

где $P_{\text{дв}}$ – мощность электродвигателя;

n_c – синхронная частота вращения двигателя;

n_a – асинхронная частота вращения двигателя.

Критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ электродвигателя определяется из выражения

$$M_{\text{ном}} = \frac{2M_{\text{кр}}}{\frac{s_{\text{ном}}}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s_{\text{ном}}}}. \quad (7.24)$$

Идеальная угловая скорость асинхронного электродвигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi n_c}{30}. \quad (7.25)$$

Естественная характеристика тягового асинхронного электродвигателя строится при известных частоте f , Гц, и напряжении питания U , В. Угловая скорость якоря электродвигателя ω при этом будет изменяться от $\omega = \omega_0$ до $\omega = 0$.

Скольжение электродвигателя s рассчитывается по выражению

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (7.25)$$

Крутящий момент электродвигателя $M_{\text{дв}}$ рассчитывается по формуле

$$M_{\text{дв}} = \frac{2M_{\text{кр}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (7.27)$$

Ток ротора электродвигателя I рассчитывается по формуле

$$I = I_{\text{ном}} \sqrt{\frac{Ms}{M_{\text{ном}} s_{\text{ном}}}}. \quad (7.28)$$

КПД электродвигателя определяется по формуле

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{дв}} \omega}{U I \sqrt{3} \cos(\varphi)}. \quad (7.29)$$

Пример 7.6

Рассчитать характеристику трехфазного асинхронного электродвигателя переменного тока номинальной мощностью 160 кВт. Основные технические характеристики этого электродвигателя приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Основные технические характеристики электродвигателя

Тип электродвигателя	Ном. мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	I_n , А, при $U = 380$ В	I_p/I_n	M_n/M_n	M_k/M_n	$\eta_{дв}$, %	$\cos(\varphi)$
5AM315S4e	160	1485	287	6,2	1,9	2,2	95,3	0,89

Синхронная частота вращения двигателя $n_c = 1500$ об/мин; асинхронная частота вращения двигателя $n_a = 1485$ об/мин.

Р е ш е н и е

1. По приведенным выше формулам (7.20)–(7.25) рассчитываем данные для построения характеристики асинхронного тягового электродвигателя. В данном случае расчет удобнее вести с помощью табличного процессора Excel. Результаты расчета сведены в таблицу 7.4.

Таблица 7.4 – Результаты расчета

$U_{гр}$	$\omega_{ном}$, рад/с	$M_{ном}$, Н·м	$M_{кр}$, Н·м	$S_{ном}$	$S_{кр}$	ω_0 , рад/с
9,33	155,43	1029,4	2264,69	0,01	0,0416	157

2. Используя формулы (7.26)–(7.29), рассчитываем данные для построения естественной характеристики электродвигателя при частоте $f = 50$ Гц и напряжении питания $U = 380$ В. Угловая скорость якоря электродвигателя ω при этом будет изменяться от $\omega = \omega_0$ до $\omega = 0$. Результаты расчетов сведены в таблицу 7.5.

Таблица 7.5 – Результаты расчетов

ω , рад/с	s	$M_{дв}$, Н·м	I , А	$\eta_{дв}$, %
157,0	0,0	0,0	0,0	-

156,0	0,006371	677,612	185,836	98,2084
155,0	0,012739	1268,084	359,525	94,3896
154,0	0,019108	1718,013	512,523	89,1265
153,0	0,025477	2017,317	641,293	83,0964
152,0	0,031847	2186,205	746,397	76,8666
151,0	0,038216	2256,561	830,689	70,8204
150,47	0,041601	2264,685	868,241	67,7622
149,0	0,050955	2218,877	951,155	60,0125
148,0	0,057328	2153,061	993,777	55,3608
147,0	0,063694	2073,667	1028,038	51,1942
145,0	0,076433	1901,817	1078,486	44,1464
144,0	0,082802	1816,948	1097,191	41,1714
143,0	0,089172	1735,343	1112,746	38,5033
141,0	0,101911	1584,815	1136,813	33,9377
140,0	0,108281	1516,321	1146,198	31,9766
139,0	0,114649	1452,258	1154,244	30,1949
138,0	0,121019	1392,427	1161,188	28,5708
137,0	0,127389	1336,577	1167,217	27,0854
136,0	0,133758	1284,438	1172,481	25,7228
135,0	0,140127	1235,737	1177,101	24,4691
120,0	0,235669	775,360	1209,183	13,2851
100,0	0,363057	512,261	1219,895	7,2501
80,0	0,490446	381,441	1223,484	4,3062
60,0	0,617834	303,595	1225,103	2,5671
40,0	0,745223	252,054	1225,968	1,4198
20,0	0,872612	215,439	1226,484	0,6065
0,0	1,0	188,096	1226,816	0,0

3. Аналогично рассчитывалось семейство искусственных характеристик при частотах регулирования от 10 до 100 Гц с шагом, равным 10 Гц. Графическое изображение данных таблицы 7.5 приведено на рисунках 7.13–7.17.

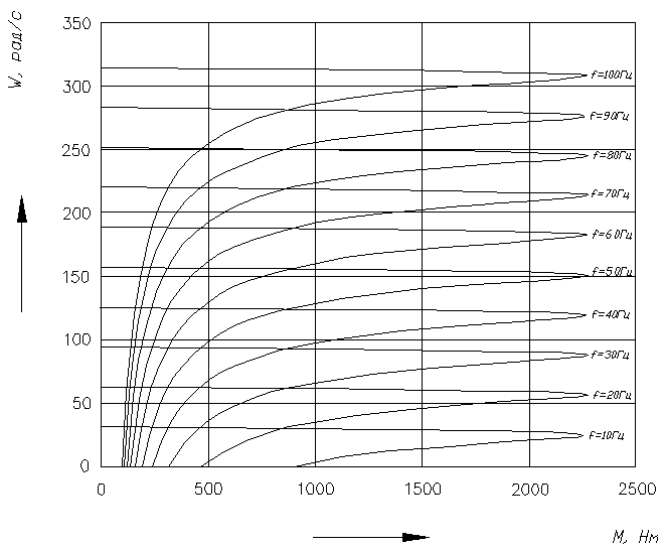


Рисунок 7.13 – Механические характеристики асинхронного электродвигателя

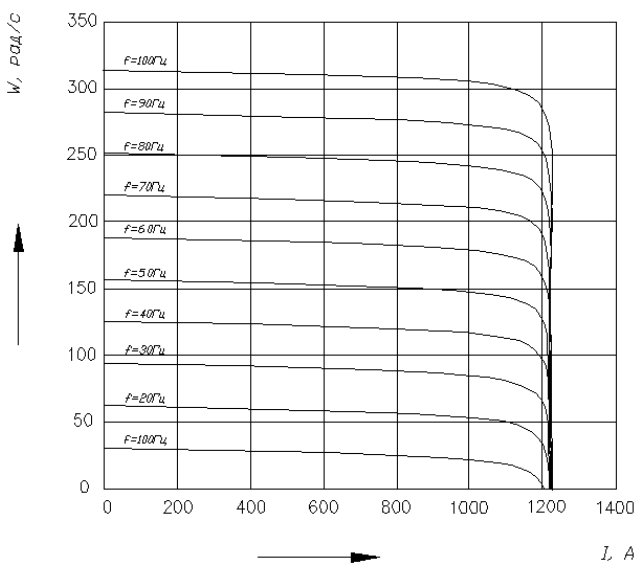


Рисунок 7.14 – Электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя

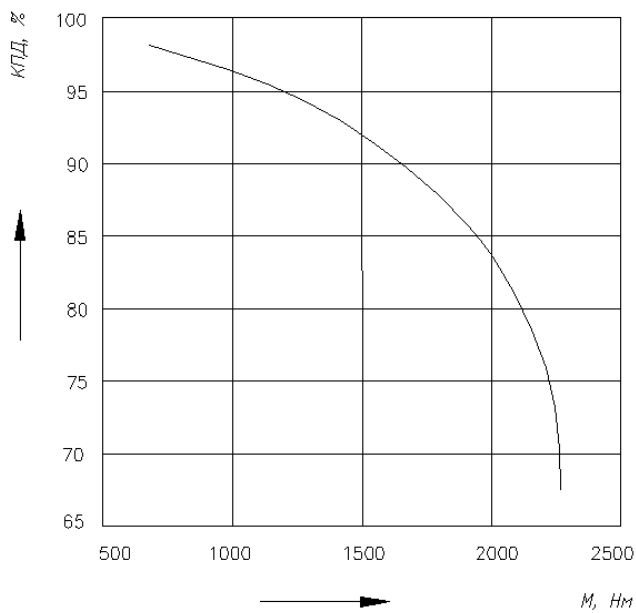


Рисунок 7.15 – Зависимость КПД асинхронного электродвигателя от крутящего момента

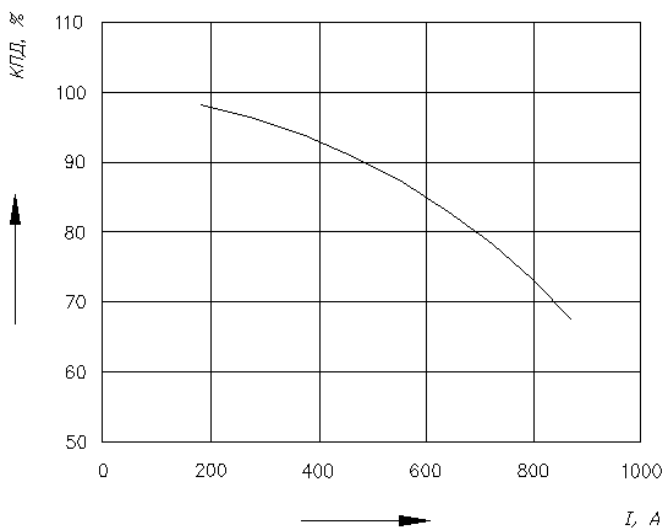


Рисунок 7.16 – Зависимость КПД асинхронного электродвигателя от тока

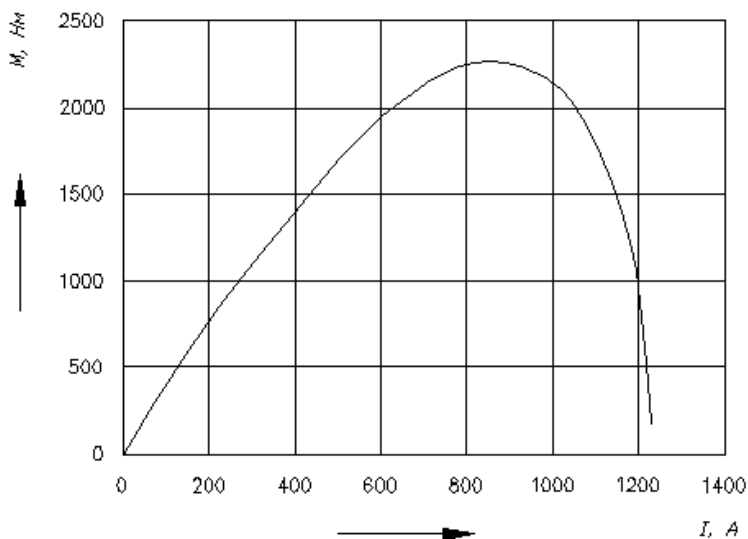


Рисунок 7.17 – Зависимость крутящего момента асинхронного электродвигателя от тока якоря

Тяговые электродвигатели постоянного тока. Форма характеристик тяговых электродвигателей постоянного тока зависит прежде всего от системы возбуждения магнитодвижущей силы (МДС или магнитного потока), принятой для данного электродвигателя. На подвижном составе городского электрического транспорта используются тяговые электродвигатели постоянного тока последовательного или смешанного возбуждения, которые отличаются удобными гиперболическими электромеханическими характеристиками, обеспечивающими возможность реализации больших тяговых сил при пуске и простое и регулирование скорости движения при сравнительно постоянном напряжении питающей тяговой сети.

Обычно сначала строят так называемые *естественные характеристики тяговых электродвигателей*, т. е. зависимости $v(I)$, $F_k(I)$ и $\eta(I)$. Эти характеристики рассчитываются при постоянной величине напряжения в контактной сети.

Современные системы автоматического управления тяговым электродвигателем позволяют реализовать заданные значения тока электродвигателя и скорости, следовательно, получать любые характеристики, так называемые *автоматические*, в отличие от естественных.

По закону электрического равновесия между приложенным к двигателю напряжением U , его электродвижущей силой (ЭДС) E и падением напряжения в силовой цепи при установившемся режиме существует зависимость

$$U = E + Ir, \quad (7.30)$$

где I – ток якоря электродвигателя;

r – сопротивление якорной цепи электродвигателя.

Напряжение, приложенное к двигателю,

$$U = U_k / Z_{дв},$$

где U_k – напряжение питания;

$Z_{дв}$ – число электродвигателей, подключенных к источнику последовательно.

Электродвижущая сила

$$E = \frac{p\omega N}{2\pi a_{пар}} \Phi,$$

где p – число пар полюсов;

ω – угловая скорость якоря;

N и $a_{пар}$ – число проводников и число пар полюсов;

Φ – магнитный поток главного полюса электродвигателя.

Выражая угловую скорость через поступательную скорость подвижного состава и пренебрегая проскальзыванием ведущих колес, получаем

$$E = \omega \Phi,$$

где

$$c = \frac{pN}{3,6\pi a_{пар}}.$$

Подставив значение E в исходную формулу (7.30), получаем следующее соотношение:

$$U = \omega \Phi + Ir,$$

решая которое относительно тока I и скорости v , находим

$$I = \frac{U - \omega\Phi}{r};$$

$$v = \frac{U - rI}{c\Phi}.$$

При отсутствии цепей параллельного и независимого возбуждения подводенная к электродвигателю мощность равна

$$P_{\text{дв}} = UI,$$

а полезная мощность на ведущих колесах P при суммарных потерях ΔP в двигателе и трансмиссии

$$P = P_{\text{дв}} - \Delta P = c\Phi v - \Delta P. \quad (7.31)$$

где $c\Phi v$ – электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$, равная подводенной мощности за вычетом механических и магнитных потерь.

Подставляя в выражение (7.31) значение мощности $P = F_{\text{к}}v/3,6$ и разделив на скорость v , получим значение силы тяги:

$$F_{\text{к}} = 3,6c\Phi / - 3,6\Delta P / v = F_{\text{эм}} - \Delta F_{\text{к}}. \quad (7.32)$$

Первый член $3,6c\Phi / = F_{\text{эм}}$ называют электромагнитной силой тяги, второй член $\Delta F_{\text{к}}$ – потеря силы тяги, вызванная магнитными и механическими потерями.

