

Министерство образования Республики Беларусь  
Филиал БНТУ  
«Минский государственный политехнический колледж»

Электронное учебно-методическое пособие по учебной дисциплине

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА**

для специальности 2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

Минск  
2019

**Автор:**  
Метлицкая О.А.

**Рецензенты:**

Тозик Е.Ф., преподаватель высшей категории филиала БНТУ МГПК  
Новаш И.В., заведующей кафедрой «Электрические станции» БНТУ, к.т.н., доцент

Учебно-методическое пособие предназначено для самостоятельного и дистанционного изучения учебной дисциплины «Электрическая тяга» для специальности 2-37 01 05 «Городской электрический транспорт». В учебно-методическом пособии представлен теоретический и практический материал, а также материал, обеспечивающий контроль знаний для проведения текущей и итоговой аттестации.

Белорусский национальный технический университет.  
Филиал БНТУ “Минский государственный политехнический колледж”.  
пр. - т Независимости, 85, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: (017) 292-13-42 Факс: 292-13-42  
E-mail: mgpk@bntu.by  
<http://www.mgpk.bntu.by>  
Регистрационный № БНТУ / МГПК – 105.2019

## Содержание

[Пояснительная записка](#)

[Выписка из учебного плана](#)

[Междисциплинарные связи](#)

[Учебная программа учебной дисциплины](#)

[Тематический план](#)

[Содержание программы](#)

[Критерии оценки результатов учебной деятельности учащихся](#)

[Литература](#)

[Перечень существенных и несущественных ошибок](#)

[Перечень разделов и тем учебной программы](#)

[Теоретический материал](#)

[Практический материал](#)

[Самоконтроль знаний](#)

[Примерный перечень вопросов по дисциплине](#)

[Перечень учебных изданий и информационно-аналитических материалов, рекомендуемых для изучения учебной дисциплины](#)

## Пояснительная записка

Электронное учебно-методическое пособие по учебной дисциплине «Электрическая тяга» может использоваться преподавателями, учащимися дневной и заочной формы получения образования для самостоятельного и дистанционного изучения материала учебной дисциплины. В данном электронном учебно-методическом пособии используются теоретический материал, практический материал, вопросы для самоконтроля, вопросы к обязательной контрольной работе и экзамену.

Для работы с данным пособием рекомендуется посмотреть содержание. Через него можно просмотреть все пособие вместе с нормативной документацией.

Учебная дисциплина «Электрическая тяга» предусматривает изучение элементов электрической тяги, тяговых характеристик транспортного средства и системы торможения транспортного электрофицированного средства.

Изучение программного учебного материала базируется на знаниях, умениях и навыках, полученных учащимися в ходе изучения таких учебных дисциплин, как «Основы электропривода», «Основы промышленной электроники», «Электрические аппараты», «Электрические машины». Цель изучения учебной дисциплины – приобретение учащимися знаний о тяговых электродвигателях, их основных элементах, характеристиках, требованиях, предъявляемых к ним, видам торможения, используемых на городском электрическом транспорте.

Знания, полученные при изучении учебной дисциплины «Электрическая тяга», необходимы для принятия оптимальных решений при выполнении производственных задач по обслуживанию электрооборудования транспортных средств, для изучения специальных учебных дисциплин «Электрооборудование городского электрического транспорта (ГЭТ)», «Электрооборудование производственных механизмов организаций ГЭТ» и будут востребованы учащимися в самостоятельной производственной деятельности. Для закрепления теоретического материала и формирования у учащихся необходимых умений и навыков учебной программой предусмотрено проведение практических занятий, которые целесообразно выполнять после изучения соответствующих тем.

Для контроля усвоения программного учебного материала предусмотрено проведение одной обязательной контрольной работы.

Учебной программой определены цели изучения каждой темы, спрогнозированы результаты их достижения в соответствии с уровнями усвоения учебного материала.

В результате изучения учебной дисциплины учащиеся  
*знать на уровне представления:*

классификацию транспортных средств городского электрического транспорта, основные направления развития тягового привода,

принципиальные схемы тягового привода;

требования «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ), «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТЭ), «Правил технической эксплуатации троллейбуса», «Правил технической эксплуатации трамвая».

*знать на уровне понимания:*

режимы движения транспортных средств городского электрического транспорта;

общее устройство и тяговые характеристики транспортных средств городского электрического транспорта;

способы пуска тягового двигателя;  
системы торможения транспортных средств городского электрического транспорта.

*уметь:*

рассчитывать силы тяги и торможения транспортных средств;  
вычислять и строить электромеханические характеристики тяговых двигателей;

читать схемы включения тягового двигателя;

пользоваться справочной литературой.

## Выписка из учебного плана специальности

2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

Учебная дисциплина «Электрическая тяга» изучается на протяжении одного семестра (дневная форма обучения)

Виды работ	Количество часов
	5 семестр обучения
Всего часов	60
Из них: практических занятий	10
Количество: Обязательных контрольных работ	1
Экзамен	1

## **Междисциплинарные связи**

«Информационные технологии»

«Электрические измерения»

«Электрические машины»

«Основы промышленной электроники»

«Основы автоматики и микропроцессорной техники»

«Основы электропривода»

«Электрооборудование ГЭТ»

«Электрооборудование производственных механизмов организаций ГЭТ»

«Системы автоматического управления электроприводами»

«Электрические аппараты»

«Охрана труда»

Министерство образования Республики Беларусь  
Филиал БНТУ  
«Минский государственный политехнический колледж»

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор филиала БНТУ «МГПК»

\_\_\_\_\_ С.А. Квасюк

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА  
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА»**

Специальность 2 – 37 01 05 «Городской электрический  
транспорт»

Минск  
2018



Разработчик

О.А. Метлицкая

Рецензент

В.А. Горюнова

Учебная программа разработана на основании примерного тематического плана по учебной дисциплине, утвержденного вместе с типовым учебным планом специальности РБ ст. №658 Д/тип, от 09.06.2015 №58

Учебная программа обсуждена и одобрена Советом филиала БНТУ «Минский государственный политехнический колледж»

Протокол № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2018

## Пояснительная записка

Учебная программа по учебной дисциплине «Электрическая тяга» предусматривает изучение элементов электрической тяги, тяговых характеристик транспортного средства и системы торможения транспортного электрофицированного средства.

Изучение программного учебного материала базируется на знаниях, умениях и навыках, полученных учащимися в ходе изучения таких учебных дисциплин, как «Основы электропривода», «Основы промышленной электроники», «Электрические аппараты», «Электрические машины».

Цель изучения учебной дисциплины – приобретение учащимися знаний о тяговых электродвигателях, их основных элементах, характеристиках, требованиях, предъявляемых к ним, видам торможения, используемых на городском электрическом транспорте.

Знания, полученные при изучении учебной дисциплины «Электрическая тяга», необходимы для принятия оптимальных решений при выполнении производственных задач по обслуживанию электрооборудования транспортных средств, для изучения специальных учебных дисциплин «Электрооборудование городского электрического транспорта (ГЭТ)», «Электрооборудование производственных механизмов организаций ГЭТ» и будут востребованы учащимися в самостоятельной производственной деятельности.

Для закрепления теоретического материала и формирования у учащихся необходимых умений и навыков учебной программой предусмотрено проведение практических занятий, которые целесообразно выполнять после изучения соответствующих тем.

Для контроля усвоения программного учебного материала предусмотрено проведение одной обязательной контрольной работы.

Учебной программой определены цели изучения каждой темы, спрогнозированы результаты их достижения в соответствии с уровнями усвоения учебного материала.

В результате изучения учебной дисциплины учащиеся

*знать на уровне представления:*

классификацию транспортных средств городского электрического транспорта, основные направления развития тягового привода,

принципиальные схемы тягового привода;

требования «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ), «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТЭ), «Правил технической эксплуатации троллейбуса», «Правил технической эксплуатации трамвая».

*знать на уровне понимания:*

режимы движения транспортных средств городского электрического транспорта;

общее устройство и тяговые характеристики транспортных средств городского электрического транспорта;

способы пуска тягового двигателя;

системы торможения транспортных средств городского электрического транспорта.

*уметь:*

рассчитывать силы тяги и торможения транспортных средств;

вычислять и строить электромеханические характеристики тяговых двигателей;

читать схемы включения тягового двигателя;

пользоваться справочной литературой.

В учебной программе приведены критерии оценки результатов учебной деятельности учащихся по учебной дисциплине, которые разработаны на основе десятибалльной шкалы и показателей оценки результатов учебной деятельности обучающихся в учреждениях среднего специального образования (постановление Министерства образования Республики Беларусь от 29.03.2004 № 17).

Учебная программа содержит примерный перечень оснащения кабинета приборами, оборудованием, техническими и демонстрационными средствами обучения, необходимыми для обеспечения образовательного процесса.

## Тематический план

Раздел, тема	Количество учебных часов	
	Всего	В том числе на практические занятия
Введение	2	
Раздел 1 Элементы электрической тяги	10	2
1.1 Режимы движения транспортного средства	4	
1.2 Реализация сил тяги и торможения	6	2
Раздел 2 Характеристики тяговых электродвигателей	18	2
2.1 Электромеханические характеристики на валу тяговых двигателей	2	
2.2 Электромеханические характеристики на обode вращающегося колеса	8	2
2.3 Тяговые характеристики транспортного средства	2	
2.4 Сравнение тяговых электродвигателей	6	
Раздел 3 Пуск и регулирование скорости транспортного средства	14	
3.1 Способы пуска транспортного средства	4	
3.2 Регулирование скорости тягового двигателя	2	
3.3 Характеристики двигателей при изменении напряжения	2	
3.4 Характеристики двигателей при изменении возбуждения	2	
3.5 Тиристорно-импульсное управление тягового двигателя	4	
Раздел 4 Торможение транспортного средства	16	6
4.1 Системы торможения	4	2
4.2 Рекуперативное торможение	4	2
4.3 Реостатное торможение	5	2
Обязательная контрольная работа №1	1	
4.4 Рекуперативно-реостатное торможение	2	
Итого	60	10

## Содержание программы

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
1	2	3
<b>Введение</b>		
<p>Познакомить с целями и задачами дисциплины, с требованиями к знаниям и умениям учащихся. Дать понятие об электрической тяге на городском электрическом транспорте, сформировать знания о классификации электрического транспорта</p>	<p>Цели и задачи дисциплины. Требования к знаниям и умениям учащихся. Электрическая тяга на городском электрическом транспорте. Классификация электрического транспорта</p>	<p>Называет цели и задачи дисциплины, основные требования к знаниям и умениям учащихся. Раскрывает понятие об электрической тяге на городском электрическом транспорте, излагает классификацию электрического транспорта</p>
<b>Раздел 1 Элементы электрической тяги</b>		
<b>1.1 Режимы движения транспортного средства</b>		
<p>Сформировать знания о режимах движения транспортного средства. Сформировать понятие о кривых движения. Сформировать знания об уравнении движения транспортного средства</p> <p>Дать понятие о методах расчета коэффициента инерции вращающихся частей</p>	<p>Основные режимы движения транспортного средства. Кривые движения. Уравнение движения транспортного средства.</p> <p>Методы расчета коэффициента инерции вращающихся частей</p>	<p>Описывает режимы движения транспортного средства. Формирует понятие о кривых движения. Излагает уравнение движения транспортного средства</p> <p>Объясняет методы расчета коэффициента инерции вращающихся частей</p>
<b>1.2 Реализация сил тяги и торможения</b>		
<p>Дать понятия о движущихся колесных парах. Сформировать понятие об образовании и ограничении силы тяги</p> <p>Сформировать знания об условиях нормального качения колеса при торможении. Сформировать понятие об образовании и ограничении силы тяги и торможения. Дать понятие процессам образования силы сцепления</p>	<p>Движущиеся колесные пары. Образование и ограничение силы тяги и торможения</p> <p>Условие нормального качения колеса при торможении. Образование и ограничение силы торможения. Процессы образования силы сцепления</p>	<p>Раскрывает понятие движущихся колесных пар. Объясняет образование и ограничение силы тяги</p> <p>Объясняет условия нормального качения колеса при торможении.</p> <p>Объясняет образование и ограничение силы тяги и торможения. Описывает процессы образования силы сцепления</p>

1	2	3
<b>Практическая работа №1</b> <b>Расчет сил тяги и торможения транспортного средства</b>		
<p>Обучить расчету силы тяги и торможения транспортным средством. Развить умения определять коэффициент инерции вращающихся частей</p>	<p>Расчет сил тяги и торможения транспортного средства. Определение коэффициента инерции вращающихся частей</p>	<p>Рассчитывает силы тяги и торможения транспортным средством. Определяет коэффициент инерции вращающихся частей</p>
<b>Раздел 2 Характеристика тяговых электродвигателей</b>		
<b>2.1 Электромеханические характеристики на валу тяговых двигателей</b>		
<p>Сформировать знания об электромеханических характеристиках на валу якоря тягового двигателя</p>	<p>Электромеханические характеристики на валу якоря тягового двигателя</p>	<p>Объясняет электромеханические характеристики на валу якоря тягового двигателя</p>
<b>2.2 Электромеханические характеристики на обode вращающегося колеса</b>		
<p>Сформировать знания об электромеханических характеристиках на обode вращающегося колеса. Дать понятие о соотношениях, используемых для перехода от электромеханических характеристик на валу тягового двигателя к характеристикам на обode колеса</p> <p>Сформировать знания о характеристиках двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.</p> <p>Сформировать знания о характеристиках двигателей постоянного тока параллельного возбуждения. Сформировать понятия о характеристиках двигателей постоянного согласно-смешанного и встречно-смешанного возбуждения</p>	<p>Электромеханические характеристики на обode вращающегося колеса. Соотношения, используемые для перехода от электромеханических характеристик на валу тягового двигателя к характеристикам на обode колеса</p> <p>Характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения</p> <p>Характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Характеристики двигателя постоянного тока согласно-смешанного и встречно-смешанного возбуждения</p>	<p>Описывает электромеханические характеристики на обode вращающегося колеса, формулирует соотношения, используемые для перехода от электромеханических характеристик на валу тягового двигателя к характеристикам на обode колеса</p> <p>Описывает характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения</p> <p>Объясняет характеристики двигателей постоянного тока параллельного возбуждения. Описывает характеристики двигателей постоянного тока согласно-смешанного и встречно-смешанного возбуждения</p>

1	2	3
<b>Практическая работа №2</b> <b>Расчёт электромеханических характеристик тяговых двигателей</b>		
<p>Обучить расчету и построению электромеханических характеристик тяговых двигателей</p>	<p>Расчёт и построение электромеханических характеристик тяговых двигателей</p>	<p>Рассчитывает и строит электромеханические характеристики тяговых двигателей</p>
<b>2.3 Тяговые характеристики транспортного средства</b>		
<p>Дать понятие тяговым характеристикам различных систем возбуждения. Сформировать понятие о коэффициенте жесткости. Сформировать знания о жёстких и мягких тяговых характеристиках</p>	<p>Тяговые характеристики двигателей различных систем возбуждения. Коэффициент жесткости. Жесткие и мягкие тяговые характеристики</p>	<p>Описывает тяговые характеристики двигателей различных систем возбуждения. Раскрывает понятие о коэффициенте жесткости. Описывает жесткие и мягкие тяговые характеристики</p>
<b>2.4 Сравнение тяговых электродвигателей</b>		
<p>Сформировать знания о требованиях, предъявляемых к тяговым двигателям. Дать понятие электрической устойчивости двигателей постоянного тока последовательного, параллельного и смешанного возбуждения</p> <p>Дать понятие о механической устойчивости двигателей постоянного тока последовательного, параллельного и смешанного возбуждения. Сформировать знания о распределение нагрузок</p> <p>Дать понятие об устойчивости коммутации. Сформировать знания о регулировании скорости и рекуперации. Сформировать понятие о конструктивных показателях и оценке двигателей. Сформировать знания о сравнении тяговых двигателей по требованиям, предъявляемым к тяговым двигателям</p>	<p>Требования, предъявляемые к тяговым двигателям. Электрическая устойчивость двигателей постоянного тока последовательного, параллельного и смешанного возбуждения</p> <p>Механическая устойчивость двигателей постоянного тока последовательного, параллельного и смешанного возбуждения. Распределение нагрузок</p> <p>Устойчивость коммутации. Регулирование скорости и рекуперация. Конструктивные показатели и оценка двигателей. Сравнения тяговых двигателей по требованиям, предъявляемым к тяговым двигателям</p>	<p>Описывает требования, предъявляемые к тяговым двигателям. Объясняет электрическую устойчивость двигателей постоянного тока последовательного, параллельного и смешанного возбуждения</p> <p>Объясняет механическую устойчивость двигателей постоянного тока последовательного, параллельного и смешанного возбуждения. Раскрывает распределение нагрузок</p> <p>Объясняет устойчивость коммутации. Описывает регулирование скорости и рекуперацию. Излагает конструктивные показатели и оценку двигателей. Формулирует сравнения тяговых двигателей по требованиям, предъявляемым к тяговым двигателям</p>