Для электродвигателей с параллельным или независимым возбуждением подводенная к электродвигателю мощность

$$P_0 = P + \Delta P_{\text{в}},$$

где $\Delta P_{\text{в}}$ – потери мощности в цепях возбуждения.

Коэффициент полезного действия колесно-моторного блока $\eta_{\text{к}}$ равен отношению полезной мощности на колесе P к полной подводенной мощности $P_0 = P + \Delta P + \Delta P_{\text{в}}$

$$\eta_{\text{к}} = 1 - \frac{\Delta P_{\text{в}} + \Delta P}{P_0}. \quad (7.33)$$

Скоростную характеристику тягового электродвигателя $v(l)$ рассчитывают по формуле (7.31) на основании зависимости $c\Phi(l)$. Эту зависимость устанавливают по магнитным характеристикам электрической машины $\Phi(F_m)$, где F_m – магнитодвижущая сила электродвигателя:

$$F_m = \sum W_{Bj} / I_{Bj},$$

где W_{Bj} и I_{Bj} – соответственно число витков и ток обмоток возбуждения на один полюс электродвигателя.

Суммирование производится с учетом схем включения обмоток возбуждения. Так как электродвигатель одного и того же типа может использоваться при различных значениях передаточных чисел трансмиссии $u_{тр}$ и диаметрах ведущих колес D_k , удобно определять магнитный поток по формуле

$$c\Phi = E / v = \frac{2u_{тр}E}{3,6\omega D_k}.$$

Входящее в формулы сопротивление якорной цепи r принимается согласно ГОСТ 2582–81 для температуры 75 °С при изоляции класса А, 115 °С – при изоляции классов Е и В, 130 °С – при изоляции классов F и H. Приложенное к электродвигателю напряжение U допускается принимать постоянным.

Для расчета скоростной характеристики $v(l)$ задаются разными значениями тока якоря и определяют для каждого тока МДС F_m в соответствии со схемой возбуждения электродвигателя и ее параметрами. При этой МДС F_m находят по нагрузочной характеристике отношение E/ω и магнитные потоки $c\Phi$ для каждого тока I . Затем по формуле (7.31) рассчитывают скорость v и строят характеристику $v(l)$.

Тяговую характеристику $F_k(l)$ рассчитывают по формуле (7.32). При этом электромагнитную силу $F_{эм} = 3,6c\Phi / v$ вычисляют, используя полученные ранее значения $c\Phi$. Для определения F_k необходимо определить ΔF_k по сумме магнитных и механических потерь в электродвигателе и трансмиссии:

$$\Delta F_k = 3,6(\Delta P_c + \Delta P_m + \Delta P_3) / v,$$

где ΔP_c – магнитные потери;

ΔP_m – механические потери;

ΔP_3 – потери в зубчатых передачах.

Характеристику $\eta_k(l)$ рассчитывают по формуле (7.33). Все входящие в нее величины определены ранее при расчете характеристик $v(l)$ и $F_k(l)$.

Ниже приводятся необходимые теоретические сведения и примеры расчета характеристик тяговых электродвигателей постоянного тока, имеющих различные схемы возбуждения. При этом в примерах даются расчеты характеристик электродвигателей для номинального магнитного потока.

Электродвигатели последовательного возбуждения. У тяговых электродвигателей последовательного возбуждения МДС прямо пропорциональна току якоря. Поэтому у электродвигателей с компенсационной обмоткой зависимость $c\Phi(l)$ совпадает с характеристикой $c\Phi(F_m)$, т. е. с зависимостью $c\Phi$ от тока возбуждения I_b при холостом ходе. Для электродвигателей без компенсационной обмотки кривая $c\Phi(l)$ соответствует режиму нагрузки с токами возбуждения, равными току якоря в любой точке кривой.

Так как скорость движения подвижного состава обратно пропорциональна магнитному потоку, то при малых токах в пределах, близких к прямолинейной части кривой $c\Phi(l)$, значения скорости почти обратно пропорциональны току якоря. Электромагнитная сила тяги $F_{эм} = 3,6c\Phi I$ возрастает при малых нагрузках в пределах линейной части характеристики $c\Phi(l)$ пропорционально квадрату тока, т. е. по параболе. По мере увеличения тока и насыщения магнитной цепи электродвигателя кривая $F_{эм}(l)$ все больше отклоняется от параболы, приближаясь к прямой линии. Ординаты характеристики силы тяги $F_k(l)$ меньше ординат характеристик $F_{эм}(l)$ на потери силы тяги ΔF_k . Поэтому в отличие от кривой $F_{эм}(l)$, проходящей через начало координат, кривая $F_k(l)$ не проходит через начало координат, а пересекает ось абсцисс при небольшом токе I_x , соответствующем холостому ходу электродвигателя. Однако при нормальном напряжении и столь малых токах электродвигатель не может работать из-за чрезмерного увеличения угловой скорости. Поэтому эту часть характеристики часто изображают пунктирной линией, рисунок 7.18.

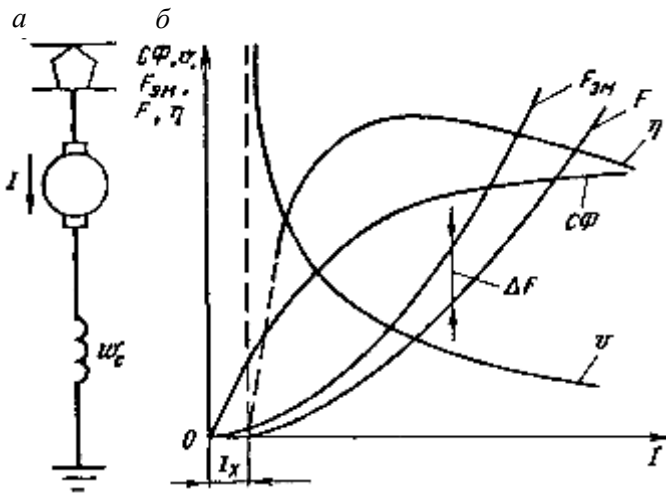


Рисунок 7.18 – Принципиальная схема включения электродвигателя последовательного возбуждения (а) и его электромеханические и механические характеристики на ободе колеса (б)

Характеристика $\eta_k(I)$ тягового электродвигателя последовательного возбуждения имеет обычную форму для электрических машин постоянного тока. При малых нагрузках КПД резко снижается из-за больших механических потерь. При токе I_c подведенная к электродвигателю мощность затрачивается в основном на покрытие механических потерь и КПД был бы равен нулю. В области нагрузок электродвигателя, близких к номинальным, КПД достигает максимального значения. При дальнейшем увеличении нагрузки КПД снова уменьшается, т. к. возрастают электрические потери, пропорциональные I^2 . При нагрузке, намного превышающей максимально допустимую, падение напряжения могло бы стать равным подведенному напряжению U и скорость стала бы равной $v = (U - rI) / (c\Phi)$. Следовательно, мощность и КПД упали бы до нуля. Этот предельный режим соответствует короткому замыканию электродвигателя, при котором вся подведенная мощность UI расходуется на покрытие электрических потерь rI^2 .

Для построения электромеханической и механической характеристик тягового электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения используются следующие уравнения:

$$I_{\text{в}} = I_{\text{в}} I_{\text{я}};$$

$$c\Phi = \varphi c\Phi_{\text{н}}(I_{\text{я}});$$

$$M = c\Phi I_{\text{я}};$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{c\Phi(I_{\text{я}})} - \frac{R_{\text{я}}}{[c\Phi(I_{\text{я}})]^2} M,$$

где $I_{\text{в}}$ – ток обмотки возбуждения двигателя;

$I_{\text{я}}$ – ток якоря двигателя;

$c\Phi$ – поток возбуждения двигателя;

M – момент якоря двигателя;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление якоря;

$U_{\text{я}}$ – напряжение в питающей цепи;

ω – угловая скорость вращения якоря.

Сопротивление якоря определяется из уравнения:

$$R_{\text{я}} = 0,6 P_{\text{дв}} \frac{1-\eta}{\eta} \cdot \frac{1}{I_{\text{я}}^2}, \quad (7.34)$$

где $P_{\text{дв}}$ – мощность тягового электродвигателя;

η – коэффициент полезного действия;

0,6 – число, учитывающее потери в тяговом электродвигателе.

Номинальный поток возбуждения при номинальных значениях тока якоря и угловой скорости рассчитывается по формуле

$$c\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{я}} - R I_{\text{я}}}{\omega_{\text{н}}}, \quad (7.35)$$

где R – общее (суммарное) сопротивление электродвигателя.

Точка холостого хода:

$$I_{\text{я}} = 0; \quad n = \frac{U_{\text{д}}}{C_1 \Phi}$$

Точка короткого замыкания:

$$I_{кз} = \frac{U_{д}}{R_{я}}, \quad \omega = 0.$$

По кривым $\upsilon(l)$ и $F_{к}(l)$ строят тяговую характеристику. Так как характеристики двигателя параллельного возбуждения являются линейными функциями, построение графиков ведется по двум характерным точкам – точкам пересечения графиков с осями координат.

Пример 7.7

Рассчитать и построить характеристику тягового электродвигателя последовательного возбуждения. Данные для расчета характеристик электродвигателя приведены в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Данные для расчета характеристики электродвигателя

Мощность ТЭД, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Сопротивление якоря, Ом	Сопротивление обмотки возбуждения, Ом	Номинальное число оборотов, об/мин
113	550	232	0,14	0,09	1430

Решение

1. По формулам (7.43) и (7.35) рассчитываем сопротивление якоря и номинальный поток возбуждения:

$$R_{я} = 0,6 \cdot 113 \cdot 10^3 \cdot \frac{1-0,9}{0,9} \cdot \frac{1}{232^2} = 0,14 \text{ Ом};$$

$$R = R_{я} + R_{в} = 0,14 + 0,09 = 0,23 \text{ Ом};$$

$$\Phi_{н} = \frac{30 \cdot (550 - 0,23 \cdot 232)}{\pi \cdot 1430} = 3,316 \text{ с.}$$

Кривая намагничивания для электродвигателей последовательного возбуждения воспроизведена по рисунку 2.42 с. 128 литературы [1],

и ее численные значения представлены в таблице 7.7, которые мы аппроксимировали следующим выражением:

$$\varphi = 0,92371 + 0,39995 \ln(i)$$

Таблица 7.6 – Численные значения кривой намагничивания для электродвигателей последовательного возбуждения

0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6
0,280	0,557	0,719	0,834	0,924	0,997	1,059	1,112	1,159	1,201	1,293	1,274	1,306

Это выражение в дальнейшем использовалось для выполнения расчетов. По полученному выражению построена кривая намагничивания для электродвигателей последовательного возбуждения, рисунок 7.19.

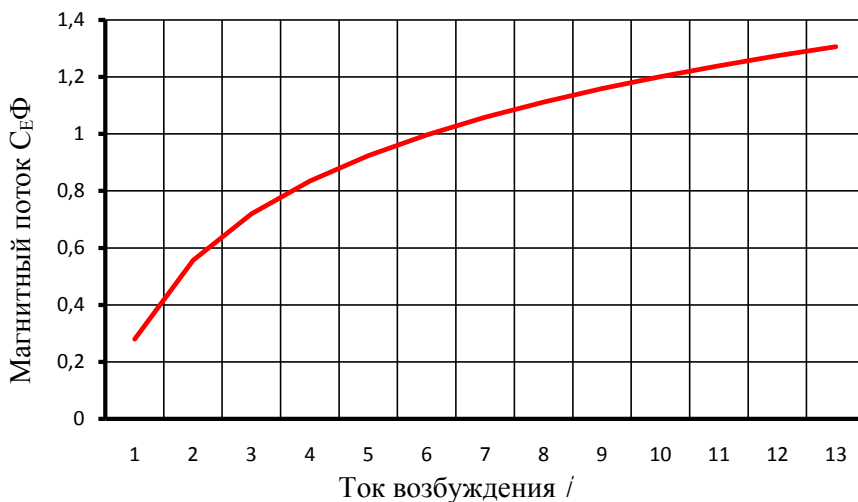


Рисунок 7.19 – Универсальная кривая намагничивания для электродвигателей последовательного возбуждения

2. Задаваясь различными последовательными значениями тока возбуждения i , расчет естественной характеристики электродвигателя последовательного возбуждения ведем в соответствии с описанным выше алгоритмом. Результаты расчета представлены в таблице 7.8.

Таблица 7.8 – Данные для построения естественной характеристики электродвигателя последовательного возбуждения, $P_{дв} = 113$ кВт

i	φ	$I_{я}, A$	$c\Phi, Вб$	$M_{дв}, Н·м$	$\omega_{дв}, 1/с$
0,2	0,280	46,4	0,928	43,071	585,514
0,4	0,557	92,8	1,847	171,425	290,7,7
0,6	0,719	139,2	2,385	331,968	222,453
0,8	0,834	185,6	2,766	513,416	89,432
1,0	0,924	232,0	3,062	710,407	169,008
1,2	0,997	278,4	3,304	919,785	154,676
1,4	1,059	324,8	3,508	1139,465	143,814
1,6	1,112	371,2	3,685	1367,963	135,142
1,8	1,159	417,6	3,841	1604,171	127,957
2,0	1,201	464,0	3,981	1847,229	121,836
2,2	1,293	510,4	4,107	2096,449	116,508
2,4	1,274	556,8	4,223	2351,269	111,785
2,6	1,306	603,2	4,329	2611,222	07,544

По результатам расчетов (см. таблицу 7.8) построена естественная (рисунок 7.20) и механическая (рисунок 7.21) характеристики исследуемого электродвигателя последовательного возбуждения.