1	2	3
<b>Раздел 3 Пуск и регулирования скорости транспортного средства</b>		
<b>3.1 Способы пуска подвижного состава</b>		
<p>Сформировать понятие о системах пуска. Сформировать знания о плавном и ступенчатом реостатном пуске. Познакомить с выбором пускового тока</p> <p>Познакомить с допущениями, применяемыми при рассмотрении процесса пуска для одного двигателя. Сформировать знания об энергетике пуска транспортного средства</p>	<p>Системы пуска. Плавный и ступенчатый реостатный пуск. Выбор пускового тока</p> <p>Допущения, применяемые при рассмотрении процесса пуска для одного двигателя. Энергетика пуска транспортного средства</p>	<p>Описывает системы пуска. Объясняет плавный и ступенчатый реостатный пуск. Раскрывает выбор пускового тока</p> <p>Называет допущения, применяемые при рассмотрении процесса пуска для одного двигателя. Описывает энергетическую пуск транспортного средства</p>
<b>3.2 Регулирование скорости тягового двигателя</b>		
<p>Сформировать знания о способах регулирования скорости тягового двигателя</p>	<p>Способы регулирования скорости тягового двигателя</p>	<p>Описывает способы регулирования скорости тягового двигателя</p>
<b>3.3 Характеристики двигателей при изменении напряжения</b>		
<p>Сформировать знания о характеристиках двигателей при изменении напряжения</p>	<p>Характеристики двигателей при изменении напряжения</p>	<p>Описывает характеристики двигателей при изменении напряжения</p>
<b>3.4 Характеристики двигателей при изменении возбуждения</b>		
<p>Сформировать знания о способах изменения возбуждения у двигателей постоянного тока последовательного возбуждения</p>	<p>Способы изменения возбуждения у двигателей постоянного тока последовательного возбуждения</p>	<p>Объясняет способы изменения возбуждения у двигателей постоянного тока последовательного возбуждения</p>
<b>3.5 Тиристорно-импульсное управление тягового двигателя</b>		
<p>Сформировать понятие о принципе импульсного управления. Сформировать знания о коэффициенте заполнения импульсов</p> <p>Сформировать знания о принципе работы схемы широтно – импульсного ключа. Сформировать понятие об ограничениях, накладываемых на внешние характеристики в режиме тяги</p>	<p>Принцип импульсного управления. Коэффициент заполнения импульсов</p> <p>Принцип работы схемы широтно – импульсного ключа. Ограничения, накладываемые на внешние характеристики в режиме тяги</p>	<p>Объясняет принцип импульсного управления. Описывает коэффициент заполнения импульсов</p> <p>Излагает принцип работы схемы широтно – импульсного ключа. Описывает ограничения, накладываемые на внешние характеристики в режиме тяги</p>



1	2	3
<b>Раздел 4 Торможение подвижного состава</b>		
<b>4.1 Системы торможения</b>		
Сформировать понятие о системах торможения. Сформировать знания о видах торможения по характеру использования тормозной силы	Системы торможения. Виды торможения по характеру использования тормозной силы	Описывает системы торможения. Излагает виды торможения по характеру использования тормозной силы
<b>Практическая работа №3</b> <b>Расчёт и построение графиков допустимой скорости движения</b>		
Обучить расчёту и построению графиков допустимой скорости движения	Расчёт и построение графиков допустимой скорости движения	Рассчитывает и строит графики допустимой скорости движения
<b>4.2 Рекуперативное торможение</b>		
Сформировать знания о рекуперативном торможении двигателей постоянного тока различных систем возбуждения	Рекуперативное торможение двигателей постоянного тока различных систем возбуждения	Описывает рекуперативное торможение двигателей постоянного тока различных систем возбуждения
<b>Практическая работа №4</b> <b>Расчёт удельной действующей тормозной силы транспортного средства методом графической интерполяции</b>		
Обучить расчёту удельной действующей тормозной силы транспортного средства методом графической интерполяции	Расчёт удельной действующей тормозной силы транспортного средства методом графической интерполяции	Рассчитывает удельную действующую тормозную силу транспортного средства методом графической интерполяции
<b>4.3 Реостатное торможение</b>		
Сформировать знания о реостатном торможении для двигателей постоянного тока. Сформировать понятие о зависимостях процессов самовозбуждения Сформировать знания об ограничении тормозных характеристик при реостатном торможении	Реостатное торможение для двигателей постоянного тока. Зависимости процессов самовозбуждения Ограничение тормозных характеристик при реостатном торможении	Описывает реостатное торможение для двигателей постоянного тока. Объясняет зависимости процессов самовозбуждения Формирует ограничения тормозных характеристик при реостатном торможении
<b>Обязательная контрольная работа №1</b>		
<b>Практическая работа №5</b> <b>Расчёт тормозного пути</b>		
Обучить расчёту тормозного пути транспортного средства	Расчёт тормозного пути транспортного средства	Рассчитывает тормозной путь транспортного средства

1	2	3
<b>4.4 Рекуперативно-реостатное торможение</b>		
Сформировать знания о схемах и характеристиках рекуперативно-реостатного торможения для двигателей различных систем возбуждения	Схемы и характеристики рекуперативно-реостатного торможения для двигателей различных систем возбуждения	Описывает схемы и характеристики рекуперативно-реостатного торможения для двигателей различных систем возбуждения

## Критерии оценки результатов учебной деятельности

Отметка в баллах	Показатели оценки
1	2
1(один)	Узнавание отдельных объектов и изучение программного учебного материала, предъявленных в готовом виде (терминов и определений, основных понятий, процессов и т.д.)
2 (два)	Различение объектов изучения программного материала, предъявляемых в готовом виде (терминов и определений, предъявленных в области образования сил тяги и торможения); осуществление соответствующих практических действий
3 (три)	Воспроизведение части программного материала по памяти (фрагментарное перечисление методов определения коэффициентов инерции вращающихся частей, регулирования, заполнения импульсов, способов торможения тягового двигателя и т.д.); осуществление умственных и практических действий по образцу
4 (четыре)	Воспроизведение большей части программного учебного материала (описание с элементами объяснения технологий построения кривых движения, электромеханических характеристик на валу и на ободе колеса, тяговых характеристик и т.д.); применение знаний в знакомой ситуации по образцу наличие единичных существенных ошибок
5 (пять)	Осознанное воспроизведение большей части программного учебного материала (описание с элементами объяснения процессов образования сил тяги и тормозной силы; знание требований, предъявляемых к тяговым двигателям; последовательное изложение способов пуска двигателя) применение знаний в знакомой ситуации по образцу, наличие несущественных ошибок
6 (шесть)	Полное знание и осознанное воспроизведение всего учебного материала; владение программным учебным материалом в знакомой ситуации (развернутое описание и объяснение применения уравнения движения подвижного состава, различия между электромеханическими характеристиками на валу и на ободе колеса; последовательное изложение способов пуска двигателя; решение задач по определению коэффициента инерции вращающихся частей и по определению ограничения по сцеплению в соответствии с представленным образцом и т.д.); наличие несущественных ошибок
7 (семь)	Полное прочное знание и воспроизведение программного учебного материала; владение программным учебным материалов в знакомой ситуации (развернутое описание и объяснение применения уравнения движения подвижного состава, раскрытие сущности образования ограничения по сцеплению, доказательство механической и электрической устойчивости, выполнение в соответствии с представленными образцами), наличие единичных несущественных ошибок

1	2
8 (восемь)	<p>Полное, прочное, глубокое знание и воспроизведение программного учебного материала; оперирование программным учебным материалом в знакомой ситуации (развернутое описание и объяснение основных систем пуска и торможения двигателя, принципов импульсного управления тягового двигателя, раскрытие сущности, обоснование и доказательство, подтверждение аргументами и фактами, формулирование выводов, самостоятельное выполнение заданий); наличие единичных несущественных ошибок</p>
9 (девять)	<p>Полное, прочное, глубокое, системное знание программного учебного материала; владение учебным программным материалом, оперирование программным учебным материалом в частично измененной ситуации (применение знаний и умений при сравнении двигателей различного возбуждения по всем требованиям, предъявляемым к двигателям, демонстрирует прочные, глубокие знания); наличие действий и операций творческого характера для выполнения заданий (составление алгоритмов выполнения работ, кроссвордов, докладов); прочное владение навыками самостоятельной работы с учебно-методической, технической и справочной литературой</p>
10(десять)	<p>Свободное оперирование программным учебным материалом, применение знаний и умений в незнакомой ситуации (самостоятельный поиск, изучение, анализ незнакомого материала, и т. д); прочное владение навыками самостоятельной работы с учебно-методической, технической и справочной литературой; выполнение творческих работ создание презентаций и докладов по дисциплине.</p>

## Примерный перечень оснащения кабинета

Наименование	Количество
1	2
<b>Технические средства обучения</b>	
Технические устройства	
Ноутбук	1
Мультимедийный проектор	1
Дидактическое обеспечение	
Учебные презентации:	
Методы определения расхода электрической энергии и нагревания тяговых двигателей	2
Применение рекуперативного и реостатного торможения на транспортном средстве	2
Электромеханические характеристики тягового двигателя на обode колеса	2
Электромеханические характеристики на валу тягового двигателя	2
Образование и ограничение силы тяги	3
Характеристики тяговых электродвигателей постоянного тока, применяемых на транспортном средстве; их достоинства и недостатки	1
Применение электрического торможения с помощью тиристорно-импульсных регуляторов	1
Образование и ограничение тормозной силы	1
Физические процессы образования силы сцепления	1
<b>Электронные средства обучения</b>	
Электронное учебно-методическое пособие	
<b>Печатные средства обучения</b>	
Раздаточный материал в составе:	15
Элементы электрической тяги	
Характеристика тяговых электродвигателей	
Пуск и регулирования скорости подвижного состава	
Торможение подвижного состава	
Методические указания для выполнения практических работ	15
Методические указания для изучения учебной дисциплины учащимися заочной формы обучения	15
<b>Оборудование помещения</b>	
Доска классная	1
Стенд информационный	2
Стол для преподавателя	1
Стол для учащихся	15
Стул	30
Экран проекционный	1

## Литература

- 1 Байрыева, Л. С. Электрическая тяга / Л. С. Байрыева, В. В. Шевченко. – М. : Транспорт, 2006
- 2 Богдан, Н. В. Троллейбус (теория, конструирование, расчет) / Н. В. Богдан, Ю. Е. Атаманов, А. И. Сафонов. - Минск : Ураджай, 2009
- 3 Богдан, Н. В. Перспективные направления развития городского нерельсового электрического транспорта / Н. В. Богдан, В. П. Николаев. – Минск : Ураджай, 2007
- 4 Осипов, С. И. Теория электрической тяги / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов. - М. : Маршрут, 2006
- 5 Южаков, Б. Г. Технология и организация обслуживания и ремонта устройств электроснабжения / Б. Г. Южаков. - М. : Маршрут, 2004
- 6 Макаров, Е. Ф. Обслуживание и ремонт электрооборудования электростанций и сетей / Е. Ф. Макаров. - М. : Изд. центр «Академия», 2003
- 7 Афанасьев, А. С. Контактные сети трамвая и троллейбуса / А. С. Афанасьев. - М. : Транспорт, 2008
- 8 Куценко, Г. Ф. Монтаж, эксплуатация и ремонт электроустановок / Г. Ф. Куценко. -М. : Дизайн ПРО, 2003

## Перечень ТНПА

ГОСТ 12.0.001-82 Система стандартов безопасности труда. Основные положения

ГОСТ 12.0.002-80 Система стандартов безопасности труда. Термины и определения

ГОСТ 12.1.002-84 Система стандартов безопасности труда. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах

ГОСТ 12.1.004-85 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность

ГОСТ 12.1.006-84 Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля

ГОСТ 12.1.019-79 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования

ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление

ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов (с изменением N 1)

ГОСТ 12.1.045-84 Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля

ГОСТ 12.1.051-90 ССБТ. Электробезопасность. Расстояния безопасности в охранной зоне линий электропередачи напряжением свыше 1000 В

ГОСТ 12.2.007-75 ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.3.019-80 Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.3.019-80 Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.4.026-2001 Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний

ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования

ТКП 181-2009 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей

ГОСТ Р МЭК 332-1-96 Испытание трансформаторного масла

ГОСТ Р МЭК 332-2-96 Испытание вертикально расположенного изолированного провода или кабеля с медными жилами

ТКП 339-2011 (02230) Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий.

ГОСТ 721-77 Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В

ГОСТ 839-80 Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия (с Изменениями N 1, 2)

ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции

ГОСТ 2933-83 Аппараты электрические низковольтные методы испытаний

ГОСТ 2990-78 Методика измерения сопротивления изоляции

ГОСТ 3484.1-88 Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний

ГОСТ 3484.3-88 Трансформаторы силовые. Методы измерений диэлектрических параметров изоляции

ГОСТ 3484.5-88 Трансформаторы силовые. Испытания баков на герметичность

ГОСТ 6490-93 Изоляторы линейные подвесные тарельчатые. Общие технические условия.

ГОСТ 11677-85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия

ГОСТ 12965-85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ. Технические условия.

ГОСТ 15845-80 Изделия кабельные. Термины и определения

ГОСТ 16442-80 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией

ГОСТ 20690-75 Электрооборудование переменного тока на напряжение 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции

ГОСТ 21023-75 Трансформаторы силовые. Методы измерений характеристик частичных разрядов при испытаниях напряжением промышленной частоты

ГОСТ 22012-82 Радиопомехи промышленные от линий электропередачи и электрических подстанций. Нормы и методы измерений

ГОСТ 22756-77 Трансформаторы (силовые и напряжения) и реакторы. Методы испытаний электрической прочности изоляции

ГОСТ 27751-88 (СТ СЭВ 384-87) Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету (с Изменением N 1)

ГОСТ 28856 Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные. Общие технические условия

ГОСТ Р 51177-98 Арматура линейная. Общие технические условия

ГОСТ 51320-99 Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний технических средств - источников электромагнитных радиопомех

ГОСТ Р МЭК 60331-11—2003 Испытательные длительные переменные напряжения внутренней изоляции силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов

ГОСТ Р МЭК 60331-21-2003 Испытания кабелей 0,6/1,0 кВ в условиях воздействия пламени

ГОСТ Р МЭК 60331-23-2003 Испытания масляных выключателей



**Перечень  
существенных и несущественных ошибок**  
по дисциплине «Электрическая тяга» для специальности 2-37 01 05

**Существенными ошибками являются:**

- неумение решать задачи;
- незнание основных коэффициентов дисциплины;
- затруднения (ошибки) в изложении;
- не различают понятия электрической тяги и процессы образования сил тяги и тормозной силы;
- неумение воспроизвести механические и электромеханические характеристики двигателей;
- незнание способов торможения тягового двигателя.

**Несущественными ошибками являются:**

- неполное решение задачи;
- отсутствие единиц измерения при решении задачи;
- неполное понимание различия между электромеханическими характеристиками на валу и на ободу колеса;
- непоследовательное изложение способов пуска тягового двигателя;
- неполное знание требований, предъявляемых к тяговым двигателям;
- неточное определение достоинств и недостатков способов регулирования скорости;
- искажение диаграмм напряжений для двигателей различных систем возбуждения.