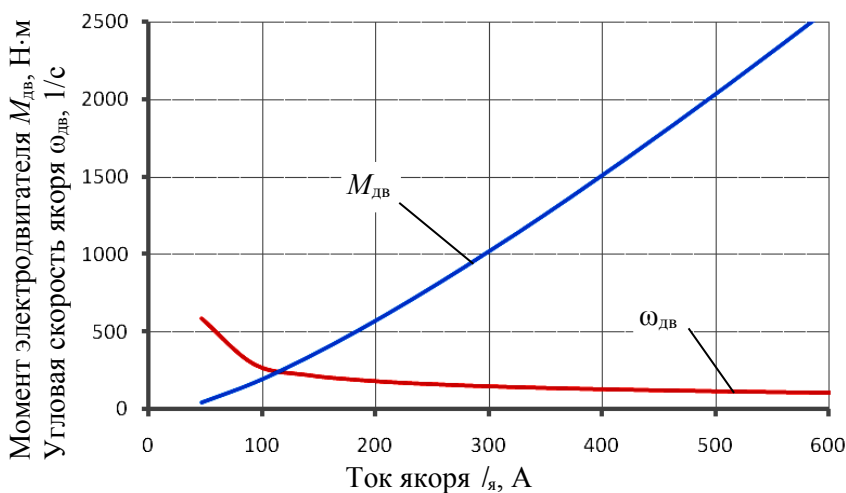


Рисунок 7.20 – Естественная характеристика электродвигателя последовательного возбуждения, $P_{дв} = 113$ кВт

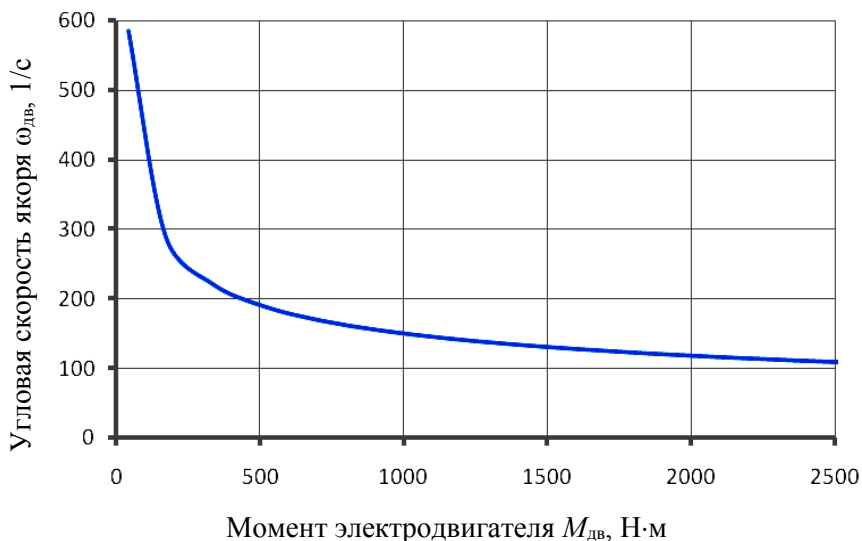


Рисунок 7.21 – Механическая характеристика электродвигателя последовательного возбуждения, $P_{дв} = 113$ кВт

Электродвигатели параллельного и независимого возбуждения. МДС этих двигателей не зависит от тока якоря. Поэтому характеристика магнитного потока от тока $\psi(I)$ при наличии компенсационной обмотки представляет собой прямую линию, параллельную оси абсцисс. При отсутствии компенсационной обмотки магнитный поток с увеличением тока из-за размагничивающего действия реакции якоря несколько уменьшается, рисунок 7.22.

Характеристика $v(I)$ получается при этом весьма жесткой, т. к. с возрастанием нагрузки скорость лишь незначительно снижается из-за увеличения падения напряжения на сопротивлении обмоток двигателя. В случае очень больших нагрузок реакция якоря может вызвать даже незначительное повышение скорости. Скоростная и другие электромеханические характеристики электродвигателей параллельного или независимого возбуждения показаны на рисунке 7.22, б.

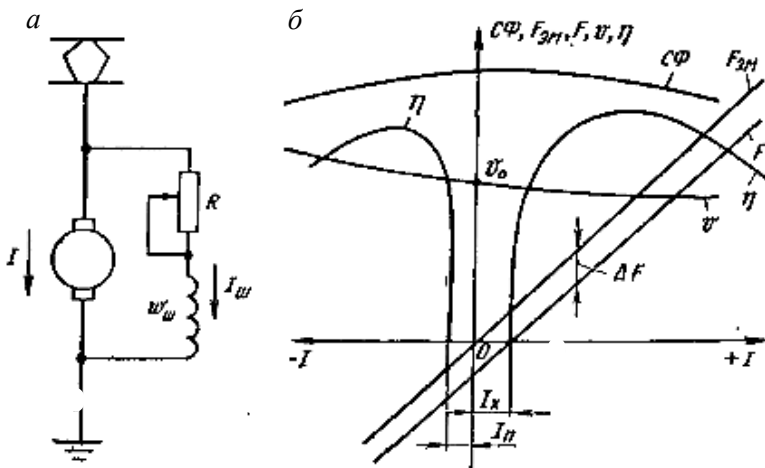


Рисунок 7.22 – Принципиальная схема включения тягового электродвигателя параллельного возбуждения (а) и его электромеханические характеристики на ободу колеса (б)

Когда подвижной состав с включенным электродвигателем движется по крутому спуску, его скорость, а соответственно и ЭДС. $E = c\Phi v$ возрастают. При некоторой скорости ЭДС становится равной приложенному к электродвигателю напряжению U и ток двигателя уменьшается до нуля. Если скорость продолжает повышаться, ЭДС превышает приложенное напряжение. Так как направление магнитного потока продолжает оставаться неизменным, изменяется знак силы тяги на колесе F_k и она переходит в тормозную силу. Тяговый электродвигатель автоматически переходит в генераторный режим. Ток генераторного режима электродвигателя может быть передан в контактную сеть. Подобный режим работы тягового электродвигателя называют *рекуперативным торможением*.

Непосредственный переход тягового электродвигателя параллельного и независимого возбуждения в генераторный режим, в случае повышения скорости, возможен благодаря наличию магнитного потока при отсутствии тока в якоре.

Основой расчета характеристик электродвигателей параллельного и независимого возбуждения является зависимость ЭДС E и крутящего момента M_d от параметров электродвигателей:

$$E = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{pN}{a} \Phi \omega = c\Phi\omega;$$

$$M_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{pN}{a} \Phi \omega = c\Phi I_a, \quad (7.36)$$

где E – ЭДС якоря, В;

I_a – ток якоря, А;

Φ – магнитный поток одного полюса, Вб;

ω – угловая скорость вращения якоря, рад/с;

p – число пар главных полюсов;

N – число проводников на якоре;

a – число пар параллельных ветвей якоря.

Под *естественными характеристиками* электродвигателей параллельного и независимого возбуждения понимаются характеристики, которыми они обладают при полном потоке и без внешних сопротивлений в цепи якоря.

Характеристики электродвигателей параллельного и независимого возбуждения при наличии внешних сопротивлений в цепи якоря или при ослабленном магнитном потоке называются *искусственными характеристиками*.

Все механические характеристики электродвигателей параллельного и независимого возбуждения, естественная и искусственная, прямолинейны и пересекаются в одной точке ($M_d = 0$; $n = n_0$, здесь $n_0 = U/c'_E$, где c'_E – электрическая постоянная электродвигателя при номинальном потоке возбуждения), соответствующей идеальному холостому ходу. При любой постоянной частоте вращения якоря (электродвигателя) приложенное напряжение U_n уравновешивается ЭДС якоря E и падением напряжения $I_a R$ в сопротивлении всей силовой цепи, т. е.

$$U_n = E + I_a R_d,$$

где I_a – ток якоря, А;

R_d – суммарное сопротивление обмоток двигателя, Ом.

Частота вращения якоря

$$n = \frac{U_n}{c'_E} - \frac{R_d}{c'_E c'_M} M_d = \frac{U_n - I_a R_d}{c_1 \Phi},$$

где Φ – магнитный поток в электродвигателе;

c_1 – коэффициент, зависящий от параметров обмоток электродвигателя.

Крутящий момент электродвигателя M_d рассчитывается по формуле (7.36)

Так как характеристики электродвигателя параллельного возбуждения являются линейными функциями, графики строятся по двум характерным точкам – точкам их пересечения с осями координат.

Электромеханическая характеристика:

$$\text{точка холостого хода: } I_{\text{я}} = 0; \quad n = \frac{U_{\text{д}}}{c_1 \Phi};$$

$$\text{точка короткого замыкания: } I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{д}}}{R_{\text{я}}}; \quad \omega = 0.$$

Механическая характеристика:

$$M = 0; \quad n = \frac{U_{\text{д}}}{c_1 \Phi};$$

$$M_{\text{кз}} = I_{\text{кз}} c_1 \Phi; \quad \omega = 0.$$

Пример 7.8

Рассчитать и построить характеристику тягового электродвигателя параллельного возбуждения. Данные для расчета характеристики электродвигателя приведены в таблице 7.9.

Таблица 7.9 – Данные для расчета характеристик электродвигателя

Мощность ТЭД, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Сопrotивление якоря, Ом	Номинальное число оборотов, об/мин
115	550	250	0,15	1430

Решение

Расчет характеристик тягового электродвигателя параллельного возбуждения выполняется по приведенным выше формулам в следующей последовательности.

1. Магнитный поток электродвигателя

$$c_1 \Phi = \frac{30(U_d - R_d I_a)}{\pi l} = \frac{30 \cdot (550 - 0,15 \cdot 250)}{\pi \cdot 1430} = 3,422 \text{ Вб.}$$

2. Угловая скорость вращения якоря электродвигателя

$$\omega_0 = \frac{U_d}{c_1 \Phi} = \frac{550}{3,422} = 160,707 \text{ рад/с.}$$

3. Ток короткого замыкания

$$I_{кз} = \frac{U_d}{R_d} = \frac{550}{0,15} = 3666,667 \text{ А.}$$

4. Крутящий момент электродвигателя, развиваемый при коротком замыкании

$$M_{кз} = c_1 \Phi I_{кз} = 3,422 \cdot 3666,667 = 12548755 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

5. Максимальный ток, проходящий через электродвигатель:

$$I_{\max} = 2,5 I_a = 2,5 \cdot 250 = 625,0 \text{ А.}$$

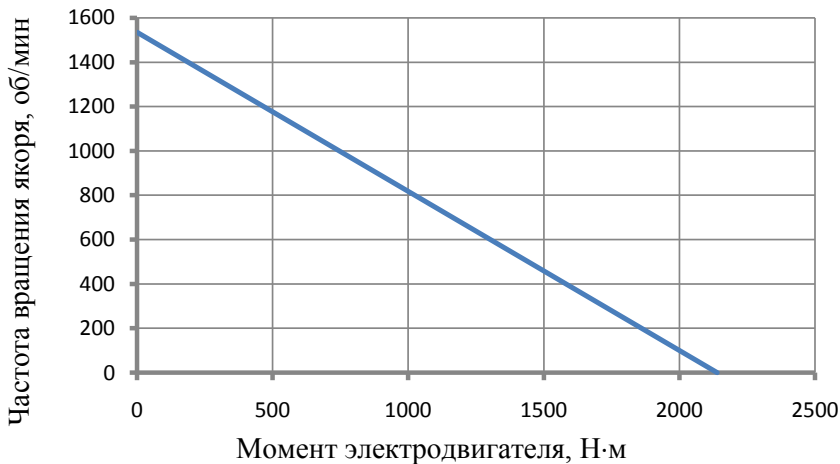
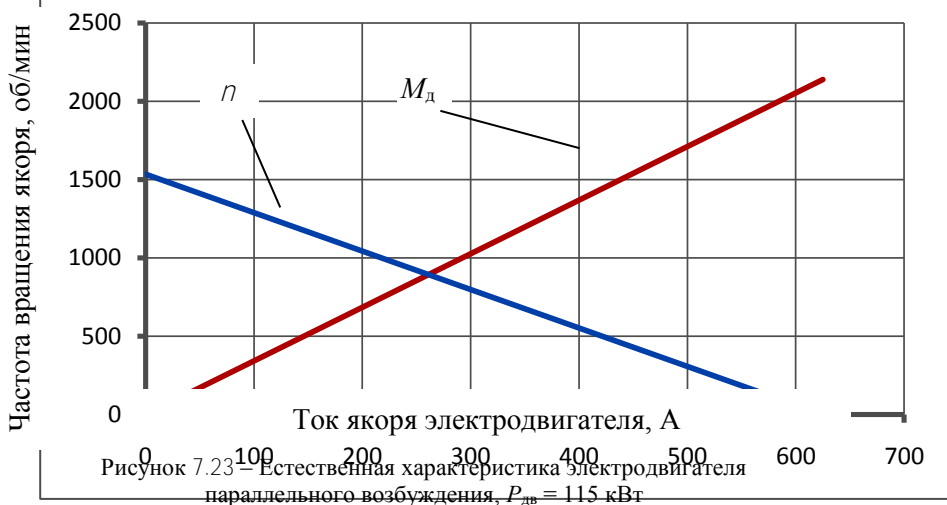
6. Максимальный момент, развиваемый электродвигателем:

$$M_{\max} = c_1 \Phi I_{\max} = 3,422 \cdot 625 = 2138992 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

7. Угловая скорость якоря электродвигателя

$$\omega = \omega_0 - \frac{R_d I_{\max}}{c_1 \Phi} = 160,707 - \frac{0,15 \cdot 625}{3,422} = 133,314 \text{ рад/с.}$$

На рисунке 7.23 представлена естественная характеристика электродвигателя параллельного возбуждения, а на рисунке 7.24 – его механическая характеристика.



Электродвигатели смешанного возбуждения. Различают электродвигатели смешанного возбуждения, с согласно-смешанным и встречно-смешанным возбуждением.

В двигателе согласно-смешанного возбуждения (рисунок 7.25, а) в тяговом режиме суммируются МДС последовательной и параллельной или независимой обмоток. Общая МДС равна

$$F_M = I_{\Pi} W_{\Pi} + I W_{\zeta} = W_{\zeta} \left(I + \frac{I_{\Pi} W_{\Pi}}{W_{\zeta}} \right) = W_{\zeta} (I + I_0), \text{ А.}$$

где I_{Π} и W_{Π} – соответственно ток и число витков параллельной (независимой) обмотки;

W_{ζ} – число витков последовательной обмотки;

$I_0 = I_{\Pi} W_{\Pi} / W_{\zeta}$.

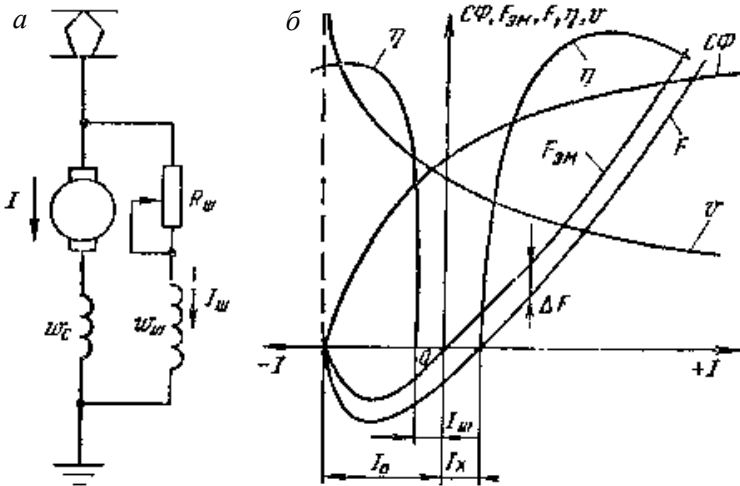


Рисунок 7.25 – Принципиальная схема включения тягового электродвигателя согласно-смешанного возбуждения (а) и его электромеханические характеристики на ободе ведущего колеса (б)

Следовательно, электродвигатель согласно-смешанного возбуждения можно представить как электромашину с одной последовательной обмоткой, по которой наряду с током якоря протекает постоянный ток. В таком электродвигателе начало кривой $c\Phi(I)$ сдвинуто от начала координат влево на отрезок, соответствующий току I_0 по сравнению с электродвигателем последовательного возбуждения, рисунок 7.27, б. Поэтому при токе якоря, равном нулю, электромагнитная сила тяги F_{3M} и $c\Phi$ не равны нулю, а соответствуют току I_0 .