**Недочеты** — это оговорки, описки, если они не искажают смысл излагаемого материала

## Перечень разделов и тем учебной программы

№№ вучэбных заняткаў	Назва раздзелаў, назвы тэм па вучэбнай праграме, назвы тэм асобных вучэбных заняткаў	Колькасць вучэбных гадзін
1	2	3
1	Введение. Цели и задачи дисциплины. Связь с другими дисциплинами. Электрическая тяга на городском электрическом транспорте (ГЭТ). Входной контроль. Охрана труда на ГЭТ	2
	<b>РАЗДЕЛ 1 Элементы электрической тяги</b>	<b>10</b>
	<i>Тема 1.1 Режимы движения подвижным составом (ПС)</i>	4
2	Основные режимы движения ПС. Кривые движения. Вывод уравнения движения ПС. Понятие коэффициента инерции вращающихся частей и методы его определения.	2
3	Применение уравнения движения к различным видам движения ПС	2
	<i>Тема 1.2 Реализация сил тяги и торможения</i>	6
4	Движущиеся колесные пары. Возникновение силы сцепления отдельного колеса. Образование и ограничение силы тяги. Условие нормального качения колеса при торможении.	2
5	Образование и ограничение тормозной силы. Физические процессы образования силы сцепления	2
6	<i>ПР №1 «Расчет сил тяги и торможения ПС. ТБ при выполнении работы.</i>	2
	<b>РАЗДЕЛ 2 Характеристика тяговых электродвигателей (ТД)</b>	<b>18</b>
7	<i>Тема 2.1 Электромеханические характеристики на валу ТД</i> Тематический контроль №1	2
	<i>Тема 2.2 Электромеханические характеристики на ободу вращающегося колеса</i>	8
8	Электромеханические характеристики на ободу движущего колеса.	2
9	Характеристики двигателей последовательного возбуждения	2
10	Характеристики двигателя параллельного согласно-смешанного и встречно- смешанного возбуждения.	2
11	<i>ПР №2 «Расчёт электромеханических характеристик ТД». ТБ при выполнении ПР.</i>	2
12	<i>Тема 2.3 Тяговые характеристики электроподвижного состава</i>	2
	<i>Тема 2.4 Сравнение ТД</i>	6
13	Требования, предъявляемые к ТД. Анализ электрической устойчивости на примере двигателя последовательного возбуждения	2
14	Анализ механической устойчивости ПС по тяговым характеристикам $F_n(v)$ . Распределение нагрузок	2
15	Устойчивость коммутации. Регулирование скорости. Конструктивные показатели и оценка двигателей. Сравнения ТД.	2
	<b>РАЗДЕЛ 3 Пуск и регулирования скорости ПС</b>	<b>14</b>
	<i>Тема 3.1 Способы пуска ПС</i>	4
16	Выбор параметров пускового периода. Условия пуска ТД. Системы	

Тып вучэбных заняткаў	Вучэбна-метадычныя матэрыялы, сродкі навучання	Заданне для навучэнцаў на дом	Заўвагі
4	5	6	7
Изучения	Плакат «Классификация городского	[1] стр.5-10	
нового	электрического транспорта»		
материала			
Изучения	Таблица значений переводных	[1] стр.11-15	
нового	коэффициентов (презентация		
материала	на мультимедийном комплексе (МК))		
Изучения	Схемы прикладываемых к вагону сил	[1] стр.16-21	
нового			
материала			
Изучения	Схема реализации силы тяги	[1] стр.22-25	
нового			
материала			
Изучения	Схема реализации тормозной силы	[1] стр.27-35	
	(презентация на МК)	повторение раздела 1	
Формиров.	Методические указания	[1] стр.22-28	
умения			
навыков			
комбинированный	Электромеханические зависимости	[1] стр.55-57	
	Карточки с заданием	повторение темы	
		«Двигатели постоянного	
		тока» («Основы ЭП»)	
Изучения	Зависимости скорости $v$ , силы тяги $F$	[1] стр.58-62	
нового	Схема включения ДПТ посл. возб.	[1] стр.63-64	
материала	Схема включения ДПТ парал., смеш.	[1] стр.66-70	
	и встречно-смешанного возбуждения		
Формиров.	Методические указания	[1] стр.64-73	
умения			
Изучения	Плакат «Тяговые характеристики»	[1] стр.71-72	
нового			
материала	Плакат «Графики напряжений $U_d$ ,	[1] стр.73-76	
	ЭДС СФв и падений напряжения»		
Изучения	Графики механической устойчивости	[1] стр.76-80	
нового	(презентация на МК)		
материала	Графики устойчивости коммутации	[1] стр.76-80	
	(презентация на МК)	повторение раздела 2	



Тип вучэбных заняткаў	Вучэбна-метадычныя матэрыялы, сродкі навучання	Заданне для навучэнцаў на дом	Заўвагі
4	5	6	7
комбинированный	Карточки с заданиями		
Изучения нового	Схема пуска одного двигателя	[1] стр.90-101	
материала	Схемы регулирования скорости ТД	[1] стр.102-103	
Изучения	Характеристики ДПТ при изм. напр.	[1] стр.103-104	
нового	Схемы изменения возбуждения	[1] стр.106-113	
материала			
Изучения	Схемы импульсного управления	[1] стр.114-116	
нового			
материала	Схема широтно – импульсного	[1] стр.117-120	
	ключа (презентация на МК)	повторение раздела 3	
комбинированный	Зависимости тормозных сил Карточки	[1] стр.121-122	
	Схема рекуперативного торможения	[1] стр.132-136	
Формиров.	Методические указания	[1] стр.130-133	
умения			
навыков			
Изучения	Схемы реостатного торможения	[1] стр.137-139	
нового	(презентация на МК)	повт. разделов 1-3	
материала			
Формиров.	Методические указания	[1] стр.136-137	
умения			
навыков	Методические указания	[1] стр.138-139	
контроль	<i>Карточки с заданиями</i>		
	Характеристики реостатного	[1] стр.140-141	
	торможения.		
Обобщения	Схемы рекуперативно-реостатного	[1] стр.142-143	
	торможения.		

## Теоретический материал

### *Введение*

В связи с ростом населения современных городов постоянно увеличивается объем городских пассажирских перевозок. Наиболее современным видом городского транспорта является электрический транспорт (трамвай, троллейбус, метрополитен, электромобиль), который использует для тяги электрическую энергию и не оказывает вредного воздействия на окружающую среду.

Городской электрический транспорт (ГЭТ) является одним из крупных потребителей электрической энергии, поэтому знание теории электрической тяги способствует правильному выбору рациональной конструкции электроподвижного состава и эффективной его эксплуатации.

*Классификация электрического транспорта.*

В зависимости от назначения он подразделяется на:

- Магистральный,
- Городской,
- Промышленный.

*Магистральный* – это железнодорожный транспорт, который осуществляет перевозку грузов и пассажиров на дальние расстояния.

*Промышленный электрический* транспорт осуществляет перевозку разнообразных грузов по территории производственных предприятий. Особенности этого транспорта зависят от вида производства, где он применяется.

*ГЭТ* служит для перевозки пассажиров в городах на относительно небольшие расстояния.

Электрический транспорт может быть выполнен *автономным* – источник электрической энергии (дизель-генератор, аккумулятор, топливные элементы) устанавливается непосредственно на подвижном составе, например, электробусы, электромобили, тепловозы.

В отличие от автономного ЭТ *контактный* транспорт, получающий электроэнергию от контактной сети, лишен этих недостатков, но он не может работать там, где отсутствует контактная сеть.

*Комбинированный* транспорт может получать питание как от контактной сети, так и от автономного источника, однако оборудование такого подвижного состава характеризуется большой массой и сложностью, поэтому он не получил широкого распространения на городском транспорте.

ЭТ может выполняться *рельсовым* и *безрельсовым*. Последний более маневренный, но требует наличия дорог с качественным покрытием и расходует больше энергии, поэтому в условиях города целесообразно применение рельсового транспорта.

Контактный ЭТ может быть выполнен с питанием как на постоянном токе, так и на переменном токе промышленной частоты. Последний применяется только на магистральных железных дорогах с напряжением контактной сети 25кВ. в условиях города применение напряжения свыше 1кВ в воздушной контактной сети не разрешается.

## Раздел 1 ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ.

### Тема 1 Силы тяги и торможения на подвижном составе Образование и ограничение силы тяги

*Движущими* называются колесные пары или колеса, которые приводятся во вращение тяговыми ЭД.

Рассмотрим возникновение силы сцепления отдельного

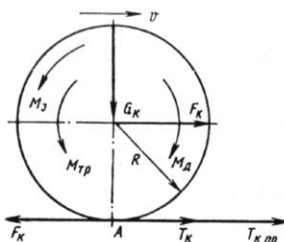


Рисунок 1.1 – Образование силы тяги

Тогда момент, приложенный к колесу,

$$M_k = M_0 \mu - M_{тр} - M \quad (1.1)$$

где  $M_{тр} = \omega_b$ ,

– радиус колеса,

$\omega_b$  – сопротивление движению от трения в подшипниках,

$$M = (J \omega),$$

где  $J$  – момент инерции вращающихся частей,

$\omega$  – угловое ускорение.

$T_k$  называют *касательной силой тяги на ободу движущего колеса*. Силу  $F_k$ , которая обусловлена вращающим моментом тягового двигателя, называют *силой тяги*.

При ускоренном или замедленном вращении колеса с учетом трения в подшипниках силы  $F_k$  и  $T_k$  не будут равны, т.к. действующий на колесо  $M_k$  согласно выражению (1.1) равен алгебраической сумме моментов, действующих на колесную пару. Следовательно,

$$T_k = F_k - \frac{J}{R} \cdot \frac{d\omega}{dt} - W_{об} \quad (1.2)$$

Это соотношение справедливо для одного колеса. Для ПС это соотношение будет иметь вид

$$T = F - \sum \frac{J}{R} \cdot \frac{d\omega}{dt} - \sum W_{об} \quad (1.3)$$

Для предельной силы сцепления всего ПС по выражению (1.3) получим следующее ограничение

$$F_{max} - \sum W_{об} - \sum \frac{J}{R} \frac{d\omega}{dt} \leq T_{пр} \quad (1.4)$$

откуда наибольшая допустимая по условию сцепления сила тяги

$$F_{max} \leq T_{np} + \sum \frac{J}{R} \frac{dw}{dt} + \sum W_{об}$$

т.к. величины  $\sum_{об}$  и  $\sum/(w/)$  малы по сравнению с величиной  $T_{np}$ , то приближенно можно принять

$$\leq T_{np} \quad (1.5)$$

### Образование и ограничение тормозной силы

Определим условие нормального качения колеса при торможении. В период торможения к поезду приложена тормозная сила. Рассмотрим процесс образования этой силы на примере одного колеса (рис.1.2).

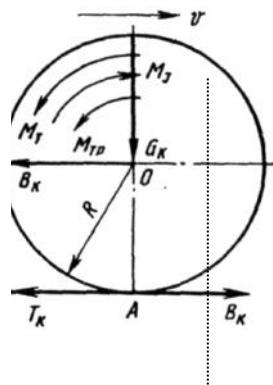


Рисунок 1.2- Образование тормозной силы

Результирующий момент  $M$  будет равен

$$M = M_m - M + M_{np}. \quad (1.6)$$

Соотношение между силами  $B_k$  и  $T_k$  для одной оси будет иметь вид

$$T_k = B_k - \sum \frac{J}{R} \frac{dw}{dt} + \sum W_{об} \quad (1.7)$$

и для всего ПС

$$T = B - \sum \frac{J}{R} \frac{dw}{dt} + \sum W_{об} \quad (1.8)$$

Предельная сила сцепления всего ПС будет иметь следующие ограничения

$$T_{np} \geq B_{max} - \sum \frac{J}{R} \frac{dw}{dt} + \sum W_{об} \quad (1.9)$$

Откуда наибольшая допустимая по условиям сцепления тормозная сила

$$B_{max} \leq T_{np} - \sum \frac{J}{R} \frac{dw}{dt} - \sum W_{об}$$

Физические процессы образования силы сцепления.



## Коэффициент сцепления

Под воздействием силы нажатия колеса в месте его опоры на рельсе образуются контактные напряжения. Вследствие упругости материалов сила, действующая от колеса на рельс, вызывает деформацию бандажа и рельса. Поэтому колесо опирается на рельс не в одной точке, а по некоторой поверхности. Эту поверхность соприкосновения называют *контактной или опорной площадкой*. Для цилиндрического колеса, катящегося по рельсу, контактная площадка образуется в форме эллипса (рис.1.3).

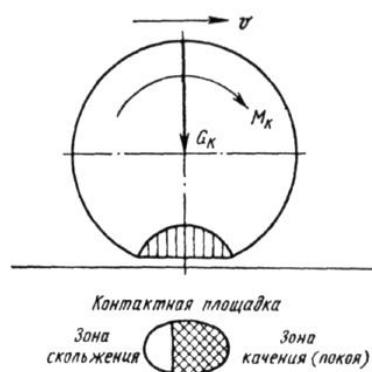


Рисунок 1.3 – Образование контактной площадки

Если колесо катится только под действием вращающего момента  $M_k$ , то волокна поверхности колеса перед тем, как вступить в переднюю часть контактной площадки, предварительно сжимаются и сохраняют как бы неподвижное сцепление с поверхностью пути. Эту зону называют *зоной качения или покая*.

По мере перекатывания колеса будет перемещаться и контактная площадка, а сжатые волокна колеса будут переходить в заднюю часть площадки. Здесь нормальное нажатие постоянно уменьшается, сжатые волокна колеса, преодолевая трения, начинают разжиматься, т.е. начинается проскальзывание разжимающихся волокон колеса относительно поверхности пути в задней части контактной площадки. Эту часть контактной площадки называют *зоной скольжения*.

На ПС, как правило, имеется несколько колесных пар. Коэффициент сцепления ПС  $\psi$  в целом всегда меньше коэффициента сцепления колеса  $\psi_k$ . Это обусловлено причинами:

Неравенство силы тяги или тормозной силы отдельных осей вследствие неодинаковости диаметров движущих колес и электромеханических характеристик двигателей,

Разный вес, приходящийся на движущие и тормозные оси,

Загрязнение рельсов и бандажей колес (дорожного покрытия и шин).

Значение расчетного коэффициента сцепления ПС принимается меньше значения коэффициента сцепления одной колесной пары, т.е.

$$\psi = \psi_k \eta_{\text{стат}} \eta_{\text{дин}} \quad (1.10)$$

Для трамвая в среднем расчетный коэффициент сцепления принимают  $\psi_p = 0.15$ , для троллейбуса  $\psi_p = 0.3-0.35$ , для метрополитена  $\psi_p = 0.2-0.22$ .

Раздел 2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
Тема 2.1 Электромеханические характеристики тяговых двигателей

Электромеханические характеристики на валу тяговых двигателей

Электромеханическими характеристиками на валу электрического двигателя называются зависимости частоты вращения двигателя от тока ( $I$ ), вращающего момента от тока  $M(I)$  и коэффициента полезного действия (КПД) от тока  $\eta_d(I)$  при напряжении питания, равном номинальному.

ЭДС  $E$ , индуцируемая в обмотке якоря машины постоянного тока, выражается как

$$E = C' \Phi \quad (2.1)$$

где  $C'$  - конструктивная постоянная тягового двигателя,

$\Phi$  – магнитный поток,

$n$  – частота вращения якоря.

В режиме тяги в двигателе происходит преобразование электрической энергии в механическую. Напряжение  $U_d$ , приложенное к двигателю, больше его электродвижущей силы, т.е.  $U_d > E$ . Уравнение электрического равновесия между приложенным к двигателю напряжением, ЭДС и падением напряжения  $I_d R$  в силовой цепи будет иметь вид

$$U_d = E + I_d R \quad (2.2)$$

где  $\Delta_{щ} = 1.0-2.0$  В (падение напряжения под щетками двигателя), поэтому в практических расчетах этой составляющей напряжения пренебрегают.

Вращающий момент  $M$  является одним из основных параметров двигателя, т.к. он определяет ток, потребляемый двигателем, а, следовательно, и его мощность. Вращающий момент двигателя может быть рассчитан из условия равенства полезной механической мощности  $P_m$  и подведенной электрической мощности, умноженной на КПД двигателя. Полезная механическая мощность

$$P_m = M \omega \quad (2.3)$$

где  $\omega = 2\pi n/60 = \pi n/30$  – угловая скорость якоря, рад/с.

Следовательно, полезную механическую мощность, Вт, можно выразить так

$$P_m = \pi M n / 30 \quad (2.4)$$

Полезная электрическая мощность, Вт

$$P = P_m \eta_d \quad (2.5)$$

Приравняв левые части выражений (2.4) и (2.5), получим

$$\pi n / 30 = U_d \eta_d \quad (2.6)$$

откуда вращающий момент, Нм,

$$M = \frac{30U_{\partial}I}{\pi n} \eta_{\partial} \quad (2.7)$$

Вращающий момент  $M$  можно также определить по электромагнитному вращающему моменту  $M_{\text{эм}}$ , т.е. моменту, который развил бы двигатель при отсутствии механических и магнитных потерь

$$M = M_{\text{эм}} - \Delta M \quad (2.8)$$

где  $M_{\text{эм}} = (30/\pi)C'\Phi I$  – электромагнитный момент, создаваемый электромагнитной мощностью  $P_{\text{эм}} = E$ ,

$\Delta M$  – момент, создаваемый магнитными и механическими потерями  $\Delta P_{\text{м}} = (\pi n/30)\Delta M$ .

Следовательно, вращающий момент, Нм,

$$M = \frac{30}{\pi} \left( C'\Phi I - \frac{\Delta P_{\text{м}}}{n} \right) \quad (2.9)$$

КПД  $\eta_{\text{д}}$  представляет собой отношение полезной мощности к подведенной. При тяговом режиме это будет отношение полезной механической мощности  $P_{\text{м}}$  к электрической

$$(2.10)$$

$$\eta_{\text{д}} = \frac{P_{\text{м}}}{P} = \frac{P_{\text{м}}}{U_{\text{д}}I} = \frac{U_{\text{д}}I - \sum \Delta P}{U_{\text{д}}I}$$

где  $\sum \Delta P = I^2 r + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{с}}$  – сумма соответственно электрических, механических и магнитных потерь в двигателе.

На рис.2.1 представлены электромеханические характеристики на валу якоря тягового двигателя ДК-254Б: скоростная  $n(I)$ , вращающего момента  $M(I)$ , КПД  $\eta_{\text{д}}(I)$ .

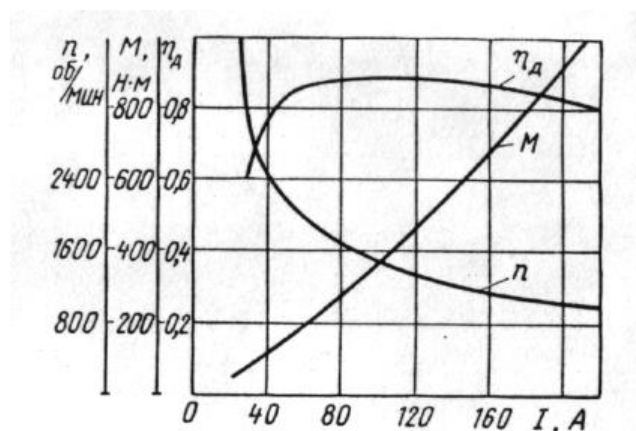


Рисунок 2.1- Электромеханические характеристики на валу якоря тягового двигателя ДК-254Б

Электромеханические характеристики на ободе движущего колеса

*Зависимости скорости  $v$ , силы тяги и КПД двигателя с учетом потерь энергии в передаче от тока двигателя называются электромеханическими характеристиками на ободе движущего колеса.*

Для перехода от электромеханических характеристик на валу тягового двигателя к характеристикам на ободе колеса используются следующие соотношения

Скорость, км/ч,

$$v_k = \frac{\pi n}{30} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{D_k}{2} \cdot \frac{3600}{1000} = 0.1885 \frac{D_k n}{\mu} \quad (2.11)$$

где коэффициент 3600/1000 введен для перевода метров в секунду в километры в час

Сила тяги, Н

$$F_k = \frac{M_{\mu}}{D_k/2} \cdot \eta_3 \quad (2.12)$$

В тяговых расчетах удобнее использовать относительные потери мощности в передаче  $\Delta p_3$  вместо значения КПД  $\eta_3$ . Относительные потери мощности в передаче выражают в процентах от подведенной мощности

$$\Delta P \frac{\Delta P_3}{U_d I} \quad (2.13)$$

где  $\Delta P_3$  – потери мощности в передаточных механизмах, Вт,  
КПД передачи

$$\eta_3 = \frac{U_d I \eta_d - \Delta P}{U_d I \eta_d} \quad (2.14)$$

Выражая потери мощности в передаточных механизмах  $\Delta P_3$  через относительные потери  $\Delta p_3$ , получим

$$\eta = 1 - \Delta p_3 / (100 \eta_d) \quad (2.15)$$

Подставив КПД передачи из выражения (2.15) в выражение (2.12), получим

$$\eta = \eta_d - \Delta p_3 / 100 \quad (2.16)$$

Величина  $\Delta p_3$  зависит от типа передачи.

Рассмотрим соотношения, по которым следует вести расчет характеристик на ободе колеса.

Выражая из (2.11) частоту вращения вала якоря через поступательную скорость, и подставляя в (2.3), получим

$$E = C' \Phi v \quad (2.17)$$

где  $C = C' 0.1885 D_k / \mu$ .

Подставляя  $E$  в (2.2), определим скорость поступательного движения ПС

$$v = \frac{U_d - I r}{C \Phi} \quad (2.18)$$

При напряжении  $U_d$  и токе силовой цепи  $I$ , подведенная к нему мощность равна  $U_d I$ . При этом считаем, что цепи параллельного и независимого возбуждения отсутствуют. С одной стороны, полезная электрическая мощность  $P$  будет меньше подведенной на потери  $\Delta P$  в двигателе и передаче

$$P = U_d I - \Delta P \quad (2.19)$$

Потери  $\Delta P$  складываются из электрических  $\Delta P_э$ , магнитных  $\Delta P_с$ , механических  $\Delta P_м$  и потерь в передаче  $P_з$

$$\Delta P = \Delta P_э + \Delta P_с + \Delta P_м + \Delta P_з \quad (2.20)$$

Электрические потери состоят из потерь в силовой цепи  $I^2 r$  и электрических потерь в щетках  $I \Delta U_{щ}$ , которыми можно пренебречь, тогда

$$\Delta P_э = I^2 r \quad (2.21)$$

Подведенная к двигателю мощность за вычетом электрических потерь называется электромагнитной мощностью  $P_{эм}$ .

С другой стороны, полезная мощность  $P$ , Вт, отнесенная к ободу движущего колеса, равна

$$P = Fv/3.6 \quad (2.22)$$

здесь коэффициент  $1/3.6$  введен для перевода ньютон километров в ватты.

С учетом (2.21) и (2.24) можно записать

$$Fv/3.6 = U_d I - \Delta P \quad (2.23)$$

$$P_{эм} = U_d I - I^2 r \quad (2.24)$$

Используя выражения (2.2), (2.19) и (2.26), можно написать

$$P_{эм} = C \Phi v I \quad (2.25)$$

Если бы в двигателе отсутствовали магнитные и механические потери, вся электромагнитная мощность преобразовалась бы в полезную механическую мощность и двигатель развил бы так называемую электромагнитную силу тяги,  $H$ ,

$$F_{эм} = 3,6 (U_d I - I^2 r) / v \quad (2.26)$$

из уравнения (2.25) получим выражение для силы тяги двигателя

$$F_{эм} = 3,6 (U_d I - \Delta P) / v$$

(2.27)

Используя (2.22), (2.25) и (2.27), получим

$$F = F_{эм} - 3,6 (\Delta P_с + \Delta P_м + \Delta P_з) / v \quad (2.28)$$

Второе слагаемое в правой части (2.31) представляет собой потерю силы тяги, вызванную магнитными и механическими потерями, которую обозначим  $\Delta F$

$$\Delta F = 3,6 (\Delta P_с + \Delta P_м + \Delta P_з) / v \quad (2.29)$$

Следовательно, сила тяги на ободу движущего колеса  $F$  меньше электромагнитной силы  $F_{эм}$  на значение потерь  $\Delta F$

$$F = F_{эм} - \Delta F \quad (2.30)$$

или с учетом (2.29)

$$F = 3.6 \cdot C \Phi I - \Delta F \quad (2.31)$$

КПД полезного двигателя  $\eta$ , с учетом (2.21) и (2.22), получим

$$\eta = \frac{U_d I - \Delta P}{U_d I} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma} + \Delta P_c + \Delta P_m + \Delta P_z}{U_d I} \quad (2.32)$$

*Расчет электромеханических характеристик.*

Электромеханические характеристики ДПТ на ободе движущего колеса  $v(I)$ ,  $F_{\Sigma}(I)$ ,  $F(I)$ ,  $\eta(I)$  рассчитывают по выражениям (2.20), (2.29), (2.31) и (2.32). для того чтобы построить характеристики  $v(I)$  и  $F_{\Sigma}(I)$  при заданном напряжении на двигателе, должна быть предварительно определена зависимость  $C\Phi(I)$ .

Характеристики  $F(I)$  и  $\eta(I)$  рассчитывают по (2.31) и (2.2). Для определения силы тяги двигателя  $F = F_{\Sigma} - \Delta F$  необходимо найти  $\Delta F$  по сумме магнитных и механических потерь в двигателе и передаче.

Механические потери  $\Delta P_m$  в двигателе прямо пропорциональны частоте вращения. Магнитные потери  $\Delta P_c$  складываются из потерь, вызванных вихревыми токами, и зависят от частоты вращения двигателя и его магнитного потока, который определяется током возбуждения. Сумму механических и магнитных потерь обычно представляют в виде семейства кривых в зависимости от частоты вращения якоря  $(\Delta P_m + \Delta P_c) = f(n)$  при различных значениях тока возбуждения  $I_b$ . На рис.2.2 представлены зависимости  $C\Phi$  от магнитодвижущей силы  $F_m$  при различных значениях тока якоря и зависимость механических и магнитных потерь от частоты вращения якоря при различных значениях магнитодвижущей силы для трамвайного двигателя ДК-254Б.

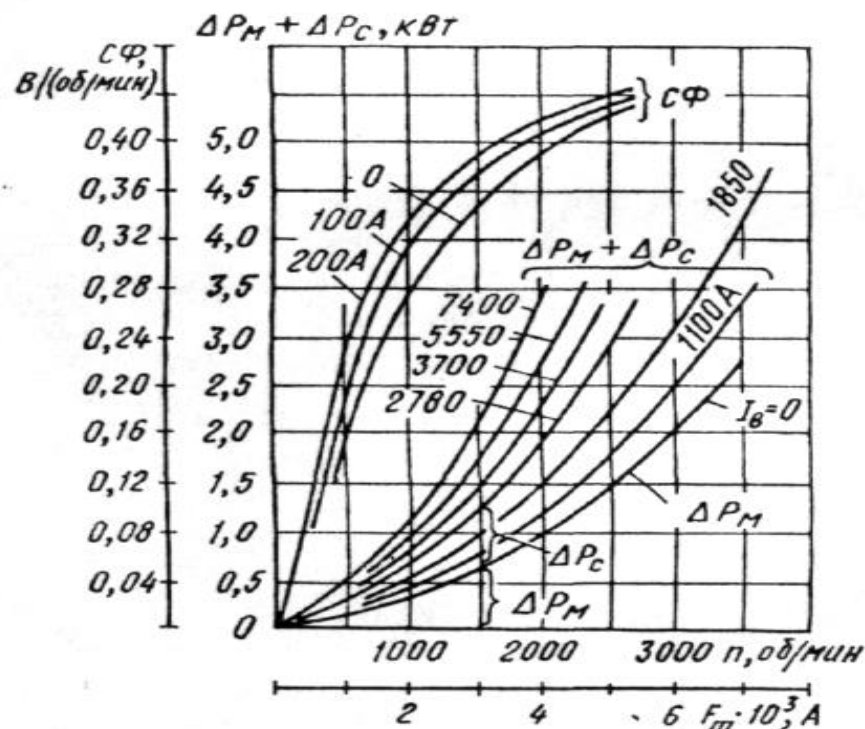


Рисунок 2.2 - Зависимости магнитного потока от магнитодвижущей силы  $P_m$  возбуждения, механических и магнитных потерь от частоты вращения якоря тягового двигателя ДК-254Б

При этом кривая  $f(n)$  при  $I_B=0$  соответствует одним лишь механическим потерям  $\Delta P_m$ , а разность ординат между кривыми при  $F_m=2780$  А и  $I_B=0$  представляет собой магнитные потери холостого хода, или, как их называют, основные магнитные потери  $\Delta P_c$ .

Наряду с основными магнитными потерями, соответствующими Х.Х. электрической машины, при нагрузке возникают добавочные магнитные потери. Их приближенно учитывают умножением основных магнитных потерь на некоторый поправочный коэффициент. Характеристику  $\eta(I)$  рассчитывают по формуле (2.30) после того, определены все величины, входящие в нее.

### *Характеристики двигателей последовательного возбуждения (ПВ)*

У двигателей ПВ магнитодвижущая сила (МДС) пропорциональна току якоря  $I$ . Поэтому зависимость  $C\Phi(I)$  близка по форме к зависимости магнитного потока  $\Phi(I_B)$ , снятой при независимом возбуждении и отсутствии нагрузки.

Чтобы построить зависимость  $C\Phi(I)$ , необходимо воспользоваться нагрузочными характеристиками  $\Phi(I_B)$ , снятыми при различных токах якоря. На каждой из кривых  $\Phi(I_B)$  следует отметить точку, соответствующую  $I_B$ , равному току якоря  $I$ , для которого построена эта кривая. Соединив эти точки, найдем зависимость  $C\Phi(I)$ .

В данном случае кривая  $C\Phi(I)$  будет соответствовать не Х.Х. возбужденной машины, а нагрузочному режиму с токами якоря  $I$ , равными в любой точке кривой токам возбуждения  $I_B$ . На основе этой зависимости можно построить скоростные характеристики двигателя ПВ  $v(I)$  и электромагнитной силы  $F_{эм}(I)$ .

Скорость двигателя  $v$ , приведенная к ободу движущего колеса, приблизительно пропорциональна потоку; при токе, близком к нулю, она близка к бесконечности. С увеличением тока скорость вначале резко падает, что соответствует прямолинейной части характеристики  $C\Phi(I)$ . При дальнейшем увеличении тока по мере насыщения магнитной цепи машины скорость снижается в меньшей степени.

Электромагнитная сила  $F = 3.6C\Phi I$  при малых нагрузках, когда магнитный поток прямо пропорционален току, растет от нуля приблизительно пропорционально квадрату тока, т.е. по параболической зависимости. При дальнейшем увеличении нагрузки по мере насыщения машины кривая  $F_{эм}(I)$  отклоняется от параболы и приближается к прямой, т.е. изменяется пропорционально току.

Характеристика силы тяги  $F(I)$  подобна характеристике электромагнитной силы, но ее ординаты меньше на величину  $\Delta F$ , определяемую магнитными и механическими потерями в двигателе и потерями в передаче. Поэтому кривая  $F(I)$  не проходит через начало координат, а пересекает ось абсцисс при некотором малом токе  $I_x$ , соответствующей ХХ машины. При таком токе и номинальном напряжении работа двигателя недоступна из-за резкого повышения частоты вращения якоря.

Характеристика  $\eta(I)$  при малых нагрузках стремится к нулю при токе  $I_x$  и силе тяги, равной нулю. Эта точка соответствует ХХ, когда вся подведенная мощность затрачивается в основном на покрытие механических потерь и достигает своего максимума в области, близкой к номинальным нагрузкам. Точка расположения максимума КПД зависит от соотношения электрических и механических потерь.

При дальнейшем увеличении нагрузки КПД постепенно снижается в результате увеличения электрических потерь, пропорциональных квадрату тока.

При нагрузке, намного превышающей допустимую, при которой падения напряжения в двигателе  $I_r$  становится равным напряжению  $U_d$ , скорость  $v = (U_d - I_r) / C\Phi$ , отданная мощность  $Fv$  и, следовательно, КПД станут равными нулю. Этот предельный режим соответствует заторможенному состоянию двигателя, при котором вся подведенная мощность  $U_d I$  затрачивается на покрытие электрических потерь  $I^2 r$ .