Характеристика $v(I)$ электродвигателя имеет примерно ту же форму, что и u электродвигателя последовательного возбуждения, но сдвинута влево, как и кривая $c\Phi(I)$.

В электродвигателе согласно-смешанного возбуждения при нулевом токе $I = 0$ сохраняется МДС параллельной (независимой) обмотки, что обеспечивает ему возможность автоматического перехода в режим рекуперативного торможения. При переходе электродвигателя в генераторный режим электромагнитная сила $F_{эм}$ меняет знак и становится тормозной. С увеличением тока рекуперации сила $F_{эм}$ сначала возрастает, а при больших токах рекуперации электродвигатель сильно размагничивается. Абсолютное значение силы $F_{эм}$ стремится к нулю при токе рекуперации I_0 , соответствующем МДС, равном нулю. В тяговом режиме значение силы F_k меньше, а при рекуперации – больше силы $F_{эм}$ (см. рисунок 7.25).

Зависимости $\eta(I)$ в тяговом и тормозном режимах имеют такой же вид, как у двигателя параллельного или независимого возбуждения.

В электрических двигателях со встречно-смешанным возбуждением МДС обеих обмоток в режиме тяги не складывается, а вычитается (рисунок 7.26). Если МДС параллельной или независимой обмотки больше МДС последовательной обмотки, электродвигатель не пригоден для электрической тяги из-за неустойчивости работы. Случайное снижение тока в таком электродвигателе приводит к увеличению ЭДС, вызывающему дальнейшее снижение тока. Это так называемая *электрическая неустойчивость электродвигателя встречно-смешанного возбуждения*.

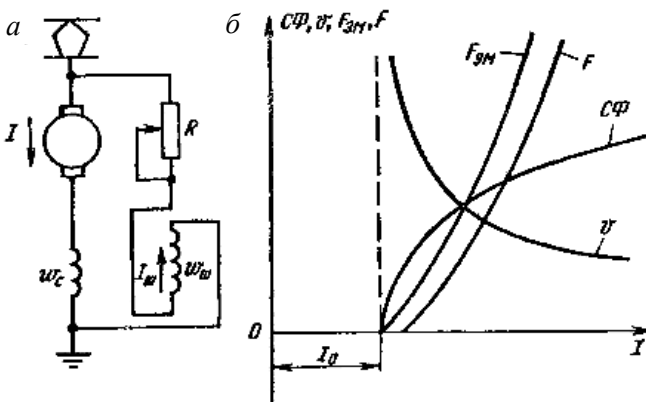


Рисунок 7.26 – Принципиальная схема включения тягового электродвигателя встречно-смешанного возбуждения (а) и его электрохимические характеристики на ободу ведущего колеса (б)

Пример 7.9

Рассчитать и построить характеристику тягового электродвигателя согласно-смешанного возбуждения. Данные для расчета характеристики электродвигателя приведены в таблице 7.9.

Таблица 7.9 – Данные для расчета характеристик электродвигателя

Мощность ТЭД, кВт	Напряжение, В	Ток, А		Сопротивление, Ом		Номинальное число оборотов, об/мин
		якоря	параллельной обмотки	якоря	обмотки возбуждения	
120	550	232	2,15	0,14	0,09	1430

Решение

1. Расчет и построение характеристик электродвигателей смешанного возбуждения при последовательных резисторах в силовой цепи ведется так же, как и для двигателей последовательно возбуждения.

Кривая намагничивания для электродвигателей смешанного возбуждения воспроизведена по рисунку 2.64 стр. 173 литературы [1], и ее численные значения, представленные в таблице 7.11, были аппроксимированы следующей зависимостью:

$$\varphi = \frac{1}{0,77913 + 0,68145 \cdot \exp(-i)}$$

которая в дальнейшем использовалась для выполнения расчетов. По полученным результатам построена кривая намагничивания для электродвигателей смешанного возбуждения, рисунок 7.127.

Таблица 7.12 – Численные значения кривой намагничивания для электродвигателей смешанного возбуждения

0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

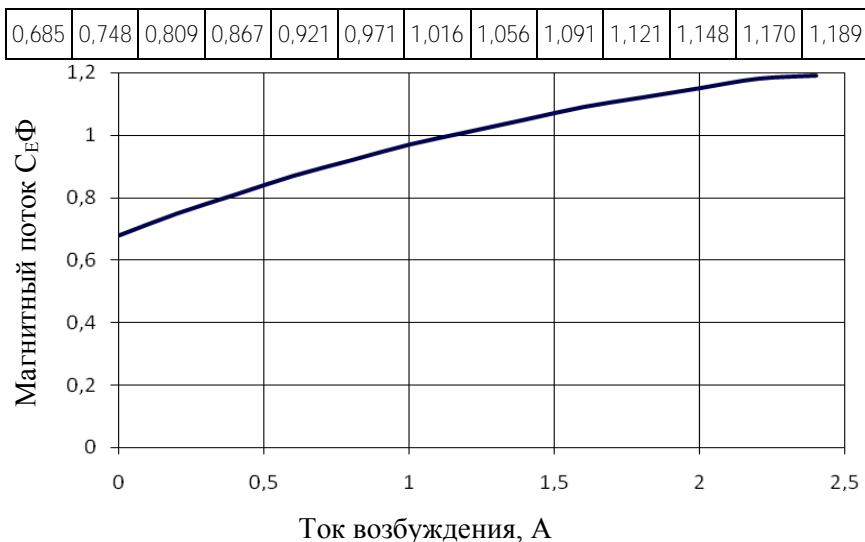


Рисунок 7.27 – Универсальная кривая намагничивания электродвигателей смешанного возбуждения

2. Рассчитываем сопротивление и номинальный поток возбуждения:
 – сопротивление параллельной обмотки

$$r_{\Pi} = (r_{\text{я}} + r_{\text{в}}) \frac{I_{\text{п.о}}}{I_{\text{я}}} = (0,14 + 0,09) \frac{2,15}{232} = 0,002 \text{ Ом};$$

– сопротивление электродвигателя

$$R = \frac{1}{\frac{1}{r_{\text{я}} + r_{\text{в}}} + \frac{1}{r_{\Pi}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,014 + 0,09} + \frac{1}{0,002}} = 0,002 \text{ Ом};$$

– магнитный поток

$$\alpha \Phi_1 = \frac{30}{\pi n_{\text{н}}} [U - (r_{\text{я}} + r_{\text{в}}) I_{\text{я}}] = \frac{30}{\pi \cdot 1430} [550 - (0,14 + 0,09) \cdot 232] = 3,316 \text{ с};$$

$$c\Phi_2 = c\Phi_1 \frac{i_{п.о}}{i_я} = 3,316 \frac{2,15}{232} = 0,031с.$$

$$c\Phi_H = c\Phi_1 - c\Phi_2 = 3,316с - 0,031с = 3,285с.$$

3. Задаваясь различными последовательными значениями тока возбуждения i , расчет естественной характеристики электродвигателя согласно-смешанного возбуждения ведем в соответствии с описанным выше алгоритмом для электродвигателя последовательного возбуждения. Результаты расчета представлены в таблице 7.12.

Таблица 7.12 – Данные для построения естественной характеристики электродвигателя согласно-смешанного возбуждения, $P_{дв} = 120$ кВт

i	φ	$i_я, A$	$c\Phi, Вб$	$M_{дв}, Нм$	$\omega_{дв}, 1/с$
0	0,68466	0	2,280491	0	241,1761
0,2	0,747913	46,83	2,488342	115,4591	220,9934
0,4	0,809114	93,66	2,689449	249,5809	204,4338
0,6	0,867214	140,49	2,880366	400,9469	90,8513
0,8	0,921383	187,32	3,058364	567,6323	179,7133
1	0,971042	234,15	3,221544	747,3983	170,5815
1,2	1,015869	280,98	3,368846	937,8867	163,0954
1,4	1,055773	27,81	3,499969	1136,79	156,9586
1,6	1,090855	374,64	3,615249	1341,98	151,928
1,8	1,121362	421,47	3,715495	1551,591	147,804
2	1,147639	468,3	3,801841	1764,054	144,4226
2,2	1,170088	515,13	3,875608	1978,11	141,6498
2,4	1,189132	561,96	3,938187	2192,782	139,3754

На рисунке 7.28 представлена естественная характеристика электродвигателя согласно-смешанного возбуждения, а на рисунке 7.29 – его механическая характеристика.

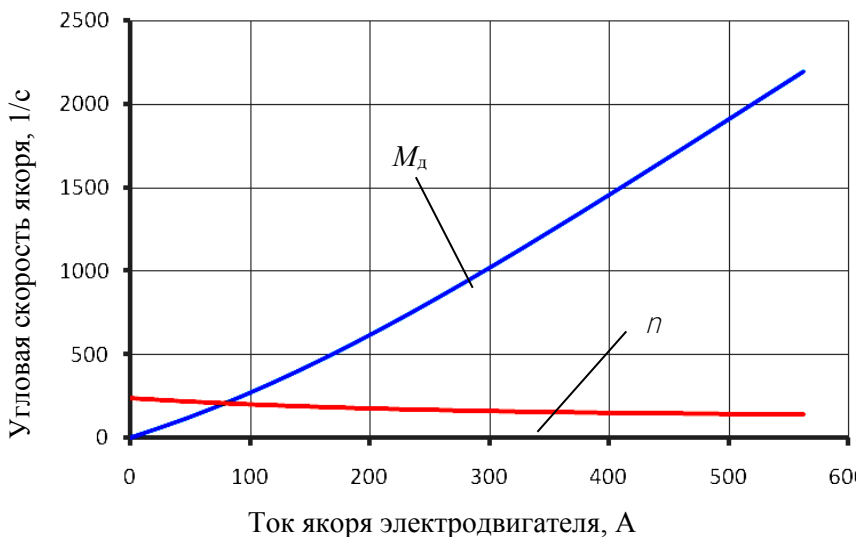


Рисунок 7.28 – Естественная характеристика электродвигателя согласно-смешанного возбуждения, $P_{дв} = 120$ кВт

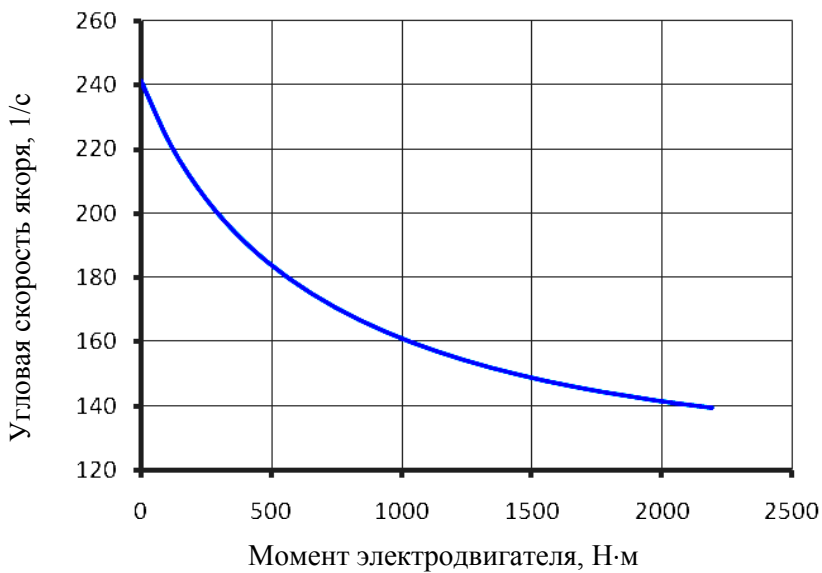


Рисунок 7.29 – Механическая характеристика электродвигателя согласно-смешанного возбуждения, $P_{дв} = 120$ кВт

7.4.7. Построение динамической характеристики подвижного состава

Для построения динамической характеристики подвижного состава воспользуемся основными положениями теории автомобиля [7, 10–12 и др.].

Если в уравнении прямолинейного движения подвижного состава перенести в правую часть уравнения все члены, содержащие его массу m , и разделить обе части полученного выражения на вес $G = mg$ подвижного состава, получим

$$\frac{M_{\text{дв}} u_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}} / r_{\text{р}} - k_{\text{в}} A_{\text{лоб}} v^2}{G} = \psi + \frac{\delta_{\text{пм}}}{g} \cdot \frac{dv}{dt}, \quad (7.37)$$

где $r_{\text{р}}$ – расчетный радиус ведущих колес;

$k_{\text{в}}$ – коэффициент сопротивления воздуха;

$A_{\text{лоб}}$ – лобовая площадь подвижного состава;

ψ – суммарное сопротивление движению дороги или рельсового пути;

$\delta_{\text{пм}}$ – коэффициент приведенной массы.

Коэффициент приведенной массы учитывает влияние относительного движения массы тягового электродвигателя и ведущих колес на изменение кинетической энергии подвижного состава. Следовательно, он показывает, во сколько раз энергия, затрачиваемая на разгон реального подвижного состава, больше энергии, необходимой для разгона поступательно движущегося твердого тела массой, равной массе подвижного состава m .

Выражение, стоящее в левой части уравнения (7.37), называется *динамическим фактором*:

$$D = \frac{M_{\text{дв}} u_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}} / r_{\text{р}} - k_{\text{в}} A_{\text{лоб}} v^2}{G} = \frac{F_{\text{к}} - F_{\text{в}}}{G}, \quad (7.38)$$

где $F_{\text{к}}$ – касательная сила тяги ведущих колес;

$F_{\text{в}}$ – сила сопротивления воздуха.

Динамический фактор – величина безразмерная. Она характеризует потенциальные возможности подвижного состава по преодолению сопротивлений дороги или рельсового пути или сообщению ему

ускорения в заданных условиях эксплуатации. Следовательно, динамический фактор характеризует тяговые и скоростные свойства подвижного состава. Графическое изображение зависимости динамического фактора от скорости движения $D = f(v)$ подвижного состава называется *динамической характеристикой подвижного состава*.