Электромеханические характеристики на ободу движущего колеса зависят от диаметра колеса  $D_k$ , передаточного отношения редуктора  $\mu$  и его КПД  $\eta_z$ . Если эти величины изменяются, то изменяется и характер электромеханических характеристик данного двигателя на ободу колеса. Поэтому на электромеханических характеристиках двигателя на ободу колеса обязательно указываются значения  $D_k$ ,  $\mu$  и  $\eta_z$ .

### *Характеристики двигателя параллельного возбуждения*

У такого двигателя обмотку возбуждения к сети подключают через регулируемый реостат. Ток возбуждения пропорционален приложенному напряжению, следовательно, МДС не зависит от тока якоря. С увеличением тока якоря  $I$  магнитный поток СФ незначительно уменьшается из-за размагничивающего действия реакции якоря (рис.2.3). Скоростная характеристика  $v(I)$  жесткая, т.е. скорость почти не зависит от нагрузки. С увеличением нагрузки скорость только незначительно уменьшается вследствие увеличения падения напряжения в цепи двигателя  $I_r$ .

Характеристика электромагнитной силы тяги  $F_{эм}(I)$  изображается прямой линией, проходящей через начало координат, т.к. магнитный поток практически постоянен. Сила тяги отличается от электромагнитной силы на значение потерь  $\Delta F$  и пересекает ось абсцисс при токе ХХ  $I_x$ .

Если приложить к ПС внешнюю силу, направленную по движению, то скорость ПС и ЭДС начнут увеличиваться. При некоторой скорости, равной  $v_0$ , ЭДС двигателя станет равной приложенному напряжению  $U_d$ . Ток в двигателе в соответствии с (2.2) станет равным нулю. При дальнейшем увеличении скорости ЭДС станет больше приложенного напряжения, и ток в двигателе изменит свое направление.

Т.к. направление магнитного потока при этом не изменится, то сила тяги тоже изменит свой знак и будет направлена против движения, следовательно, станет тормозной силой. Тяговый двигатель при этом автоматически перейдет в генераторный режим и будет отдавать энергию в тяговую сеть.

Такой режим называется *рекуперативным торможением*. При этом двигатели будут тормозить ПС, одновременно возвращая электрическую энергию в питающую сеть.



Скоростная характеристика двигателя параллельного возбуждения (рис.2.3) в генераторном режиме расположена во втором квадранте, а характеристики электромагнитной силы и силы тяги – в третьем и являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима.

Кривая КПД  $\eta(I)$  двигателя параллельного возбуждения в тяговом режиме имеет такой же вид, как у двигателя последовательного возбуждения. В генераторном режиме КПД представляет отношение отданной электрической мощности к подведенной механической мощности. Он равен нулю при токе якоря, равном току параллельных цепей  $I_{\text{п}}$ , затем, увеличиваясь, достигает максимума при отрицательных нагрузках, близких к номинальным, и вновь начинает уменьшаться по мере дальнейшего увеличения нагрузки.

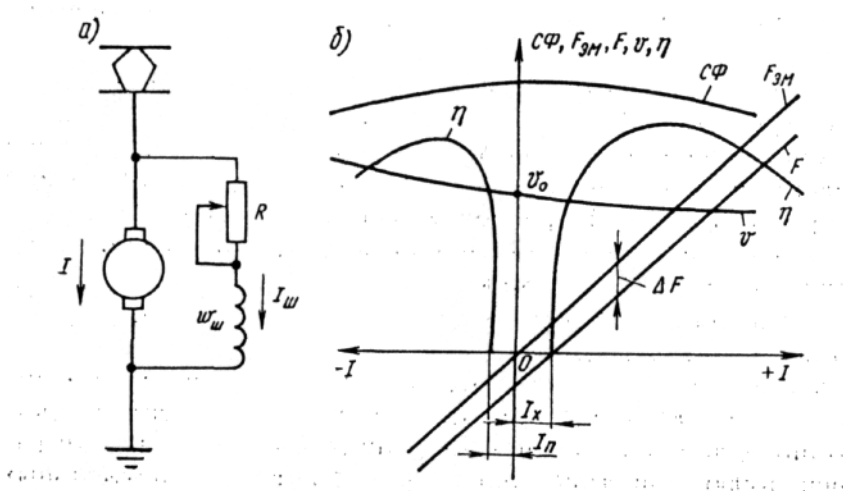


Рисунок 2.3– Характеристики двигателя параллельного возбуждения

### *Характеристики двигателя согласно-смешанного возбуждения*

Двигатели смешанного возбуждения имеют две обмотки возбуждения: последовательную и параллельную. У двигателя смешанного возбуждения МДС обеих обмоток складываются.

Скоростная характеристика двигателя  $v(I)$  имеет примерно такой же вид, как и у двигателя последовательного возбуждения, но сдвинута влево на ток  $I_0$ . В действительности скоростные характеристики двигателя смешанного возбуждения и последовательного возбуждения несколько отличаются по форме, т.к. при одинаковых МДС токи якоря, а следовательно, и падение напряжения в силовой цепи двигателя будут различны.

При токе якоря, равном нулю, в двигателе смешанного возбуждения остается МДС параллельной обмотки. Это обеспечивает автоматический переход в генераторный режим. При этом ток якоря изменяет свое направление, а ток в параллельной обмотке протекает в том же направлении, что и в двигательном режиме, поэтому в режиме рекуперативного торможения машина работает, как генератор встречно-смешанного возбуждения. При этом МДС последовательной обмотки вычитается из МДС параллельной обмотки. Поэтому с увеличением тока рекуперации

магнитный поток в машине будет уменьшаться, скорость сильно возрастет и будет стремиться к бесконечности при токе рекуперации, равном  $I_0$ .

Характеристика электромагнитной силы тяги  $F_{эм}(I)$  в двигательном режиме практически прямолинейна, вследствие того, что машина работает в насыщенной области магнитной характеристики. При переходе в генераторный режим электромагнитная сила тяги меняет знак и становится тормозной силой, препятствующей движению ПС. По мере увеличения тока рекуперации электромагнитная сила  $F_{эм}=3.6CФI$  сначала возрастает по абсолютному значению. При больших токах рекуперации абсолютное значение  $F_{эм}$  уменьшается и при токе рекуперации  $I_0$  падает до нуля, т. к. намагничивающая сила становится равной нулю.

Сила тяги  $F$  меньше электромагнитной силы на значение потерь  $\Delta F$ . При этом в двигательном режиме сила тяги  $F$  по абсолютному значению меньше, а в генераторном режиме больше электромагнитной силы  $F_{эм}$ .

Характеристики  $\eta(I)$  как в двигательном, так и в тормозном режиме имеют такой же вид, как и у двигателя параллельного возбуждения. КПД равен нулю в тяговом режиме при токе  $XX I_x$ , а в генераторном режиме – при токе якоря  $I_{ш}$ .

*Характеристики двигателя встречно-смешанного возбуждения.* У двигателя встречно-смешанного возбуждения МДС обеих обмоток не складывается, а вычитается при двигательном режиме.

Двигатель встречно-смешанного возбуждения, у которого МДС последовательной обмотки больше МДС параллельной обмотки, обладает практически такими же характеристиками, как и двигатель последовательного возбуждения. Отличие заключается в том, что начало кривой  $CФ(I)$  сдвигается от начала координат вправо на значение тока  $I_0 = I_{ш}$ . Поэтому на это же значение тока сдвигаются вправо все электромеханические характеристики.

## Тема 2.2 Тяговые характеристики подвижного состава

*Зависимость между силой тяги ПС и его скоростью  $v$  на той или иной ступени регулирования и соответствующих ей параметрах схемы включения двигателя называется тяговой характеристикой ПС.*

Тяговую характеристику строят на основании электромеханических характеристик двигателя на ободе колеса. Скорость переносят без изменения, а силу тяги ПС определяют по формуле

$$F_{л} = Fz_{м} \quad (2.33)$$

где  $z_{м}$  – число ведущих осей в ПС.

Необходимо строить эти характеристики для всех ступеней регулирования, применяемых на данном ПС.

Тяговые характеристики могут иметь различный вид в зависимости от типа двигателей и системы тяги. На практике в основном используются падающие тяговые характеристики, т.е. с увеличением скорости сила тяги снижается. Но степень ее снижения может быть различна у разных двигателей. Она характеризуется *коэффициентом жесткости*

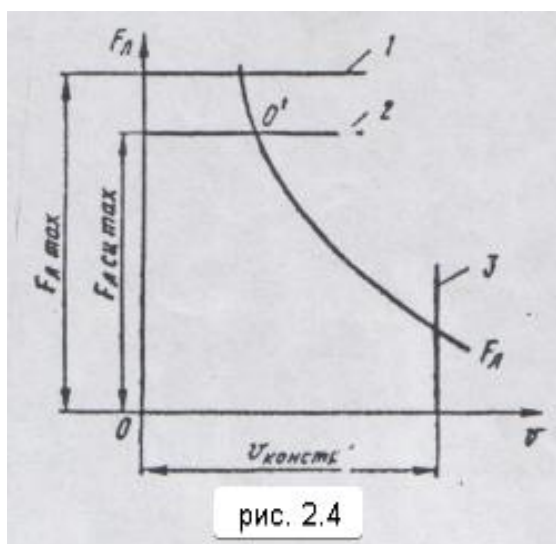
$$\chi = - dF/dv \quad (2.34)$$

Знак минус введен потому, что падающая характеристика удовлетворяет неравенству  $dF/dt < 0$ .

Характеристики, у которых сила тяги резко снижается с увеличением скорости, т.е. с высоким коэффициентом жесткости ( $dF/dt \rightarrow \infty$ ), называются жесткими. Жесткой характеристикой обладает двигатель постоянного тока параллельного возбуждения. Характеристики, у которых скорость резко изменяется с изменением силы тяги, т.е. с низким коэффициентом жесткости  $dF/dt \rightarrow 0$ , называются мягкими. К ним относятся характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Как будет показано далее, в большинстве случаев для целей тяги наиболее благоприятными являются мягкие тяговые характеристики.

Наибольшая допустимая нагрузка тягового двигателя ограничивается его механической прочностью, устойчивой коммутацией и опрокидывающим моментом. Для каждого двигателя при определенной схеме его включения установлен наибольший допустимый ток

$I_{п\ max}$  выше которого двигатель нагружать нельзя. Этому току соответствует максимальная сила тяги  $F_{л\ max}$ . Ограничение тяговой характеристики по условию максимальной нагрузки двигателя представлено на рис.2.4 линией 1.

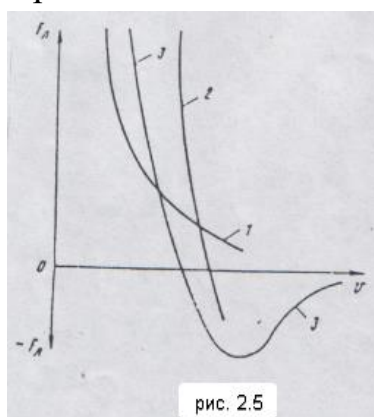


Ограничение силы тяги по сцеплению изображено линией 2 на рис. 2.4.

Наивысшая точка тяговой характеристики (точка O) будет соответствовать тому из рассмотренных ограничений, которое дает меньшую силу тяги. Для рельсового транспорта в большинстве случаев наибольшая допустимая сила тяги определяется условиями сцепления. При этом боксование колес является как бы своеобразной защитой тяговых двигателей, не допускающей их перегрузки.

Тяговые характеристики имеют ограничение также по наибольшей допустимой скорости движения, которая является конструктивной скоростью  $v_{констр}$ . Эта скорость определяется прочностью тягового двигателя и конструктивными качествами всего подвижного состава. На рис. 2.4 ограничение по наибольшей допустимой скорости представлено линией 3.

Тяговые характеристики двигателей различных систем возбуждения. Тяговые характеристики двигателей различных систем возбуждения представлены на рис. 2.5. Как видно из тяговой характеристики двигателя последовательного возбужде-



ния (кривая 1) в зоне малых скоростей сила тяги при увеличении скорости резко падает. При дальнейшем увеличении скорости сила тяги изменяется незначительно, т.е. тяговая характеристика становится мягкой.

Тяговая характеристика двигателя параллельного возбуждения (кривая 2) жесткая и близка к прямой линии. При некоторой скорости она пересекает ось абсцисс и продолжается в область отрицательных (тормозных) сил. Кривая 3 изображает тяговую характеристику двигателя согласно-смешанного возбуждения.

#### *Тема 2.4. Сравнение тяговых электродвигателей.*

##### Требования, предъявляемые к тяговым двигателям.

Основные требования:

- Электрическая устойчивость, т.е. способность автоматически стремиться к состоянию электрического равновесия при переходе с одного режима на другой;
- Механическая устойчивость, т.е. способность автоматически приближаться к состоянию динамического равновесия;
- Равномерное распределение нагрузок между параллельно работающими двигателями;
- Максимальное использование сцепного веса;
- Устойчивость коммутации;
- Наименьшее воздействие на энергосистему;
- Возможность плавного регулирования скорости и применения рекуперации;
- Простота конструкции.

##### *2.4.1. Электрическая устойчивость подвижного состава.*

Анализ электрической устойчивости работы тяговых двигателей проводится при следующих допущениях:

- Пренебрегаем вихревыми токами, возникающими в двигателе;
- Рассматриваем только силовую цепь двигателя и считаем, что при случайных отклонениях от состояния равновесия в силовой цепи токи в параллельных ветвях остаются неизменными.

Если по каким - либо причинам произойдет увеличение тока, электрически устойчивая система будет стремиться вернуться к положению равновесия, т.е. уменьшить ток.

При этом производная  $di/dt$  будет отрицательной. Если же произойдет случайное уменьшение тока, возврат к положению электрического равновесия должен сопровождаться увеличением тока. Отсюда следует, что в электрически устойчивой системе знаки отклонения тока и производной противоположны.

Для того, чтобы система находилась в состоянии электрического равновесия, необходимо, чтобы при увеличении тока  $I$  ЭДС двигателя  $C\Phi\omega$ , которая уравнивается разностью приложенного напряжения  $U_d$  и падением напряжения  $Ir$ , возрастала бы в большей степени, чем эта разность.

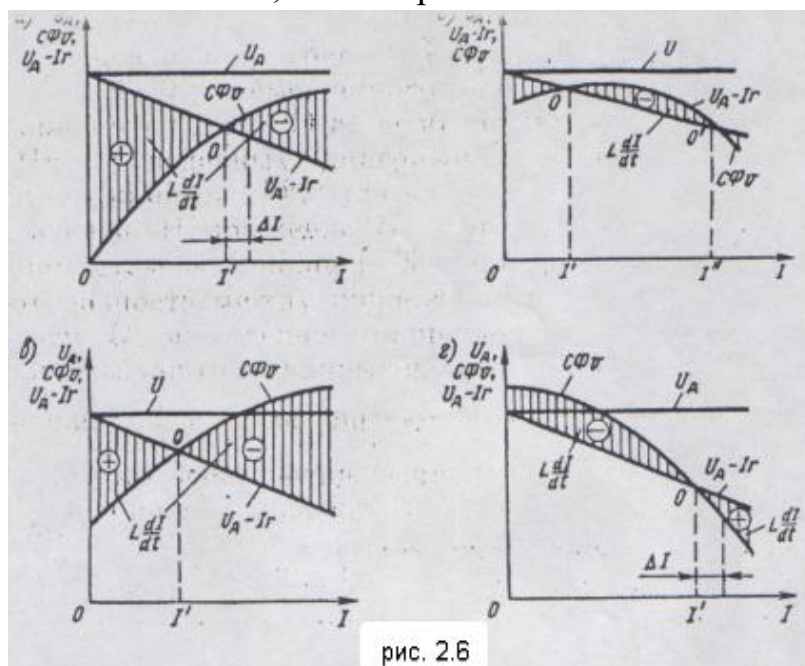


рис. 2.6

На рис. 2.6. представлены диаграммы напряжений  $U_d$ , ЭДС  $C\Phi\omega$  и падений напряжения для двигателей последовательного (рис. 2.6, а), параллельного (рис. 2.6, б) и встречного (рис. 2.6, в) и встречно – смешанного (рис. 2.6, г) возбуждения.

На приведенных диаграммах кривые ЭДС  $C\Phi\omega$  подобны кривым  $C\Phi(I)$  для каждой системы возбуждения двигателей. Напряжение  $U_d$ , приложенное к двигателю, принимается постоянным, а линии  $(U_d - Ir)$  представляют разность между приложенным к двигателю напряжением  $U_d$  и падением напряжения в цепи двигателя. Ординаты заштрихованных площадей представляют собой значения  $L \cdot di/dt$  и характеризуют знак и скорость изменения тока. Точки пересечения  $O$  являются точками электрического равновесия, как в этих точках  $C\Phi\omega = U_d - Ir$  и  $L \cdot di/dt = 0$ . Как следует из приведенных диаграмм, электрически устойчивыми являются двигатели последовательного, согласно-смешанного и параллельного возбуждения. Причем у двигателя параллельного возбуждения характеристика  $C\Phi\omega(I)$  дважды пересекаются с прямой  $U_d - Ir$  в точках  $O$  и  $O'$ . Но условие устойчивого электрического равновесия (2.45) соблюдаются только в точке  $O$ . Двигатели встречно-смешанного возбуждения в точке  $O$  и параллельного в точке  $O'$ , которые соответствуют значительным нагрузкам, неустойчивы

Проанализируем электрическую устойчивость на примере двигателя последовательного возбуждения (см. рис. 2.7). Если в точке О электрического равновесия

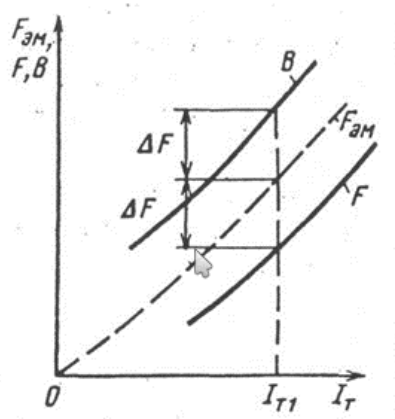


рис 2.7

произойдет случайное увеличение тока на некоторое значение  $\Delta I$ , то разность  $U_d - Ir$  станет меньше ЭДС СФв. ЭДС самоиндукции  $L \cdot dI/dt$  станет отрицательной, а это приведет к тому, что ток станет убывать. Ток будет уменьшаться до тех пор, пока  $(U_d - Ir)$  не сравняется с СФв, т.е. система возвратится в положение электрического равновесия. И наоборот, при случайном уменьшении тока на некоторое значение  $\Delta I$  от точки О электрического равновесия, СФв станет меньше  $(U_d - Ir)$ . ЭДС самоиндукции  $L \cdot dI/dt$  станет положительной, что приведет к возрастанию тока. Таким образом, подтверждается электрическая устойчивость двигателя последовательного возбуждения.

#### 2.4.2. Механическая устойчивость подвижного состава. Распределение нагрузок.

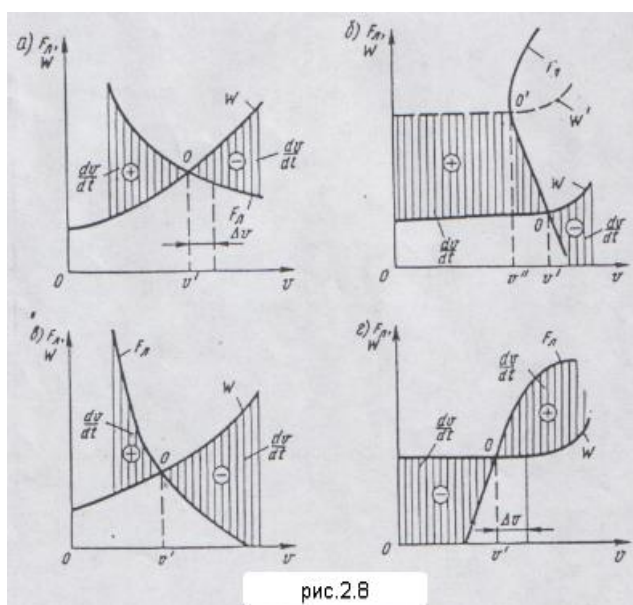


рис.2.8

Производная силы тяги по скорости должна быть меньше производной противодействующей силы. На рис. 2.8 представлены тяговые характеристики  $F_{л}(v)$ , кривые сопротивления движению  $W(v)$  для двигателей последовательного (рис.2.8, а), параллельного (рис.2.8, б), согласно-смешанного (рис.2.8, в) и встречно-смешанного (рис.2.8, г) возбуждения.



Точки пересечения  $O$  кривых  $F$  и  $W$  соответствуют установившимся скоростям  $v'$ , т.к. в них  $F_{\text{л}}=W$  и  $dv/dt=0$ . Ординаты заштрихованных площадей представляют величины, пропорциональные ускорению  $dv/dt$  с соответствующими знаками.

Устойчивым динамическим равновесием обладают двигатели последовательного (рис. 2.8,а) и согласно-смешанного возбуждения (рис.2.8,в), поскольку сила тяги  $F_{\text{л}}$  падает, а сила сопротивления движению  $W$  растет с увеличением скорости  $v$ . Так, при случайном увеличении скорости на некоторое значение  $\Delta v$  сила тяги  $F_{\text{л}}$  станет меньше силы сопротивления  $W$ . Ускорение  $dv/dt$  становится отрицательным, это приведет к тому, что скорость поезда будет уменьшаться, пока не достигнет прежней скорости  $v'$ . Двигатель параллельного возбуждения (рис. 2.12,б) устойчив только при небольших нагрузках (точка  $O$ ). При больших нагрузках (точка  $O'$ ), чему соответствует большее сопротивление движению  $W'$ , двигатель параллельного возбуждения становится механически неустойчивым, т.к. при случайном увеличении скорости сила тяги  $F_{\text{л}}$  становится больше силы сопротивления  $W'$ .

Двигатель встречно-смешанного возбуждения (рис.2.8, г) с преобладающей параллельной обмоткой механически неустойчив, поэтому он не применяется в электрической тяге.

Распределение нагрузок. Разница электромеханических характеристик двигателей одного и того же типа приводит к тому, что скорости двигателей при одном и том же значении момента неодинаковы.

Эти различия характеристик приводят к неравномерному распределению нагрузок между двигателями и, как следствие этого, неодинаковому потреблению токов.

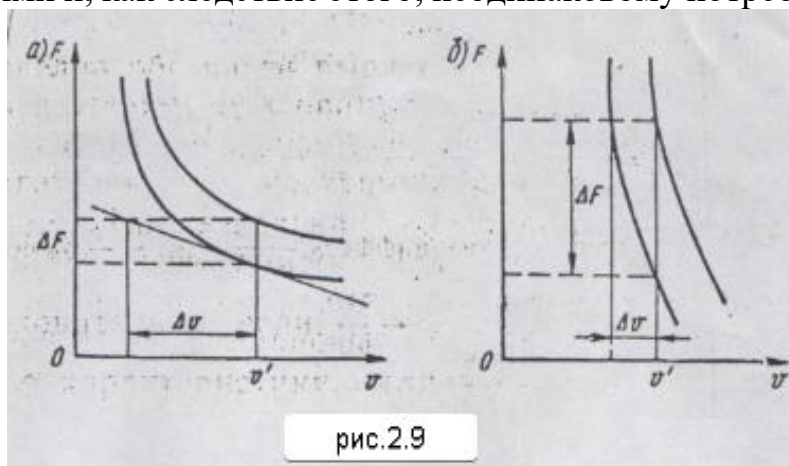


рис.2.9

Рассмотрим тяговые характеристики двух двигателей последовательного (рис.2.9, а) и параллельного (рис.2.9, б) возбуждения. Оба двигателя каждого типа установлены на одном и том же ПС и работают параллельно, поэтому скорости на ободах их колес должны быть одинаковы. Пусть они равны  $v'$ . Неравномерность в распределении нагрузок у двигателей ПВ меньше, чем у двигателей ПарВ.

Следовательно, чем мягче характеристики, тем меньше расхождение нагрузок параллельно работающих двигателей.

Следовательно, если  $dF/dv \rightarrow \infty$ , то получаем абсолютно жесткую характеристику; если  $dF/dv \rightarrow 0$ , то получаем абсолютно мягкую характеристику.

Рассмотрим скоростные характеристики этих же двигателей (рис.2.10). разли-

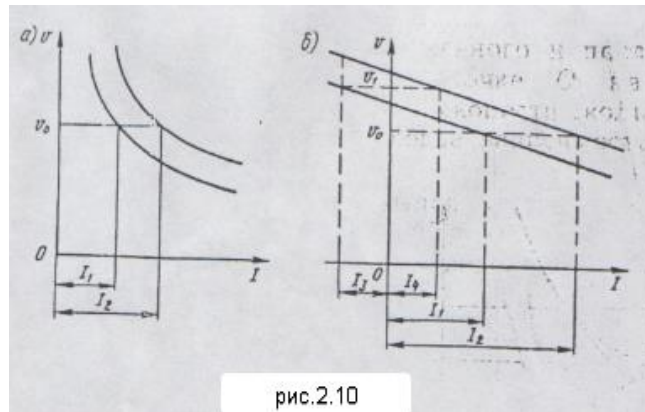


рис.2.10

чие в них приводит к тому, что при одной же скорости  $v_0$  двигатели потребляют различные токи, и это различие очень существенно у двигателей с жесткими характеристиками (рис.2.10, б, токи  $I_1$  и  $I_2$ ). Более того, при скорости  $v_1$  может получиться так, что один двигатель работает в двигательном режиме и потребляет ток  $-I_4$ , а другой – в генераторном и рекуперировывает ток  $I_3$ .

### 2.4.3. Устойчивость коммутации.

Регулирование скорости.

Тяговые двигатели, как правило, питаются от тяговой сети. Следовательно, при резких изменениях напряжений в тяговой сети изменяется напряжение на зажимах тяговых двигателей. Так, скачкообразное повышение напряжения имеет место, если рядом с потребляющим энергию ПС произойдет отключение другого ПС. При этом толчок напряжения тем выше, чем более удален ПС от тяговой подстанции.

Естественно, что частота вращения двигателя при повышении напряжения не может мгновенно измениться. Поэтому при повышении питающего напряжения, из (2.20), возрастает ток двигателя. Причем это возрастание тем выше, чем более жесткая характеристика двигателя. Из рис.2.11, даже при небольшом повышении напряжения с  $U_1''$  до  $U_2''$  при жестких характеристиках мы имеем весьма большое увеличение тока ( $\Delta I''$ ).

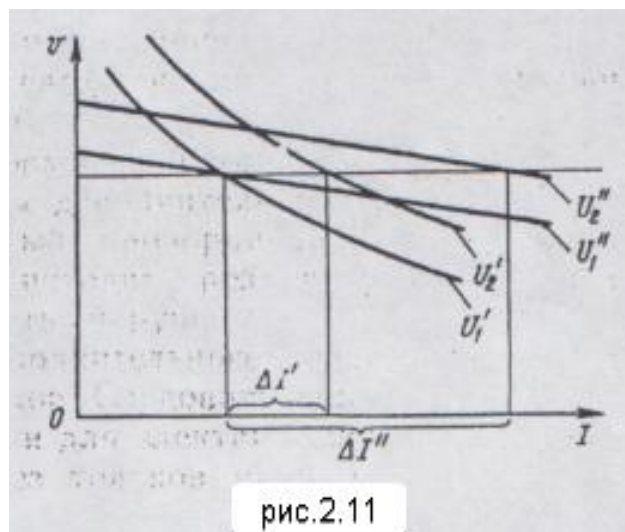


рис.2.11



При таком увеличении напряжения (с  $U_1''$  до  $U_2''$ ) на двигателях с мягкими характеристиками увеличение тока  $\Delta I'$  будет незначительно и намного меньше, чем у двигателей с жесткими характеристиками ( $\Delta I' < \Delta I''$ ). При увеличении тока свыше двойного часового нарушается коммутация двигателя, т.к. он не рассчитан на работу с такими токами.

Кроме этого, для нормальной коммутации необходимо, чтобы магнитный поток дополнительного полюса в определенных пределах был пропорционален току якоря. Если в двигателе происходит чрезмерный толчок тока, эта пропорциональность нарушается из-за отставания магнитного потока дополнительного полюса, вызванного наличием вихревых токов. Следовательно, с точки зрения надежности коммутации для электрической тяги, которая не может работать без толчков напряжения, наиболее приемлемым является двигатель последовательного возбуждения, имеющий мягкие характеристики.

Воздействие на энергосистему. Мощность тяговой подстанции постоянна ( $P = \text{const}$ ), поэтому желательно, чтобы ПС потреблял постоянную мощность

Если двигатель обладает жесткими характеристиками, то увеличение силы тяги скорость практически не меняется. Следовательно, потребляемая мощность увеличивается пропорционально увеличению силы тяги.

У двигателей с мягкими характеристиками увеличение силы тяги сопровождается почти пропорциональным уменьшением скорости, вследствие чего потребляемая мощность увеличивается в меньшей степени, чем у двигателей параллельного возбуждения. В пределе, если двигатель обладает чисто гиперболической характеристикой, которая определяется соотношением  $F_{\Delta} v = \text{const}$ , нагрузка двигателя постоянна при любых условиях движения.

Следовательно, с точки зрения системы электроснабжения наиболее предпочтительными являются мягкие характеристики.

Регулирование скорости и рекуперация. С этой точки зрения двигатели параллельного и согласно-смешанного возбуждения имеют преимущества по сравнению с двигателем последовательного возбуждения. Изменяя магнитный параллельной обмотки возбуждения, мы тем самым можем регулировать скорость в широких пределах. Одним из основных преимуществ этих двигателей является автоматический переход в генераторный режим, что позволяет легко осуществлять рекуперативное торможение.

Конструктивные показатели и оценка двигателей. В этом отношении двигатели последовательного возбуждения, имеющие простую обмотку возбуждения из обмоточной меди с большой площадью сечения, обладают значительными преимуществами по сравнению с двигателями параллельного и согласно-смешанного возбуждения, у которых параллельная обмотка, имеющая много витков из провода малой мощности сечения, ненадежна как в механическом, так и в электрическом отношении. Наличие параллельной обмотки в сою очередь приводит к увеличению габаритов и усложнению конструкции двигателя.

Таким образом, можно сделать вывод, что в результате сравнения двигателей различных систем возбуждения наиболее полно удовлетворяют условиям электрической тяги двигатели последовательного возбуждения. На трамваях и троллейбу-сах нашли применение двигатели согласно-смешанного возбуждения благодаря возможности простого регулирования скорости в широких пределах, а также простоте осуществления рекуперативного торможения. Двигатели параллельного возбуждения в электрической тяге не используются. Сравнение двигателей различных систем возбуждения по всем показателям представлено в таблице 2.2.

При применении двигателей независимого возбуждения, получающих питание

Таблица 2.2

Требования, предъявляемые к тяговым двигателям	Двигатель с возбуждением		
	последовательным	параллельным	согласно-смешанным
Электрическая устойчивость	+	+	+
Механическая устойчивость	+	+	+
Равномерное распределение нагрузок	+	-	+
Отсутствие склонности к возникновению боксования	-	+	+
Устойчивость к коммутации	+	-	+
Наименьшее воздействие на энергосистему	+	-	+
Возможность регулирования скорости в широких пределах	-	+	+
Возможность применения рекуперации	-	+	+
Простота конструкции	+	-	-

Примечание. В колонках знаки «+» означают, что двигатели удовлетворяют данным требованиям, а знаки «-» — нет.

от управляемого тиристорного преобразователя, возможно получение любых характеристик – мягких или жестких. Недостатком такой системы является установка относительно мощного тиристорного преобразователя, обеспечивающего необходимую форсировку по току двигателя в переходных режимах.

### Раздел 3. ПУСК И РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА.

#### Тема 3.1. Способы пуска.

##### 3.1.1. Условия пуска.

Учитывая, что для городского ПС характерны частые остановки с последующими пусками, параметры пускового периода необходимо выбирать так, чтобы обеспечивались наиболее экономичные и безопасные условия его работы.