Величина динамического фактора зависит от конструктивных параметров подвижного состава и режимов его движения. Из формулы (7.38) следует, что чем больше передаточное число трансмиссии $U_{тр}$ подвижного состава и выше ее КПД $\eta_{тр}$, а также масса m ПС, лобовая площадь $A_{лоб}$ и коэффициент сопротивления воздуха k_v , тем больше динамический фактор D . Фактор обтекаемости $k_v A$ троллейбуса, в отличие от трамвая, оказывает значительное влияние при большой скорости и поэтому заметно снижает величину динамического фактора лишь при скоростях, близких к максимальным.

При построении динамической характеристики подвижного состава выбирают не менее 10 точек на механической характеристике тягового электродвигателя $M_{дв} = f(\omega_n)$. Для каждой точки вычисляют динамический фактор D по формуле (7.38) и скорость подвижного состава, которая вычисляется без учета буксования ведущих колес:

$$v = \frac{\omega_{дв} r_k}{U_{тр}}, \quad (7.39)$$

где r_k – радиус качения ведущих колес.

В практике построения динамических характеристик часто пренебрегают различием радиуса качения r_k и радиусом качения $r_{к0}$, определяемым без учета влияния крутящего момента на колесе M_k , и в формуле (7.39) вместо переменной величины r_k используют постоянную для данной шины величину $r_{к0}$, принимая $r_{к0}$ равным статическому радиусу $r_{ст}$ колеса при номинальной нагрузке $G_{кн}$ на него. Данные по статическому радиусу колеса и номинальной нагрузке берутся по стандартам на шины. Для трамвайных колес статический радиус равен половине диаметра колеса по поверхности качения (катания).

Используя динамическую характеристику, можно сравнивать тягово-скоростные свойства подвижного состава различных типов, назначений и массо-геометрических параметров.

Подставив в уравнение (7.37) значение динамического фактора по выражению (7.38), получим

$$D = \psi + \frac{\delta_{\text{пм}}}{g} \cdot \frac{dv}{dt} = f + i + \frac{\delta_{\text{пм}}}{g} \cdot \frac{dv}{dt}. \quad (7.40)$$

При расчете динамического фактора трамвая вместо коэффициента сопротивления качению f и уклона i подставляются удельное сопротивление и уклон, деленные на 1000 ($w/1000$ и $l/1000$).

При равномерном движении подвижного состава

$$D = \psi = f + i.$$

Из выражения (7.40) следует, что при равенстве динамических факторов различных подвижных составов при одинаковых скоростях движения они на данном скоростном режиме могут преодолевать одинаковые дорожные сопротивления или сопротивления рельсового пути. Следовательно, их тяговые свойства одинаковы, хотя подвижные составы могут существенно различаться по всем конструктивным параметрам.

На динамической характеристике (рисунок 7.30) выделяют характерные точки, используемые при сравнительном анализе тягово-скоростных свойств подвижного состава.

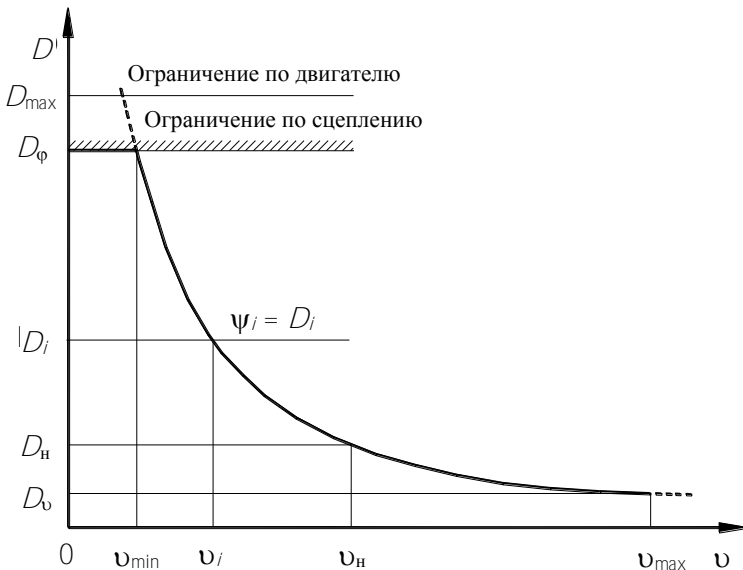


Рисунок 7.30 – Динамическая характеристика подвижного состава

Динамический фактор D_v при максимальной скорости подвижного состава v_{\max} определяет возможность достижения максимальной скорости в заданных условиях эксплуатации, характеризуемых коэффициентом суммарного дорожного сопротивления или сопротивлением рельсового пути ψ . Значение максимальной скорости должно достигаться на горизонтальном участке дороги или рельсового пути. При этом для троллейбуса должно выполняться условие

$$D_v \geq f_0,$$

здесь f_0 – коэффициент сопротивления качению шины, зависящий от скорости движения троллейбуса. Для трамвая это условие записывается так:

$$D_v \geq W/1000,$$

здесь W – основное удельное сопротивление качению трамвая.

Динамический фактор при номинальном режиме движения D_n определяет максимальную величину уклона дороги, который может преодолеть подвижной состав (троллейбус: $i_{\max} = D_n - f$; трамвай: $i_{\max} = D_n - W/1000$), а соответствующая ему скорость

$$v_n = 0,377 n_{\text{дв.н}} r_{\text{ст}} / U_{\text{тр}},$$

где $n_{\text{дв.н}}$ – номинальные обороты тягового электродвигателя, ограничивает диапазон скоростей движения подвижного состава:

$$v_n \leq v \leq v_{\max}.$$

Максимальный динамический фактор D_{\max} определяет максимальное дорожное сопротивление, характеризуемое коэффициентом ψ_{\max} или максимальное сопротивление рельсового пути, характеризуемое удельным сопротивлением W_{\max} , которое может преодолеть подвижной состав при достаточном сцеплении ведущих колес с дорогой или рельсами.

Однако коэффициенты сцепления ϕ зависят от состояния дороги или рельсов и изменяются в широких пределах. Поэтому максимальный динамический фактор не всегда может быть реализован. Так как

для троллейбуса $f \ll \varphi$, а для трамвая $W_{\max}/1000 < \varphi$, то принимают, что максимальный момент M_{φ} ведущих колес по сцеплению

$$M_{\varphi} = \varphi R_z \Gamma_{ст},$$

где R_z – суммарная нормальная нагрузка на ведущие колеса.

Подставив значение максимального момента на ведущих колесах в формулу (7.38) и пренебрегая сопротивлением воздуха (скорости движения в этих случаях не превышают 10 км/ч), получим значение динамического фактора по сцеплению:

$$D_{\varphi} = \frac{\varphi R_z}{G}.$$

Если $D_{\varphi} < D_{\max}$, то условие устойчивого движения троллейбуса принимает вид $D_{\varphi} \geq \psi$, а условие устойчивого движения трамвая, как полноприводной машины, $D_{\varphi} = \varphi$.

Пример 7.10

Построить динамическую характеристику троллейбуса, полная масса которого $m = 18000$ кг, мощность тягового электродвигателя $P_{\max} = 160$ кВт, регулирование двигателя – частотное. Остальные параметры электродвигателя представлены в таблице 3. В параграфе 7.4.6.4 дан пример расчета характеристики асинхронного электродвигателя. Площадь лобового сопротивления троллейбуса $A_{\text{лоб}} = 7,155$ м²; максимальная скорость движения $v_{\max} = 60$ км/ч; коэффициент полезного действия трансмиссии $\eta_{\text{тр}} = 0,946$; коэффициент дорожного сопротивления $\psi = 0,04$; коэффициент сопротивления воздуха $k_v = 0,4$.

Решение

1. Вес троллейбуса

$$G = mg = 18000 \cdot 9.81 = 176580 \text{ Н.}$$

2. Рассчитываем: передаточное число трансмиссии $u_{\text{тр}}$, КПД трансмиссии $\eta_{\text{тр}}$ и расчетный радиус ведущего колеса $r_{\text{л}}$, используя фор-

мулы параграфа 7.4.6.2 (там же приведен численный пример расчета этих параметров).

3. По формулам (7.20)–(7.25) рассчитываем недостающие данные для построения характеристики асинхронного электродвигателя и по формулам (7.25)–(7.29) – данные для построения естественной характеристики электродвигателя.

4. Силу тяги троллейбуса в зависимости от крутящего момента тягового электродвигателя рассчитаем по формуле

$$F_k = \frac{M_{дв} U_{тр} \eta_{тр}}{r_d}.$$

5. Так как в троллейбусе применяется частотное регулирование двигателя, то тяговый электродвигатель работает при искусственных характеристиках, по которым строятся графики. Частота изменяется от 10 до 100 Гц. $l_n = 2,2 l_n$. Беря из характеристики электродвигателя угловую скорость вращения якоря и крутящий момент, находим скорость движения троллейбуса, силу тяги ведущих колес, силу сопротивления воздуха и динамический фактор. Результаты сводим в таблицу 7.13.

Таблица 7.13 – Результаты вычислений

ω , рад/с	v , км/ч	$M_{дв}$, Нм	F_k , Н	D
1	2	3	4	5
79,2	15	2020,208	35656,67	0,201558
103,7	20	1543,408	27241,16	0,153635
129,6	25	1234,727	21792,93	0,122423
155,5	30	1028,939	18160,77	0,101416
181,4	35	881,947	15566,38	0,086206
207,3	40	771,704	13620,58	0,074591
233,3	45	685,959	12107,18	0,065344
259,2	50	617,363	10896,46	0,057732
285,1	55	561,239	9905,87	0,051287
311,0	60	514,469	9080,38	0,045698

Графическое изображение данных таблицы 7.13 приведено на рисунке 7.31.

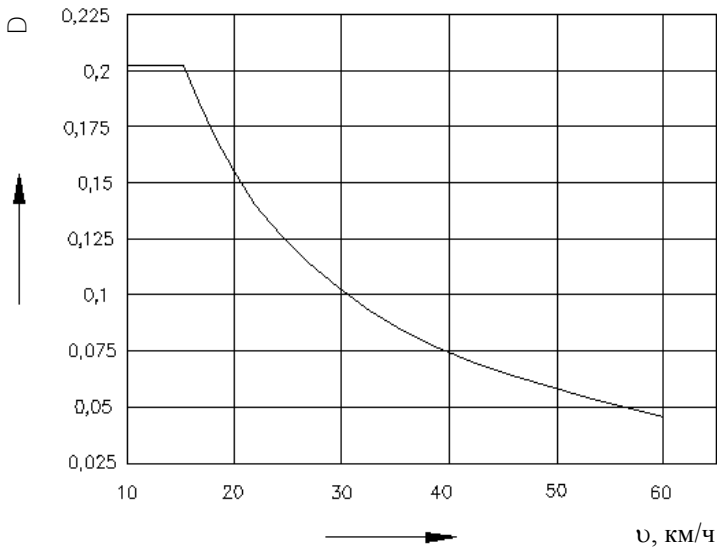


Рисунок 7.31 – Динамическая характеристика троллейбуса

Таким образом произведен расчет динамической характеристики предлагаемой конструкции троллейбуса, который позволяет определить его динамический фактор для любой скорости до 60 км/ч включительно, что характеризует тяговые и скоростные свойства рассмотренного троллейбуса.

Расчет динамической характеристики трамвая производится с использованием тех же формул по аналогичной методике. Следует только помнить, что сопротивление движению трамвая оценивается удельным сопротивлением, т. е., чтобы определить силу сопротивления движению F_f необходимо удельное сопротивление движению w умножить на вес G трамвая в килоньютонах[^]

$$F_f = wG.$$

7.4.8. Определение разгонных свойств подвижного состава

Время равномерного движения подвижного состава обычно невелико по сравнению с общим временем его движения. Так, в горо-

дах троллейбусы и трамваи движутся равномерно лишь 15–25 % от общего времени, от 30 до 45 % времени приходится на ускоренное движение и 30–40 % – на движение накатом (выбег) и торможение. Для достижения высокой средней скорости в таких условиях подвижной состав должен обладать высокими разгонными свойствами (приемистостью). Приемистость оценивается временем разгона до заданной скорости на заданном пути или за заданное время.

Ускорение при разгоне определяется для случая движения подвижного состава по горизонтальному участку дороги или рельсовому пути. Расчет ведется с использованием динамической характеристики подвижного состава, которая построена ранее (см. таблицу 7.13 и рисунок 7.31), по формуле

$$\ddot{x} = a = \frac{(D - \psi)g}{\delta_{п.м}}. \quad (7.41)$$

Затем строится график зависимости ускорения от скорости движения подвижного состава. Следует иметь в виду, что ускорение подвижного состава с целью обеспечения комфорта пассажиров ограничено и не должно превышать $a_{\max} \leq 1,8 \text{ м/с}^2$.

Пример 7.11

Построить график зависимости ускорения от скорости движения троллейбуса, динамическая характеристика которого представлена на рисунке 7.31 и в таблице 7.13, учитывая, что его коэффициент приведенной массы $\delta_{п.м} = 1,08$.

Решение

Ускорение при разгоне. Данные второй и пятой колонок таблицы 7.13 без изменений перенесем в первые две колонки новой таблицы 7.14. В последней колонке будем помещать результаты вычислений ускорения троллейбуса по формуле (7.41). Расчет удобнее вести в табличном процессоре Excel. Результаты расчета представлены в таблице 7.14 и на рисунке 7.32.

Таблица 7.13 – Зависимость ускорения троллейбуса от скорости его движения

Динамический фактор D		Скорость v , км/ч		Ускорение a , м/с ²	
0,201558	0,086206	0	35	1,467485	0,419705
0,201558	0,074591	5	40	1,467485	0,314202
0,201558	0,065344	10	45	1,467485	0,230208
0,201558	0,057732	15	50	1,467485	0,161066
0,153635	0,051287	20	55	1,032185	0,102524
0,122423	0,045698	25	60	0,748676	0,051757
0,101416		30		0,557862	

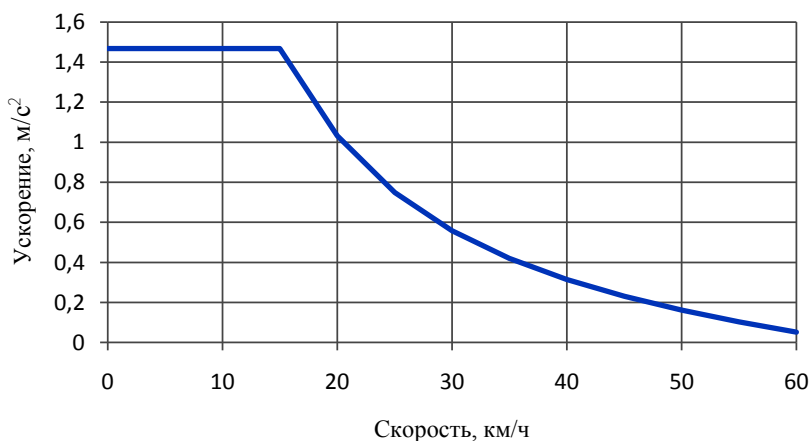


Рисунок 7.32 – Зависимость ускорения троллейбуса от его скорости

Результаты расчета показывают, что за время разгона ускорение троллейбуса не превышает $1,5 \text{ м/с}^2$, а при скорости 60 км/ч $a = 0,05 \text{ м/с}^2$, т. е. разгон практически закончен.

Время разгона. Время разгона зависит от квалификации водителя подвижного состава, который для достижения максимальной интенсивности разгона использует ускорения, близкие к допустимым. Разгон начинается с начальной скорости v_{\min} (при трогании подвижного состава $v_{\min} = 0$) и заканчивается при достижении подвижным составом заданной максимальной скорости v_{\max} или установившейся скорости $v_{\text{уст}}$. В последнем случае ускорение подвижного состава равно нулю: $a = 0$.

Для определения времени разгона полагают, что ускорение в каждом интервале изменения скорости постоянно. Тогда время разгона на i -м интервале

$$\Delta t_i = \frac{\Delta v_i}{3,6 a_{\text{ср}}}, \quad (7.42)$$

где Δv – изменение скорости на i -м интервале:

$$\Delta v = v_{i2} - v_{i1},$$

здесь v_{i1} и v_{i2} – соответственно скорости в начале и конце интервала, км/ч;

$a_{\text{ср}}$ – среднее значение ускорения на i -м интервале:

$$a_{\text{ср}} = (a_{i2} + a_{i1})/2,$$

здесь a_{i1} и a_{i2} – соответственно ускорения в начале и конце интервала.

Общее время разгона от v_{min} до v_{max} равно сумме составляющих Δt_i :

$$t_{\text{разг}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad (7.43)$$

где n – количество интервалов изменения скорости.

Пример 7.12

По данным предыдущего примера определить время разгона троллейбуса до скорости 60 км/ч и построить график изменения его скорости в зависимости от времени. Динамическая характеристика троллейбуса представлена на рисунке 7.31 и таблице 7.13, а изменение ускорения – в таблице 7.14 и на рисунке 7.32.

Решение

1. Воспользуемся результатами таблицы 7.14 и построим таблицу 7.15, поместив в первой колонке значения ускорений, а во второй – значения скоростей. Расчеты ведем в табличном процессоре Excel в соответствии с изложенной выше методикой по формулам (7.42) и (7.43) с учетом выражения для определения среднего уско-

рения на каждом интервале. Результаты расчета представлены в таблице 7.15 и на рисунке 7.33.

Таблица 7.15 – Изменение скорости движения троллейбуса в зависимости от времени разгона

$a, \text{ м/с}^2$	$v, \text{ км/ч}$	$a_{\text{ср}i}, \text{ м/с}^2$	$\Delta v_i, \text{ км/ч}$	Δt_i	Время, с
1	2	3	4	5	6
1,467485	0	1,467485	5	0,946442	0
1,467485	5	1,467485	5	0,946442	1,892883
1,467485	10	1,467485	5	0,946442	2,839325
1,467485	15	1,249835	5	1,111258	3,950582
1,032185	20	0,890431	5	1,559795	5,510378
0,748676	25	0,653269	5	2,12606	7,636438
0,557862	30	0,488784	5	2,841522	10,47796
0,419705	35	0,366954	5	3,784918	14,26288
0,314202	40	0,272205	5	5,102364	19,36525
0,230208	45	0,195637	5	7,099316	26,46457
0,161066	50	0,131795	5	10,53825	37,00286
0,102524	55	0,077141	5	18,00467	55,00759
0,051757	60	0,051757	5	26,8348	81,84239

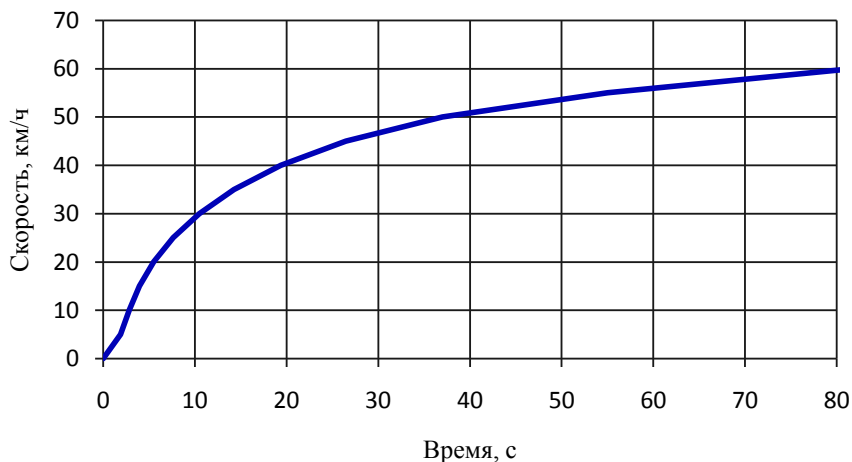


Рисунок 7.33 – Изменение скорости движения троллейбуса при его разгоне

Результаты расчета показали, что за 37,0 с троллейбус достигает скорости 50 км/ч, что несколько меньше нормативных требований. Разгон закончился за 80 с, т. е. троллейбус имеет удовлетворительную приемистость.

В рассмотренном примере решена задача анализа, т. е. определены разгонные свойства троллейбуса с известными конструктивными параметрами и характеристикой тягового электродвигателя в заданных условиях эксплуатации.

В результате расчета получена одна из характеристик разгонных свойств подвижного состава $v = f(t)$. Но скорость связана с динамическим фактором. Следовательно, можно построить график, который будет показывать, как изменяется динамический фактор при разгоне подвижного состава, рисунок 7.34.

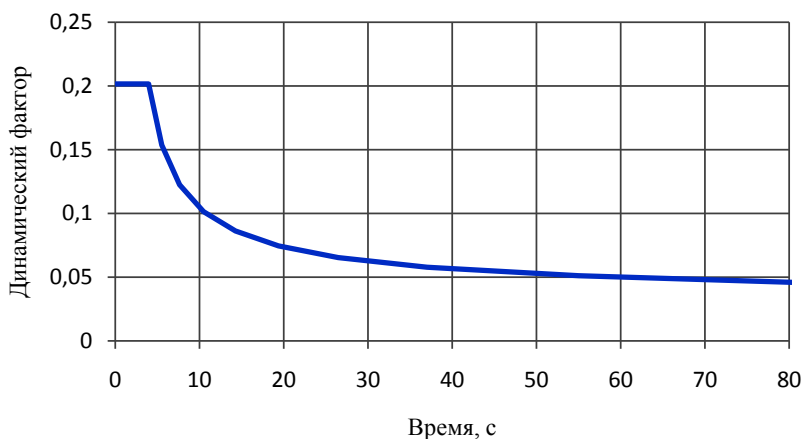


Рисунок 7.34 – Изменение динамического фактора при разгоне троллейбуса

График, представленный на рисунке 7.34, позволяет решить обратную задачу (задачу синтеза) – подобрать характер изменения крутящего момента тягового электродвигателя при разгоне троллейбуса таким образом, чтобы он разгонялся с заданной интенсивностью, например, за 25 с его скорость составила бы 50 км/ч. Для этого строится график, который отражает требуемые значения скорости в зависимости от времени при разгоне подвижного состава, т. е. требуемый график $v = f(t)$. Этот график позволит построить динамическую ха-

рактическую подвижного состава и зависимость изменения крутящего момента тягового электродвигателя при разгоне подвижного состава. Полученные таким образом характеристики будут соответствовать заданным разгонным свойствам подвижного состава.

Желаемый характер изменения крутящего момента при разгоне подвижного состава будет служить основой для проектирования системы управления тяговым электродвигателем.

Путь разгона. Для получения характеристики разгона $v = f(s)$ определяют приращение пути ΔS_i , проходимого подвижным составом на всех интервалах изменения скорости. При этом принимается допущение, что в каждом из этих интервалов подвижной состав движется с постоянной средней скоростью $v_{cp,i}$, которую определяют по формуле

$$v_{cp,i} = \frac{v_{1i} + v_{2i}}{2}, \quad (7.44)$$

где v_{1i} и v_{2i} – скорости соответственно в начале и конце каждого интервала, км/ч.

Тогда длина пути на каждом интервале

$$\Delta S_i = v_{cp,i} \Delta t_i / 3,6. \quad (7.45)$$

Полный путь подвижного состава за время разгона составит

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i, \quad (7.46)$$

где n – число интервалов изменения скорости.

Пример 7.13

По данным предыдущего примера построить вторую характеристику разгонных свойств троллейбуса, т. е. зависимость $v = f(s)$.

Решение

Используя данные таблицы 7.15, создаем новую таблицу 7.16, с помощью которой в табличном процессоре Excel ведем расчет по-

ставленной задачи по формулам (7.44)(7.46). Результаты расчетов представлены в таблице 7.16 и на рисунке 7.35.

Таблица 7.16 – Изменение скорости движения троллейбуса в зависимости от проходимого пути при разгоне

Скорость v_i , км/ч	Δt_i , с	Δs , м	Путь, м
0	0,946442	0	0
5	0,946442	0,657251	0,657251
10	0,946442	1,971753	2,629004
15	1,111258	3,858534	6,487539
20	1,559796	7,58234	14,06988
25	2,12606	13,28788	27,35776
30	2,841523	21,70608	49,06383
35	3,784923	34,16944	83,23328
40	5,102368	53,14966	136,3829
45	7,099322	83,81144	220,1944
50	10,53828	139,0468	359,2412
55	18,00473	262,569	621,8102
60	26,8348	428,6114	1050,422

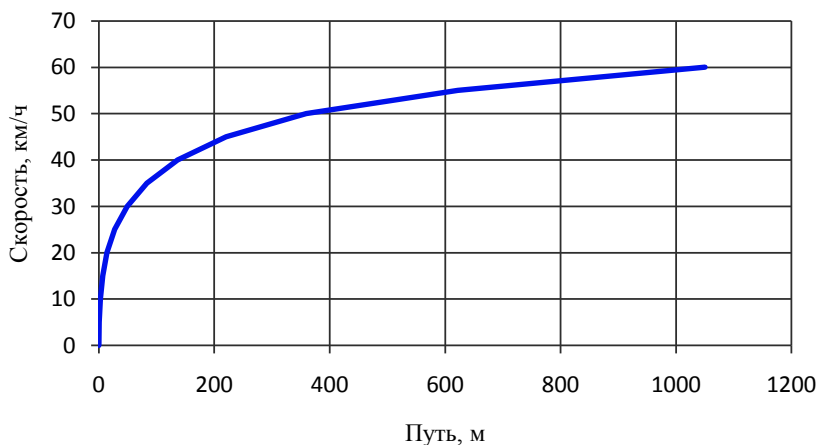


Рисунок 7.35 – Зависимость скорости движения от пути, проходимого при разгоне троллейбуса

Графики на рисунках 7.32 и 7.35 позволяют определить оценочные критерии разгонных свойств подвижного состава: время разгона на пути 400 м t_{400} и на пути 1000 м t_{1000} . Вначале по графику $v = f(s)$ находятся скорости v_{400} и v_{1000} , достигаемые на этих отрезках пути, а затем по графику $v = f(t)$ – искомые значения времени разгона. Так, для нашего примера $v_{400} = 51$ км/ч и $v_{1000} = 60$ км/ч. По графику на рисунке 7.33 определяем время разгона: $t_{400} = 37$ с и $t_{1000} = 80$ с.

Таким образом, построив графики $a = f(t)$, $v = f(t)$ и $v = f(s)$, можно определить разгонные свойства (приемистость) подвижного состава, а при их неудовлетворительных значениях – подобрать необходимое изменение крутящего момента тягового электродвигателя при разгоне и построить требуемую динамическую характеристику.

7.4.10. Определение величины преодолеваемого подъема

При анализе тягово-скоростных свойств определяют *максимальный продольный уклон* i_{\max} дороги или рельсового пути, который может быть преодолен подвижным составом при его равномерном движении на подъеме, а также *предельный уклон* $i_{\text{пред}}$, который он может преодолеть с разгона.

Значение максимального преодолеваемого уклона зависит от соотношения между максимальным динамическим фактором D_{\max} и динамическим фактором по сцеплению D_{ϕ} . Если выполняется условие $D_{\max} < D_{\phi}$, то i_{\max} определяется максимальным моментом тягового электродвигателя и вычисляется по формулам:

для троллейбуса

$$i_{\max} = D_{\max} - f,$$

для трамвая

$$i_{\max} = D_{\max} - \eta/1000.$$

Если выполняется условие $D_{\max} > D_{\phi}$, то преодоление максимального подъема i_{\max} ограничивается сцеплением ведущих колес с опорной поверхностью. В этом случае максимальный преодолеваемый подъем определяется по формулам:

для троллейбуса

$$i_{\max} = D_{\varphi} - f,$$

для трамвая

$$i_{\max} = D_{\varphi} - \omega/1000.$$

Динамический фактор по сцеплению D_{φ} для троллейбуса (задне-приводная машина) можно вычислить по приближенной формуле [11]

$$D_{\varphi} = \frac{\varphi k_{R2} a}{L},$$

где k_{R2} – коэффициент перераспределения нормальных реакций по мостам троллейбуса.

На дорогах с хорошим сцеплением ($\varphi = 0,6-0,8$) $k_{R2} = 1,1-1,3$; на скользких дорогах ($\varphi = 0,6-0,8$) перераспределение веса обычно не учитывают.

Динамический фактор по сцеплению D_{φ} для трамвая (полноприводная машина) равен коэффициенту сцепления ведущих колес с рельсами:

$$D_{\varphi} = \varphi.$$

Если требуется более точное определение величины преодолеваемого максимального подъема троллейбусом, используют условие, согласно которому движение троллейбуса без буксования ведущих колес обеспечивается при $R_{\chi 2} < \varphi R_{z2}$. Значения продольной $R_{\chi 2}$ и нормальной R_{z2} реакций определяют при равномерном движении троллейбуса без учета сопротивления качению и сопротивления воздуха:

$$R_{z2} = [(a \cos \alpha_d + h_c \sin \alpha_d)G + h_{кр} F_{кр}] / L,$$

где α – угол уклона дороги;

$h_{кр}$ и $F_{кр}$ – соответственно высота приложения крюкового усилия и крюковое усилие (для сочлененного троллейбуса).

Значение продольной реакции R_{x2} найдем из уравнения проекций сил на ось абсцисс, пренебрегая силами сопротивления качению:

$$R_{x2} = (G + G_{\text{тр}}) \sin \alpha_d,$$

где $G_{\text{тр}}$ = сила тяжести полуприцепа ($G_{\text{тр}} = m_{\text{тр}}g$).