В момент трогания ПС, когда  $v=0$ , ЭДС  $E=C\Phi\omega$  тяговых двигателей также равна нулю. Если двигатель включить на номинальное напряжение, то его ток определяется отношением приложенного напряжения к сопротивлению силовой цепи и будет равен току КЗ  $I_{кз}=U_{ном}/r$ , который может привести к нежелательным явлениям: нарушению коммутации тяговых двигателей, созданию больших механических нагрузок в передаче, возникновению боксования.

Для предотвращения вышеназванных явлений и ограничения пускового тока необходимо прикладывать к двигателю пониженное напряжение, либо

последовательно с тяговыми двигателями включать регулируемые пусковые резисторы (реостаты). Постепенно включая ступени реостата от скорости, равной нулю, до скорости окончания пуска  $v_p$ , производят реостатный пуск. В этот период ЭДС двигателей возрастает настолько, что возможен переход при определенном значении пускового тока  $I_p$  на характеристики двигателей при выключенных реостатах. При движении ПС желательно осуществлять его пуск с наибольшим током  $I_{pmax}$ . В этом случае увеличивается пусковая сила тяги и пусковое ускорение, повышается средняя скорость движения и уменьшаются потери в пусковых реостатах. Но несмотря на эти преимущества, нельзя выбирать пусковой ток произвольно большим. Его значения ограничиваются условиями сцепления и мощностью тяговых двигателей. Желательно поддерживать пусковой ток постоянным  $I_p = const$ . Этому соответствует практически неизменная пусковая сила тяги  $F_p$  и постоянное пусковое ускорение  $a_p$ . Таким образом, пусковой момент желательно вести при

При трогании ПС в момент включения тяговых двигателей ток и сила тяги должны быть немного снижены, т. к. быстрое увеличение тока и вращающего момента могут вызвать удары в передаче от вала двигателя к движущим осям. Резкое увеличение силы тяги может привести к обрыву сцепных приборов, а также вызвать неприятные ощущения у пассажиров.

Поэтому в самом начале пуска следует несколько ограничить пусковой ток и силу тяги и постепенно увеличивать их до значений  $I_p$  и  $F_p$ .

Из выражения (3.3) следует, что напряжение на двигателях пропорционально скорости  $v$  (рис.3.1).

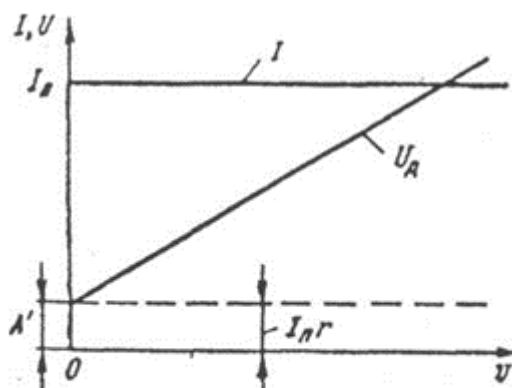


Рис.3.1 Процесс пуска тягового двигателя

В настоящее время применяют следующие системы пуска:

- плавный пуск, при котором в течение времени пуска поддерживается неизменный пусковой ток;
- ступенчатый реостатный пуск;
- безреостатный пуск, которых осуществляется с помощью импульсных преобразователей.

*Плавный реостатный пуск.*

При нем последовательно с двигателем включается пусковой реостат. Для поддержания неизменным пускового тока необходимо плавно выводить пусковой реостат по мере увеличения скорости.

После включения тягового двигателя скорость поезда начинает увеличиваться. Возникает ЭДС, равная СФ<sub>в</sub>, которая также увеличивается с ростом скорости. Если сопротивление пускового реостата  $R_{п0}$  в цепи двигателя будет неизменным, то согласно выражению (3.4) начнет уменьшаться пусковой ток. Для того чтобы поддерживать его постоянным, необходимо выводить пусковой реостат по мере увеличения скорости. Закон изменения сопротивления пускового реостата можно получить, если решить уравнение (3.4) относительно  $R_{п}$ , считая  $I=I_{п}$  и  $\Phi=\Phi_{п}$ :

При  $I_{п}=\text{const}$  магнитный поток также будет постоянен, т.е.  $\Phi_{п}=\text{const}$ .

Изобразим графически зависимость сопротивления пускового реостата от скорости  $R_{п}(v)$  при  $I_{п}=\text{const}$ .

На рис.2.2 отложим по оси ординат скорость, по оси абсцисс – вправо ток двигателя, влево – полное сопротивление силовой цепи двигателя  $R_{п}+r$ . В правом координатном углу построим скоростную характеристику  $v(I)$  при полностью выведенном пусковом реостате. Т.к. зависимость  $R_{п}(v)$  согласно выражению (3.10) при  $I_{п}=\text{const}$  является прямолинейной, то график ее может быть построен по двум точкам. Одну из этих точек  $a$  получим в момент трогания ПС, когда  $v=0$  и  $R_{п}+r=U_{д}/I_{п}$ . Другую точку можно получить при полностью выведенном пусковом реостате, т.е. при  $R_{п}=0$  и  $R_{п}+r=r$ , т.к. при этом  $v=v_{п}$ . Пусковая скорость  $v_{п}$  может быть найдена по скоростной характеристике  $v(I)$  при токе  $I_{п}$ . Точка  $c$  соответствует моменту полного выведения пускового реостата, т.е. выхода на автоматическую естественную характеристику. Если эту точку перенести на ось, отстоящую от оси ординат на величину  $r$ , то получится точка  $b$ . Соединив прямой линией точки  $a$  и  $b$ , получим закон, по которому необходимо непрерывно уменьшать  $R_{п}$ , чтобы пусковой ток на всем протяжении пуска оставался постоянным.

По мере увеличения скорости ПС сопротивление пускового реостата уменьшается по закону прямой линии (прямая  $ab$ ). Точка  $b$  соответствует моменту выхода на автоматическую характеристику, при этом пусковой реостат полностью выведен ( $R_{п}=0$ ), после чего двигатель работает по автоматической характеристике, и скорость изменяется в зависимости от тока ПС и сил сопротивления движению.

Плавным регулированием сопротивления пускового реостата обладают системы пуска с многокулачковыми или коллекторными контроллерами, с угольными реостатами.

Вышеназванные системы пуска относительно сложны, т.к. плавное регулирование пускового реостата связано с усложнением системы управления. Поэтому на электроподвижном составе применяется ступенчатое выведение пускового реостата.

Ступенчатый пуск. Выбор пускового тока.

При ступенчатом реостатном способе пуска уже невозможно поддерживать постоянным пусковой ток  $I_{п}$ , а, следовательно, пусковое ускорение  $a_{п}$  и пусковую силу тяги  $F_{п}$ . Они будут изменяться в некоторых пределах от максимума до минимума. Во время разгона ПС на какой-либо ступени реостата с неизменным сопротивлением ток начнет уменьшаться, т.к. будет возрастать ЭДС по характеристике,

соответствующей данной ступени реостата. В момент выключения ступени реостата происходит переход с одной скоростной характеристики на другую, которая соответствует меньшему значению сопротивления пускового реостата. В результате этого резко возрастает ток двигателя.

### 3.1.3. Энергетика пуска.

Рассмотрим процесс пуска для одного двигателя при постоянном пусковом токе и следующих допущениях:

- магнитные и механические потери в двигателе малы и ими можно пренебречь,
- сопротивление движению при пуске постоянно.

В этом случае пусковая сила тяги  $F_n$ , поток  $C\Phi_n$  и ускорение  $a_n$  будут постоянными.

Если все ординаты диаграммы напряжений умножить на пусковой ток  $I_n$ , получим диаграмму распределения мощностей при пуске (рис. 3.2). Прямая 1 изображает электромагнитную мощность двигателя, которая равна полезной мощности двигателя в период пуска. Прямая 2 соответствует подведенной к двигателю мощности, а разность ординат подведенной и полезной мощностей – потерям мощности в двигателе и передаче. Ординаты линии  $U_c I_n$  соответствуют мощности, потребляемой из сети. Энергия – это интеграл мощности по времени, определяется по диаграмме рис.3.2 площадями, ограниченными линиями мощностей и осями координат: полезная работа двигателя за время пуска – площадью  $S_3$ ; энергия, подведенная к двигателю – площадью  $S_2+S_3$ , потери энергии в двигателе – площадью  $S_2$ , энергия, потребляемая из сети, площадью  $S_1+S_2+S_3$ . Отсюда следует, что потери в пусковых реостатах равны энергии, переработанной тяговыми электродвигателями.

Чтобы уменьшить эти потери, на практике применяют перегруппировку двигателей, соединяя их вначале последовательно, а потом – параллельно.

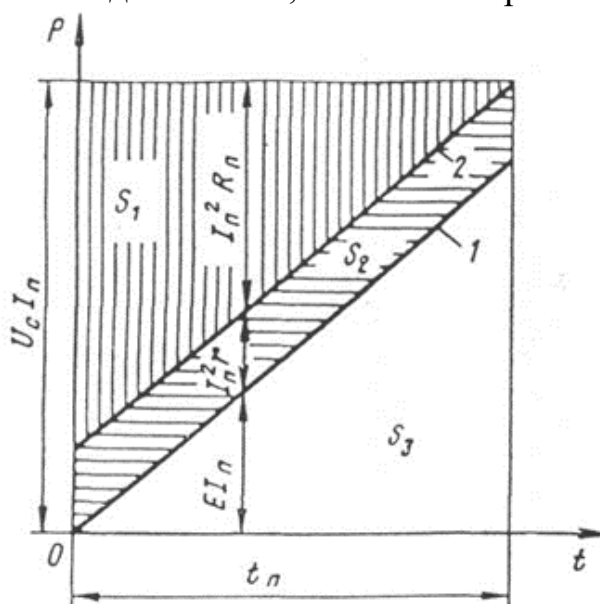


Рис.3.2 Диаграмма распределения мощности одного двигателя при пуске

Диаграмма распределения мощностей при таком пуске представлена на рис.3.3.

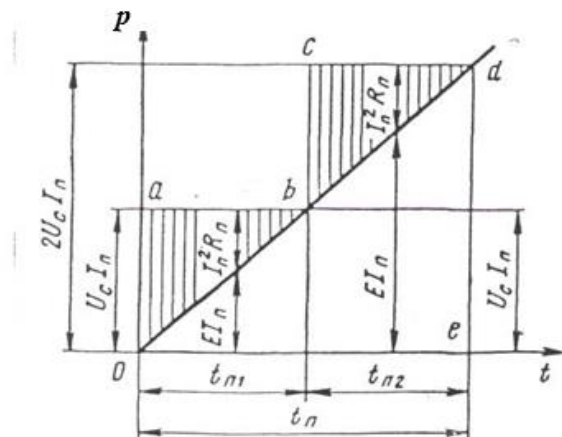


Рис.3.3 Диаграмма распределения мощности при последовательно-параллельной перегруппировке двигателей в процессе пуска

Здесь полезные мощности изображаются прямой линией  $O$ , проходящей через начало координат, а мощность, потребляемая из сети, линией  $O$ . При пуске с двумя группировками двигателей подведенная мощность вначале равна  $U_c I_n$ , а затем удваивается. Потери в пусковых реостатах представляют собой заштрихованные площади. Эти потери уменьшились в два раза по сравнению с потерями на рис.3.5. для простоты здесь также не учитывались и электрические потери.

Отношение энергии потерь к полезно затраченной энергии на пуск ПС называют коэффициентом пуска  $k_n$ . Так как  $k_n$  будет равен отношению площадей суммы треугольников  $O$  и  $k$  площади треугольника  $O$  или

### Тема 3.2. Регулирование скорости тягового двигателя.

Из выражения (3.22) следует, что скорость двигателя можно регулировать тремя способами:

1. Изменением напряжения на зажимах двигателя  $U_d$ ,
2. Включением последовательно с двигателями регулируемого резистора сопротивлением  $R$ ,
3. Изменением магнитного потока  $C\Phi$ .

Изменение напряжения на зажимах тягового двигателя при заданном напряжении контактной сети можно осуществить различными путями. На ГЭТ нашли применение переключения тяговых двигателей с последовательного на параллельное соединение; использование импульсного регулирования.

Последовательно-параллельное переключение тяговых двигателей – достаточно экономичный способ и не требует сложного дополнительного оборудования. На рис.3.4 показаны схемы переключения четырех тяговых двигателей.

Вначале двигатели соединяют последовательно (рис.3.4, а), при этом к каждому двигателю прикладывается напряжение  $U/4$ . При последовательно-параллельном соединении двигателей (рис.3.4, б) напряжение, приложенное к двигателю, увеличивается и становится равным  $U/2$ .

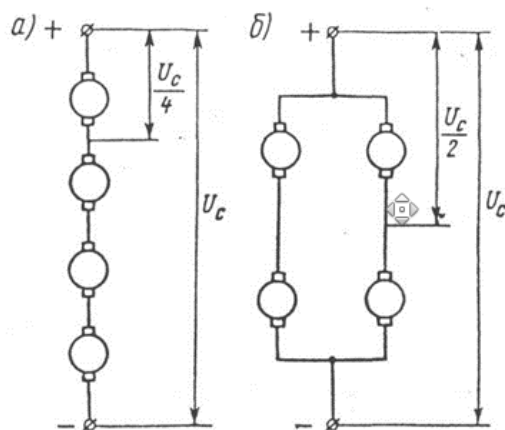


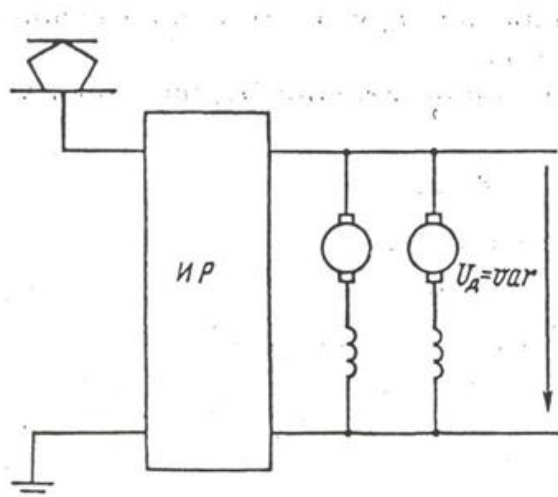
Рис.3.4 Схемы переключения четырех тяговых двигателей

Недостатки:

- отсутствие плавного регулирования скорости,
- наличие значительного числа коммутационной аппаратуры,
- при последовательном соединении двигателей – мягкие тяговые характеристики, что способствует боксованию.

В настоящее время применяются способы регулирования напряжения с помощью статических полупроводниковых преобразователей на ПС. Наиболее целесообразным является использование тиристорных импульсных регуляторов. В этом случае напряжение контактной сети прикладывается к импульсному регулятору ИР (рис.3.5), на выходе которого получаем регулируемое в широких пределах напряжение, которое подводится к тяговым двигателям.

Рис.3.5 Схема э. п. с. с импульсным регулятором



### Тема 3.3. Характеристики двигателей при изменении напряжения

#### 3.3.1. Расчет характеристик последовательного возбуждения.

Если для двигателей данного типа имеются характеристики при номинальном напряжении, их можно пересчитать на другое напряжение.

Скоростная характеристика тягового двигателя  $v(I)$  при любом напряжении может быть рассчитана на основании выражения (3.22). Для этого необходимо иметь характеристику  $S\Phi(I)$  данного двигателя. Если эта характеристика не задана, ее можно определить на основании заданной скоростной характеристики  $v(I)$  при напряжении  $U_d$ , пользуясь выражением (3.22)

Для двигателей ПВ более удобен непосредственный пересчет скоростной характеристики с одного напряжения на другое без построения промежуточной кривой  $S\Phi(I)$ .

Т. к. магнитный поток  $S\Phi$  двигателя ПВ зависит только от тока нагрузки  $I$ , то при данном токе магнитный поток будет иметь одно и то же значение при любых уровнях напряжения на двигателе.