Используя вышеприведенное условие и принимая во внимание, что $i = \text{tg} \alpha$, находим максимальный уклон, который может преодолеть сочлененный троллейбус без буксования ведущих колес:

$$i_{\text{max}} = \frac{\varphi a m}{m(L - \varphi h_c) + m_{\text{тр}}(L - \varphi h_{c,\text{тр}})}.$$

Для одиночного троллейбуса ($m_{\text{тр}} = 0$; $h_{c,\text{тр}} = 0$) предыдущее выражение примет вид

$$i_{\text{max}} = \frac{\varphi a}{L - \varphi h_c}.$$

Приведенные формулы для определения максимального подъема подвижным составом не учитывают сопротивления качению, поэтому из полученных по этим формулам значений следует вычесть значение коэффициента сопротивления качению (f – для троллейбуса и $1/1000$ – для трамвая).

Величина преодолеваемого подвижным составом угла подъема будет увеличена, если использовать его кинетическую энергию, накопленную до въезда на подъем. Такой подъем называют предельным уклоном $i_{\text{пред}}$. *Предельный уклон дороги или рельсового пути* – уклон, который на участке пути заданной длины вызывает снижение скорости от начальной v_0 , соответствующей скорости на горизонтальном участке, до критической скорости $v_{\text{кр}}$. Предельный уклон равен сумме максимального уклона i_{max} , преодолеваемого за счет работы тягового электродвигателя, и дополнительного уклона $i_{\text{доп}}$, преодолеваемого за счет использования накопленной подвижным составом кинетической энергии:

$$i_{\text{пред}} = i_{\text{max}} + i_{\text{доп}}.$$

Для определения дополнительного уклона используют теорему об изменении кинетической энергии, согласно которой изменение кинетической энергии подвижного состава равно работе силы тяжести при его подъеме на высоту $h_{\text{доп}}$:

$$\frac{1}{2} \delta_{\text{п.м}} m (v_{\text{кр}}^2 - v_0^2) = -mgh_{\text{доп}}. \quad (7.47)$$

Выражая дополнительную высоту $h_{\text{доп}}$ через путь s и дополнительный угол подъема $\alpha_{\text{доп}}$:

$$h_{\text{доп}} = s \sin \alpha_{\text{доп}}.$$

и учитывая, что дополнительный угол $\alpha_{\text{доп}}$ небольшой, когда можно принять $\sin \alpha_{\text{доп}} \approx \text{tg} \alpha_{\text{доп}} = i_{\text{доп}}$, окончательно получим:

$$h_{\text{доп}} = s i_{\text{доп}}. \quad (7.48)$$

Подставив (7.48) в (7.47), решим полученное выражение относительно $i_{\text{доп}}$:

$$i_{\text{доп}} = \frac{\delta_{\text{п.м}} (v_0^2 - v_{\text{кр}}^2)}{2gs}. \quad (7.49)$$

Анализируя формулу (7.49), заметим, что величина дополнительного подъема не зависит от сцепления колес с дорогой или рельсами, т. к. работа, затрачиваемая на преодоление дополнительного подъема, выполняется за счет изменения кинетической энергии подвижного состава без взаимодействия ведущих колес с опорной поверхностью. По формуле (7.49) можно определить дополнительный преодолеваемый подъем $i_{\text{доп}}$ при заданном пути s или путь s , на котором скорость движения подвижного состава понизится от v_0 до $v_{\text{кр}}$.

Пример 7.14

Определить максимальную и предельную величину уклона, которую может преодолеть сочлененный троллейбус и трамвай в дождливую погоду.

Параметры сочлененного троллейбуса: масса троллейбуса $m = 18$ т; база троллейбуса $L = 6,04$ м; высота расположения центра масс $h_c = 1,5$ м; на передний мост приходится 6 т; высота расположения точки сцепки $h_{кр} = 0,3$ м; масса полуприцепа $m_{пр} = 6$ т. Троллейбус движется по асфальтовой дороге в удовлетворительном состоянии, его скорость на горизонтальном участке дороги составляла $v_0 = 46$ км/ч. После прохождения пути $s = 158$ м на подъем скорость троллейбуса снизилась до $v_{кр} = 38$ км/ч.

Параметры трамвая: масса $m = 17,5$ т; база $L = 7,5$ м; высота центра масс над головкой рельса $h_c = 1,75$ м. Скорость трамвая на горизонтальном участке пути равнялась $v_0 = 52$ км/ч. После прохождения пути $s = 378$ м на подъем скорость трамвая составила $v_{кр} = 35$ км/ч.

Коэффициенты приведенных масс троллейбуса и трамвая $\delta_{п.м} = 1,08$.

Р е ш е н и е

1. Рассмотрим движение сочлененного троллейбуса. По приложениям 2 и 3 устанавливаем значения коэффициентов сопротивления качению $f = 0,018$ и сцепления $\varphi = 0,53$.

Определяем вес троллейбуса G , нормальную нагрузку на задний мост G_2 и координату a центра масс:

$$G = mg = 18 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 1,766 \cdot 10^5, \text{ Н};$$

$$G_2 = G - m_1 g = 1,766 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 1,177 \cdot 10^5, \text{ Н};$$

$$a = \frac{G_2}{G} L = \frac{1,177 \cdot 10^5}{1,766 \cdot 10^5} \cdot 6,04 = 4,026, \text{ м}.$$

2. Рассчитываем максимальный уклон i_{\max} , который может преодолеть сочлененный троллейбус в заданных условиях эксплуатации:

$$i_{\max} = \frac{\varphi a m}{m(L - \varphi h_c) + m_{пр}(L - \varphi h_{пр})} - f =$$

$$= \frac{0,53 \cdot 4,026 \cdot 18 \cdot 10^3}{18 \cdot 10^3 \cdot (6,04 - 0,53 \cdot 1,5) + 6 \cdot 10^3 \cdot (6,04 - 0,53 \cdot 1,5)} - 0,018 = 0,287 = 16,4^\circ.$$

3. Вычислим дополнительный уклон, преодолеваемый сочлененным троллейбусом с разгона:

$$i_{\text{доп}} = \frac{\delta_{\text{п.м}}(v_0^2 - v_{\text{кр}}^2)}{2gs} = \frac{1,08 \cdot \left(\left(\frac{46}{3,6} \right)^2 - \left(\frac{38}{3,6} \right)^2 \right)}{2 \cdot 9,81 \cdot 158} = 0,018 = 1,031^\circ.$$

4. Предельный преодолеваемый уклон сочлененным троллейбусам в дождливую погоду

$$i_{\text{пред}} = i_{\text{max}} + i_{\text{доп}} = 16,4^\circ + 1,03^\circ = 17,7^\circ.$$

5. Выполним аналогичные расчеты для трамвая. По приложениям 4 и 5 находим коэффициент сцепления $\phi = 0,26$ и основное удельное сопротивление движению трамвая $w = 1,2$.

6. Нормальная нагрузка по тележкам трамвая распределяется равномерно, поэтому координата центра масс $a = L/2 = 7,5/2 = 3,75$ м. Теперь можно определить максимальный уклон, который сможет преодолеть трамвай:

$$i_{\text{max}} = \frac{\phi a}{L - \phi h_c} - \frac{w}{1000} = \frac{0,26 \cdot 3,75}{7,5 - 0,26 \cdot 1,75} - \frac{1,2}{1000} = 0,137 = 7,85^\circ.$$

7. Найдем дополнительный уклон, преодолеваемый трамваем с ходу:

$$i_{\text{доп}} = \frac{\delta_{\text{п.м}}(v_0^2 - v_{\text{кр}}^2)}{2gs} = \frac{1,08 \cdot \left(\left(\frac{52}{3,6} \right)^2 - \left(\frac{35}{3,6} \right)^2 \right)}{2 \cdot 9,81 \cdot 378} = 0,017 = 0,974^\circ.$$

8. Предельный уклон

$$i_{\text{пред}} = i_{\text{max}} + i_{\text{доп}} = 7,85^\circ + 0,974^\circ = 8,824^\circ.$$

Таким образом определены максимальные, дополнительные и предельные уклоны, которые смогут преодолеть сочлененный троллейбус и трамвай в дождливую погоду.

7.4.11. Индивидуальное задание

Каждому студенту выдается индивидуальное задание по определению критериев оценки заданного эксплуатационного свойства подвижного состава с известными конструктивными параметрами или требуется определить конструктивные параметры подвижного состава, позволяющие ему двигаться в определенных условиях эксплуатации с нормативными критериями оценки заданного эксплуатационного свойства.

При выполнении индивидуального задания рекомендуется применять программы для ПЭВМ, которые использовались при выполнении лабораторных работ [5]. Иногда в качестве индивидуального задания может быть выдано разработка программы для компьютера с целью решения задачи анализа или синтеза.

7.4.12. Заключение

В разделе «Заключение» в сжатом виде формулируют основные полученные результаты (по этапам выполнения курсовой работы), желательно с указанием их новизны, численных значений, преимущества и возможности применения. При необходимости следует указать границы применимости полученных результатов.

7.4.13. Предметный указатель

Пояснительную записку по курсовой работе целесообразно снабдить предметным указателем, который облегчает пользование запиской, повышает ее издательскую культуру. Предметный указатель составляется автоматически средствами *MS Word*.

В предметный указатель включаются основные термины и понятия, встречающиеся в пояснительной записке. В предметном указателе рядом с термином в именительном падеже проставляются номера страниц записки, на которых этот термин встречается.

Термины в предметном указателе пишутся в два столбца и располагаются строго в алфавитном порядке не только по первой букве, но и по всем последующим. Группу терминов, начинающихся с одинаковой буквы, от последующей группы терминов, начинающихся со следующей буквы алфавита, отделяют пробелом и над

группой терминов ставят эту начальную букву алфавита, набранную полужирным шрифтом, как заголовок. Между терминами и номерами страниц никаких знаков (тире, запятая) не ставятся.

Термины, состоящие из нескольких слов (например «Тяговый электродвигатель»), помещают в предметном указателе дважды («Тяговый электродвигатель» и «Электродвигатель тяговый»), причем в одном из случаев указывают номера страниц, а во втором – делают ссылку. Например:

Тяговый электродвигатель 11, 15.

.....

Электродвигатель тяговый, см. тяговый электродвигатель.

Слова в предметном указателе, которые повторяют слова предыдущей строки, заменяют знаком тире (одно слово заменяют одним знаком тире, два слова – двумя тире и т. д.). Замена знаками тире более трех слов не допускается. Приведем пример правильного составления предметного указателя для последнего случая:

Вал 7, 8, 20

– быстро вращающийся 5

– полый 15, 18

– карданный 8, 11, 14

7.4.14. Список использованных источников

В этом разделе приводится список литературы, использованной студентом при выполнении курсовой работы, в том числе и информация, полученная в *Internet*. При использовании материалов, опубликованных в *Internet*, указываются адрес сайта и страницы.

Список использованных источников оформляется в соответствии с нормативными документами [15].

На **каждый использованный источник информации должна быть ссылка** в пояснительной записке к курсовой работе с указанием страницы, откуда была взята информация. Ссылки в тексте пояснительной записки на использованные источники следует приводить в квадратных скобках, которые нумеруются согласно порядку цитирования в тексте записки.

7.4.15. Приложения

В раздел «Приложения» включается вспомогательный материал, позволяющий более полно раскрыть содержание курсовой работы и оценки их значимости. Число приложений определяется студентом. В этот раздел включаются:

- промежуточные математические формулы, их вывод и расчеты;
- исходные тексты компьютерных программ и их краткое описание;
- таблицы и иллюстрации вспомогательного характера;
- копии патентов и чертежей, которые использовались при выполнении курсовой работы.

7.5. Темы курсовых работ

1. Тягово-динамический расчет одиночного троллейбуса на 60 пассажиров. Индивидуальное задание «Взаимодействие звеньев трамвайного поезда при торможении».

2. Тягово-динамический расчет одиночного троллейбуса на 65 пассажиров. Индивидуальное задание «Взаимодействие звеньев трамвайного поезда при синхронном и не синхронном срабатывании тормозов его звеньев».

3. Тягово-динамический расчет одиночного трамвая на 70 пассажиров. Индивидуальное задание «Расчет колебаний трамвая при движении по неровностям рельсового пути».

4. Тягово-динамический расчет одиночного трамвая на 75 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование колебаний трамвая с различной загрузкой салона при движении по неровностям рельсового пути».

5. Тягово-динамический расчет одиночного троллейбуса на 80 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование кинематики шестизвенной рулевой трапеции в зависимости от параметров среднего звена (длины рулевой сошки, эксцентриситета, расположения поворотной оси)».

6. Тягово-динамический расчет одиночного троллейбуса на 85 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование радиальной жесткости шины 300–508 в зависимости от давления воздуха в ней и нагрузки на колесо».

7. Тягово-динамический расчет одиночного троллейбуса на 88 пассажиров. Индивидуальное задание «Расчет величины момента сопротивления повороту шины в зависимости от нагрузки на колесо и давления воздуха в шине при неподвижном троллейбусе».

8. Тягово-динамический расчет одиночного троллейбуса на 90 пассажиров. Индивидуальное задание «Расчет допустимых скоростей движения трамвая по стрелочным переводам (кривым)».

9. Тягово-динамический расчет одиночного троллейбуса на 95 пассажиров. Индивидуальное задание «Расчет координат центра масс троллейбуса в зависимости от загрузки салона».

10. Тягово-динамический расчет одиночного троллейбуса на 100 пассажиров. Индивидуальное задание «Определение частот колебаний кузова троллейбуса относительно переднего и заднего мостов при номинальной загрузке салона».

11. Тягово-динамический расчет одиночного троллейбуса на 102 пассажира. Индивидуальное задание «Расчет коэффициента сопротивления уводу шины 300–508 в зависимости от нагрузки на колесо и давления воздуха в шине».

12. Тягово-динамический расчет одиночного троллейбуса на 105 пассажиров. Индивидуальное задание «Расчет коридора движения одиночного троллейбуса с идеальной рулевой трапецией».

13. Тягово-динамический расчет одиночного троллейбуса на 110 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование разгона трамвая в зависимости от не синхронности пуска тяговых электродвигателей тележек».

14. Тягово-динамический расчет сочлененного троллейбуса на 115 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование устойчивости движения двухосного троллейбуса при различной загрузке салона».

15. Тягово-динамический расчет сочлененного троллейбуса на 120 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование устойчивости движения двухосного троллейбуса в зависимости от положения его центра масс».

16. Тягово-динамический расчет сочлененного троллейбуса на 125 пассажиров. Индивидуальное задание «Выбор тягового электродвигателя и построение динамической характеристики проектируемого троллейбуса»

17. Тягово-динамический расчет сочлененного троллейбуса на 130 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование устойчивости движения пассажирского полуприцепа троллейбуса в зависимости от положения его центра масс».

18. Тягово-динамический расчет сочлененного троллейбуса на 135 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование устойчивости движения сочлененного троллейбуса по устойчивости движения пассажирского полуприцепа в зависимости от положения центра масс полуприцепа».

19. Тягово-динамический расчет сочлененного троллейбуса на 140 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование разгона троллейбуса в зависимости от загрузки салона».

20. Тягово-динамический расчет сочлененного троллейбуса на 145 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование разгона троллейбуса в зависимости от уклона дороги».

21. Тягово-динамический расчет сочлененного троллейбуса на 150 пассажиров. Индивидуальное задание «Построить АЧХ троллейбуса при различной загрузке салона».

22. Тягово-динамический расчет сочлененного троллейбуса на 155 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование колебаний троллейбуса с различной загрузкой салона при движении по неровностям дороги».

23. Тягово-динамический расчет сочлененного троллейбуса на 160 пассажиров. Индивидуальное задание «Разработать программу и исследовать процесс торможения троллейбуса механическими тормозами (двумя мостами, только передним или только задним мостами)».

24. Тягово-динамический расчет сочлененного троллейбуса на 165 пассажиров. Индивидуальное задание «Расчет коридора движения сочлененного троллейбуса с идеальной рулевой трапецией».

25. Тягово-динамический расчет сочлененного троллейбуса на 170 пассажиров. Индивидуальное задание «Вывести уравнения, разработать программу и исследовать процесс колебаний сочлененного троллейбуса при движении по неровностям дороги».

26. Тягово-динамический расчет одиночного трамвая на 80 пассажиров. Индивидуальное задание «Построение характеристики дизельного двигателя».

27. Тягово-динамический расчет одиночного трамвая на 100 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование торможения трам-

вая механическими тормозами при синхронном и несинхронном срабатывании механических тормозов тележек».

28. Тягово-динамический расчет одиночного трамвая на 105 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование взаимодействия звеньев трамвайного поезда при синхронном и не синхронном торможении вагонов».

29. Тягово-динамический расчет одиночного трамвая на 110 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование разгона троллейбуса при различных коэффициентах сцепления колес ведущего моста с дорогой».

30. Тягово-динамический расчет одиночного трамвая на 120 пассажиров. Индивидуальное задание «Методика расчета допускаемых скоростей движения трамвая по стрелочным переводам (кривым)».

31. Тягово-динамический расчет одиночного трамвая на 130 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование кинематики четырехзвенной рулевой трапеции и оптимизация длины рулевых рычагов и угла их установки».

32. Тягово-динамический расчет одиночного трамвая на 150 пассажиров. Индивидуальное задание «Исследование плавности хода троллейбуса на асфальтовой дороге в удовлетворительном состоянии при различной загрузке салона».

33. Тягово-динамический расчет одиночного трамвая на 155 пассажиров. Индивидуальное задание «Выбор тягового электродвигателя и построение динамической характеристики проектируемого трамвая».

34. Тягово-динамический расчет сочлененного трамвая на 180 пассажиров. Индивидуальное задание «Решение систем дифференциальных уравнений, содержащих несколько производных в одном уравнении».

35. Тягово-динамический расчет сочлененного трамвая на 200 пассажиров. Индивидуальное задание «Расчет момента инерции колеса с шиной и колесной пары».

36. Тягово-динамический расчет сочлененного трамвая на 220 пассажиров. Индивидуальное задание «Аппроксимация зависимости коэффициента сцепления колеса с рельсом гиперболическими функциями».

37. Тягово-динамический расчет сочлененного трамвая на 240 пассажиров. Индивидуальное задание «Моделирование микронеровностей рельсового пути с учетом стыков (разработать программу)».

38. Тягово-динамический расчет сочлененного трамвая на 245 пассажиров. Индивидуальное задание «Рельсовый путь и его основные характеристики».

39. Тягово-динамический расчет сочлененного трамвая на 250 пассажиров. Индивидуальное задание «Определение вида статической поворачиваемости троллейбуса с задним ведущим мостом в зависимости от загрузки салона».

40. Тягово-динамический расчет сочлененного трамвая на 255 пассажиров. Индивидуальное задание «Справочно-информационные системы подвижного состав ГЭТ».

41. Тягово-динамический расчет сочлененного трамвая на 260 пассажиров. Индивидуальное задание «Определение вида статической поворачиваемости троллейбуса с передними ведущими колесами в зависимости от загрузки салона».

Литература

1. Богдан, Н.В. Троллейбус. Теория, конструирование, расчет / Н.В. Богдан, Ю.Е. Атаманов, А.И. Сафонов; под ред. Н.В. Богдана. – Минск: Ураджай, 1999. – 345 с.
2. Теория, конструирование и расчет подвижного состава. Трамвай / Н.В. Богдан [и др.]; под ред. В.П. Бойкова. – Минск: БНТУ, 2008. – 473 с.
3. Атаманов, Ю.Е. Теория подвижного состава. Трамвай / Ю.Е. Атаманов, К.И. Мазаник. – Минск: БНТУ, 2008. – 388 с.
4. Конструкции подвижного состава. Трамвай / Н.В. Богдан [и др.]; под ред. В.П. Бойкова. – Минск: БНТУ, 2008. – 366 с.
5. Теория подвижного состава: лабораторные работы (практикум) для студентов специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт» / сост.: Ю.Е. Атаманов, К.И. Мазаник. – Минск: БНТУ, 2005. – 174 с..
6. Атаманов, Ю.Е. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Теория подвижного состава» для студентов специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт» [Электронный ресурс] / Ю.Е. Атаманов, К.И. Мазаник. Регистрационный номер БНТУ/АТФ014-47 2005. Протокол № 3 от 18.10.95 г. – Минск: БНТУ, 2005, 89 с.
7. Литвинов, А.С. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
8. Самойлов, Д.С. Городской транспорт / Д.С. Самойлов, В.А. Юдин. – М., 1975.
9. Вешеневский, С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – 422 с..
10. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов. – Минск: ДизайнПРО, 2004. – 640 с.
11. Тарасик, В.П. Теория автомобилей и двигателей: учебное пособие / В.П. Тарасик, М.П. Бренч. – Минск: Новое знание, 2004. – 400 с.
12. Проскурин, А.И. Теория автомобиля. Примеры и задачи: учебное пособие / А.И. Проскурин. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 200 с.

Нормативные документы

13. Транспорт дорожный. Основные термины и определения. Классификация: СТБ 1277–2001.
14. Отчет о научно-исследовательской работе: ГОСТ 7.1–2001.
15. Библиографическое описание документа: ГОСТ 7.1–2003.
16. Унифицированные системы документации Республики Беларусь. Система организационно-распорядительной документации. Требования к оформлению документов». СТБ 6.38–2004.

Приложения

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Массы некоторых узлов и агрегатов подвижного состава

Масса тягового электродвигателя	$m_{дв} = 800-900$ кг
Масса переднего управляемого моста с колесами	$m_{пм} = 500-550$ кг
Масса заднего ведущего моста с колесами	$m_{зм} = 900-1000$ кг
Масса ведущей тележки четырехосного трамвая	$m_{т} = 4500-4700$ кг
Масса поддерживающей низкопольной тележки	$m_{тн} = 1000-1200$ кг
Масса пассажирского сидения	$m_{сид} = 8-10$ кг
Компрессор	$m_{кмп} = 90-100$ кг
Пантограф	$m_{пант} = 330-345$ кг

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Коэффициенты сопротивления качению f шины

Дорожные условия	f
Асфальтобетонная дорога: в хорошем состоянии	0,007–0,015
в удовлетворительном состоянии	0,015–0,020
Обледенелая дорога	0,015–0,030
Укатанная снежная дорога	0,030–0,050
Рыхлый снег	0,10–0,20

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Коэффициенты сцепления ϕ_x шины с дорогой и аппроксимирующей экспоненты ϕ_{max} и k

Дорожные условия	ϕ_x	ϕ_{max}	k
Сухой асфальт и бетон	0,70–0,80	0,76	23,89
Мокрый асфальт и бетон	0,45–0,60	0,55	18,48
Обледенелая дорога	0,07–0,15	0,11	5,58
Укатанная снежная дорога	0,15–0,20	0,12	6,87

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Коэффициенты сцепления колесной пары с рельсом

Состояние поверхности рельсов	Режим тяги			Режим торможения		
	max	среднее	min	max	среднее	min
Сухая обезжиренная	0,84	0,58	0,32	0,240	0,167	0,091
Чистая, политая водой	0,61	0,41	0,20	0,174	0,113	0,052
Замасленная	0,24	0,16	0,08	0,068	0,046	0,023

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Удельные сопротивления качению колесной пары при качении по рельсовому пути, Н/кН

От трения качения колесной пары по рельсу	0,3–0,6
Сопротивление движению трамвая с роликовыми под- шипниками качения колесных пар	0,01–0,02
От трения скольжения колесной пары по рельсу	0,1
От неправильного формирования колесных пар и уста- новки их в тележки	0,2
От влияния вагона	0,15
От ударов колесной пары на стыках рельсов	0,3–0,6

Общее удельное сопротивление движению трамвая, Н/кН, на уклоне $\pm i, \%$, с расположенной на нем кривой радиусом R

$$W = W_0 \pm i + W_R,$$

где W_0 – удельное основное средневзвешенное сопротивление трамвая;

W_R – удельное сопротивление движению трамвая в кривых: $W_R = 450/R$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

**Коэффициенты аппроксимирующей экспоненты φ_{\max} и k
для колесной пары и различного состояния рельса**

$$\varphi = \varphi_{\max}(1 - e^{-k\delta})$$

Состояние рельса	φ_{\max}	k
Сухой, чистый, обезжиренный	0,57	194,23
Сухой, чистый	0,51	138,96
Чистый, политый водой	0,42	301,32
Мокрый с подачей песка	0,24	245,59
Чистый, сухой с подачей песка	0,61	156,27
Замасленный рельс	0,16	148,97

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

**Нормы виброускорений и виброскоростей для троллейбусов
в октавных полосах при длительности рабочего дня 8 часов**

Средние геометрические значения частот в полосах, Гц	1	2	4	8	16	31,5	63
Допустимые значения виброускорений, м/с^2 :							
вертикальных	1,10	0,79	0,57	0,60	1,14	2,26	4,49
горизонтальных	0,39	0,42	0,80	1,62	3,20	6,38	12,76
Допустимые значения виброскоростей, м/с :							
вертикальных	0,020	0,071	0,025	0,013	0,011	0,011	0,011
горизонтальных	0,063	0,035	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Величины средних и наибольших значений коэффициентов динамики, ускорений и показателей плавности хода трамвая

Оценка плавности хода вагона	Коэффициент динамики K_d		Ускорение вагона, m/c^2		Показатель плавности хода
	вертикальное	горизонтальное	вертикальное	горизонтальное	
Отличная	до 1	до 0,05	1,0	0,5	до 1
Хорошая	0,10–0,15	0,05–0,10	1,0–1,5	0,5–1,0	до 2
Удовлетворительная (допустимая для пассажирских вагонов)	0,16–0,20	0,11–0,15	1,6–2,0	1,1–2,0	до 3,25
Допустимая (для грузовых вагонов)	0,21–0,35	0,16–0,25	2,1–3,5	2,1–3,0	до 4
Непригодная для регулярного движения (по воздействию на конструкцию и организм человека)	0,36 и более	0,26 и более	3,6 и более	3,1 и более	до 5
Небезопасная при длительном движении (по устойчивости вагон и воздействию на организм человека)	Более 0,7	Более 0,4	Более 7	Более 5,0	Более 5,0

Образец титульного листа

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Автотракторный факультет

Кафедра «Тракторы»

Группа 101154

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине
«Теория подвижного состава»

*ТЯГОВО-ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРОЛЛЕЙБУСА
НА 60 ПАССАЖИРОВ.*

*ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ: ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗВЕНЬЕВ
ТРАМВАЙНОГО ПОЕЗДА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ*

Выполнил студент _____ И.И. Ива-
нов

(подпись, дата)

Принял _____ В.Н.
Плищ

(подпись, дата)

Минск 20__

Предметный указатель

Бланк задания	152
Введение	154
Время, отводимое на изучение дисциплины	15
Габаритная площадь	158
Диагностика компетенций студента	145
Динамическая характеристика	235
Динамический фактор	234
Задача курсовой работы	147
Задачи	26
Защита курсовой работы	150
Защита отчета	23
Исходные данные к лабораторным работам	22
Коэффициент приведенной массы	234
КПД трансмиссии	180
Лабораторная работа	21
Максимальная скорость	179
Маневренность	14
Метод эквивалентного момента	198
Метод эквивалентного тока	197
Метод эквивалентной мощности	198
Наибольшие значения температур	191
Определение нагрузки на ходовую часть	171
Определение потребной мощности ТЭД	178
Отчет	23
Пассажировместимость	157
Передаточное число трансмиссии	181
Плавность хода	14
Планировочная задача салона	160
Подвижной состав	9
Подготовка к лабораторным занятиям	21
Полезная площадь	157
Полная масса	156
Потенциальные свойства	13
Практические работы	25
Пределы изменения параметров трамваев	12
Пределы изменения параметров троллейбусов	10
Примерный тематический план	15
	235

Продолжительная мощность	192
Продолжительный ток	192
Проходимость	15
Расчет электродвигателя на нагрев	195
Расчетный радиус колеса	182
Результирующий график	22
Реферат	153
Свойства надежности	13
Скоростная характеристика	203
Снаряженная масса	155
Содержание	154
Содержание курсовой работы	147
Сопротивление дороги	180
Средний квадратический ток	193
Средний ток	193
Структура пояснительной записки	148
Студент должен уметь	8
Тематика лабораторных работ	24
Теория подвижного состава	8
Технические характеристики ПС	10
Титульный лист	152
Тормозные свойства	14
Трамвай	10
Троллейбус	10
Тяговая характеристика	203
Тягово-скоростные свойства	14
Управляемость	14
Устойчивость	14
Функциональные свойства	13
Характеристики тягового электродвигателя	202
Цель курсовой работы	146
Цель учебно-методического пособия	8
Часовая мощность	192
Часовой ток	192
Эквивалентный момент	198
Эквивалентный по превышению температуры ток	193
Эквивалентный ток по теплоте	193
Эксплуатационные свойства	8, 13
Электромеханическая характеристика	202

Учебное издание

АТАМАНОВ Юрий Евгеньевич
ПЛИЩ Владимир Николаевич

ТЕОРИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-37 01 05
«Городской электрический транспорт»

Редактор Т.Н. Микулик
Компьютерная верстка Н.А. Школьниковой

Подписано в печать 2012.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100. Заказ 759.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.