Электрохимические характеристики при различных уровнях напряжения  $U_{д1}$  и  $U_d$  построены на рис.3.6. Характеристика КПД  $\eta(I)$  при любом значении напряжения на двигателе может быть рассчитана, если имеется зависимость магнитных и механических потерь от скорости и тока возбуждения. Возможно приближенное определение КПД  $\eta_1$  при напряжении  $U_{д1}$  и КПД  $\eta$  при напряжении  $U_d$ . При этом

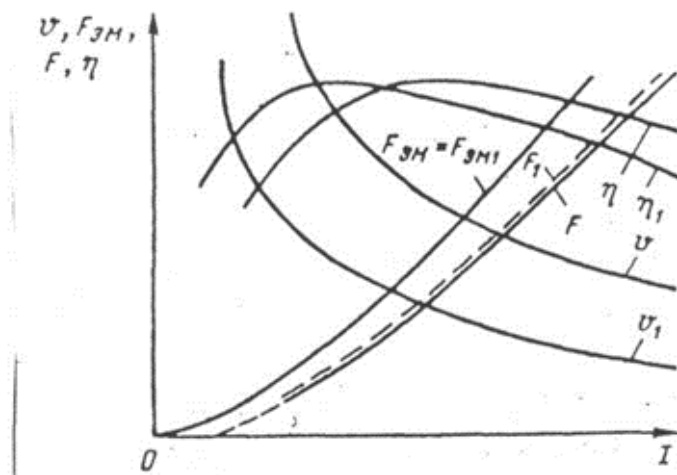


Рис.3.6 — Электрохимические характеристики на ободу движущего колеса 1 при изменении напряжения на двигателе

считаем, что при одинаковых токах сумма магнитных и механических потерь, включая потери в передаче, пропорциональна квадрату скорости, а, следовательно, и квадрату напряжения.

Электрические потери  $I^2r$  при одном и том же токе одинаковы при любых уровнях напряжения.

При понижении напряжения КПД в области малых нагрузок увеличивается благодаря уменьшению магнитных и механических потерь (см. рис.3.6). В области средних и больших нагрузок КПД при понижении напряжения уменьшается в результате роста удельного веса электрических потерь. Характеристика силы тяги  $F(I)$  определяется на основании электромагнитной силы  $F_{эм}$  и потерь  $\Delta F$ .

*Тема 3.4. Расчет характеристик при изменении сопротивления реостата.*



Рассмотрим, как влияет на регулирование скорости включение последовательно с тяговым двигателем регулируемого реостата  $R$ . В этом случае скоростную характеристику можно рассчитать по характеристике  $C\Phi(I)$ .

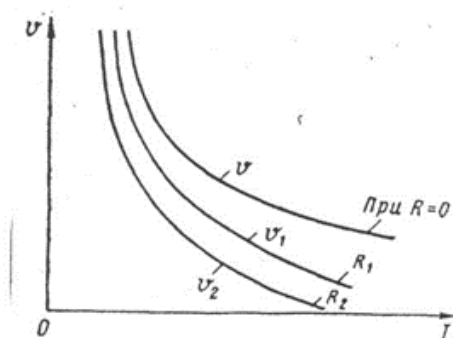


Рис.3.7 — Скоростные характеристики при изменении сопротивления в цепи двигателя

На рис.3.7 представлены скоростные характеристики двигателя при полном напряжении и при введенных в цепь двигателя двух значений сопротивлений реостата  $R_1$  и  $R_2$ , причем  $R_2 > R_1$ . Как следует из этих характеристик, скорости  $v_1$  и  $v_2$  мало отличаются от скоростей  $v$  в зоне малых нагрузок. По мере возрастания нагрузки увеличивается падение напряжения на сопротивлении реостата  $IR$ , и различие скоростей становится значительным. Но чем больше сопротивление, включенное в цепь двигателя, тем круче падает скоростная характеристика.

Такой способ для длительного регулирования скорости применяется редко, т.к. он обладает существенными недостатками:

- Значительные потери энергии в реостате,
- Скоростные характеристики получаются мягкими, что увеличивает вероятность возникновения боксования.

Как правило, такой способ регулирования применяется в сочетании с перегруппировкой двигателей.

### Тема 3.5. Характеристики двигателей при изменении возбуждения.

Способы изменения возбуждения. У двигателей ПВ изменение возбуждения можно осуществлять различными способами:

- Шунтированием обмотки возбуждения,
- Секционированием обмотки возбуждения,
- Регулированием возбуждения с помощью специального возбудителя,
- Импульсным регулированием возбуждения.

Принципиальная схема шунтирования обмотки возбуждения представлена на рис.3.8.

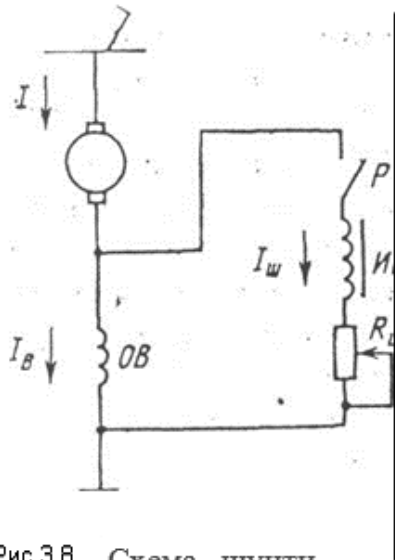


Рис.3.8 Схема шунтирования обмотки возбуждения двигателя

В этом случае параллельно обмотке возбуждения ОВ подключается регулируемый реостат  $R_{ш}$ . Индуктивный шунт ИШ служит для сглаживания бросков тока при резком изменении напряжения в контактной сети. Если правильно подобран шунтирующий контур, то всегда сохраняется равенство:

$$L_{ОВ}/r_{ОВ} \approx L_{ИШ}/R_{ИШ}$$

При нормальном возбуждении контактор Р разомкнут, и ток якоря I равен току возбуждения  $I_в$ . Для ослабления возбуждения контактор Р замыкается, и через обмотку возбуждения ОВ будет протекать только часть тока якоря  $I_в = I - I_{ш}$ . Следовательно, уменьшится магнитный поток СФ и увеличится скорость. Этим способом можно получить необходимое число ступеней ослабления возбуждения.

При секционировании обмотки возбуждения изменение возбуждения осуществляется отключением части обмотки возбуждения путем включения контактора Р2 (рис.3.9).

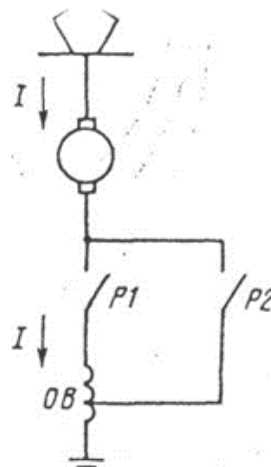


Рис.3.9 Схема секционирования обмотки возбуждения

Этот способ не получил распространения, т.к. имеет ряд существенных недостатков:

- усложнение конструкции тягового двигателя, связанное с изготовлением отпаек на обмотке возбуждения;
- наличие такого переходного момента, когда замкнуты оба контакта P1 и P2, т.е. часть обмотки возбуждения ОВ практически замкнута накоротко, что может привести к нарушению коммутации и возникновению кругового огня.

Система регулирования возбуждения с помощью специального возбудителя (рис.3.10) состоит в том, что параллельно обмотке возбуждения ОВ через разделительный резистор R подключается специальный возбудитель В. изменяя возбуждение возбудителя, т.е. напряжение на нем, можно изменять в широких пределах ток возбуждения двигателя М. Такой возбудитель может быть как электромашинный, так и тиристорный. Эта схема нашла применение в режиме рекуперации. Резистор R необходим, чтобы от одного возбудителя, возможно было осуществлять питание нескольких обмоток возбуждения параллельно соединенных двигателей.

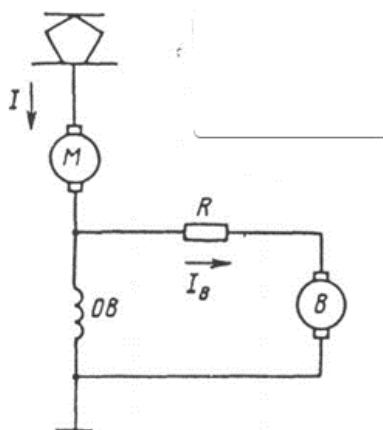


Рис.3.10 Регулирование возбуждения с помощью возбудителя

При импульсном регулировании возбуждения параллельно обмотке возбуждения подключается импульсный тиристорный регулятор, который действует как шунтирующее сопротивление. Благодаря своему быстродействию импульсный регулятор позволяет сохранить четкое деление тока якоря между обмоткой возбуждения и регулятором в переходных режимах, что важно для хорошей коммутации двигателя.

Степень изменения возбуждения в двигателях последовательного возбуждения характеризуется коэффициентом регулирования возбуждения  $\beta$ , который выражается отношением МДС при измененном возбуждении, к МДС при полном возбуждении. Если изменение возбуждения осуществляется шунтированием обмотки возбуждения ОВ (рис.3.8)

Если изменение возбуждения осуществляется секционированием обмотки возбуждения (рис.3.9), ток возбуждения остается неизменным и равным нулю, но число витков обмотки возбуждения ОВ изменяется.

Сопротивление цепи возбуждения при измененном возбуждении

$$r'_B = \beta r_B$$

При  $\beta < 1$  получаем ослабленное возбуждение, а при  $\beta > 1$  - усиленное.

Расчет скоростной характеристики при регулировании возбуждения производится по формуле

$$v' = (U_d - Ir') / C\Phi' \quad (3.40)$$

где  $v'$  - скорость при измененном возбуждении и токе якоря  $I$ ,

$r'$  - полное сопротивление двигателя при измененном возбуждении,

$r_{я}, r_{дп}, \beta r_{в}$  - сопротивление обмоток якоря, дополнительных полюсов и обмотки возбуждения при измененном возбуждении,

$C\Phi'$  - магнитный поток при токе якоря  $I$  и МДС, соответствующей току возбуждения  $\beta I$

Для расчета скоростной характеристики при измененном возбуждении должна быть известна зависимость  $C\Phi' = f(I_{в})$  для различных токов якоря. Если таких зависимостей нет, расчет скоростной характеристики можно произвести приближенным способом на основании скоростной характеристики  $v(I)$  для режима полного возбуждения.

На рис.3.11 представлены характеристики на обode движущего колеса двигателя ПВ при номинальном напряжении на двигателе  $U_d$  и полном и ослабленном возбуждениях. Кривая КПД при ослабленном возбуждении проходит ниже, чем при полном в области малых нагрузок, вследствие увеличения магнитных и механических потерь. В области средних и больших нагрузок КПД  $\eta'$  увеличивается вследствие уменьшения сопротивления цепи возбуждения двигателя. Сила тяги  $F'$  при ослабленном возбуждении уменьшается, т.к. уменьшается магнитодвижущая сила.

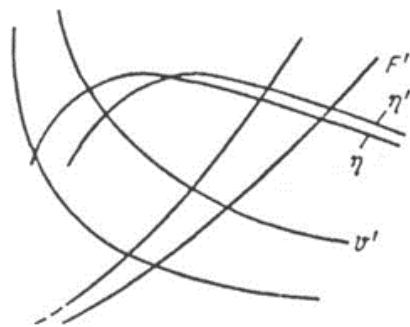


Рис.3.11 Электромеханические характеристики на обode движущего колеса двигателя последовательного возбуждения при полном и ослабленном возбуждении

*Характеристики двигателя смешанного возбуждения при изменении возбуждения.* У двигателей смешанного возбуждения регулирование возбуждения осуществляется изменением тока возбуждения  $I_{ш}$  параллельной обмотки. Коэффициентом регулирования возбуждения этой обмотки называется отношение магнитодвижущей силы при определенной ступени регулирования к магнитодвижущей силе при наибольшем токе возбуждения.

На рис.3.12 представлены характеристики двигателя смешанного возбуждения для коэффициентов регулирования  $\beta$  и  $\beta_1$ , причем  $\beta_1 < \beta$ .

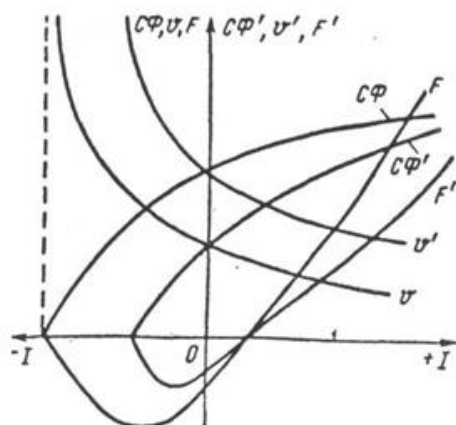


Рис.3.12 Характеристики двигателя согласно-смешанного возбуждения:

### Тема 3.6. Тиристорно-импульсное управление тяговым двигателем.

#### 3.6.1. Принцип импульсного управления.

При импульсном управлении энергия подводится к тяговым двигателям и накопительным элементам в виде отдельных импульсов. В промежуток времени между импульсами энергия в тяговые двигатели поступает от накопительных элементов, в качестве которых используются катушки индуктивности и конденсаторы. Рассмотрим простой случай импульсного управления (рис.3.13).

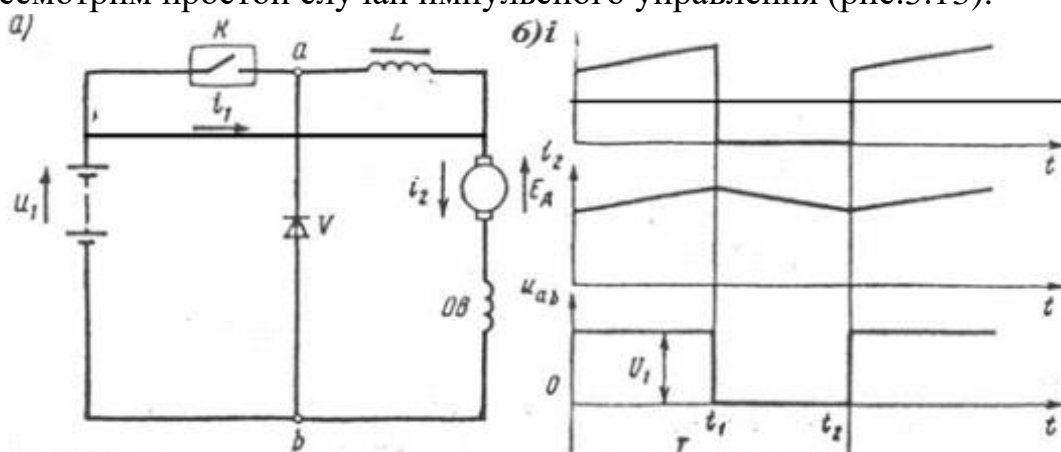


Рис.3.13 Принципиальная схема (а) и диаграмма (б) импульсного регулирования

В период времени  $0-t_1$  ключ  $K$  замкнут и через тяговый двигатель протекает ток  $i_2=i_1$ . Нарастание тока определяется индуктивностью цепи  $L$  и разностью напряжений  $U_1-E_d$

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_1 - E_d}{L} \quad (3.41)$$

Пренебрегаем активными потерями в элементах схемы. За счет увеличения тока  $i_2$  происходит увеличение энергии, накопленной в индуктивности  $L$ , которая включает в себя и индуктивность тягового двигателя.

В период времени  $t_1$ - $t_2$  ключ  $K$  разомкнут, ток  $i_1=0$ . Через тяговый двигатель протекает ток  $i_2$ , который замыкается через вспомогательный диод  $V$  и поддерживается за счет энергии, накопленной в индуктивности  $L$ .

В момент  $t_2$  снова замыкается ключ  $K$ , и энергия к тяговому двигателю поступает от источника энергии.

Напряжение на двигателе определяется как среднее за период  $T$

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T U_{ab} dt \quad (3.42)$$

где  $U_{ab}$  – напряжение между точками  $a$  и  $b$ .

При замкнутом ключе  $K$  напряжение  $U_{ab}=U_1$ , тогда можно записать

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} U_1 dt = \frac{t_1}{T} U_1$$

Отношение времени проводящего состояния ключа  $t_1$  к периоду называют коэффициентом заполнения импульсов

$$\lambda = t_1/T \quad (3.43)$$

Следовательно, изменяя значение коэффициента  $\lambda$ , можно менять напряжение  $U_d$  на тяговом двигателе (рис.3.14).

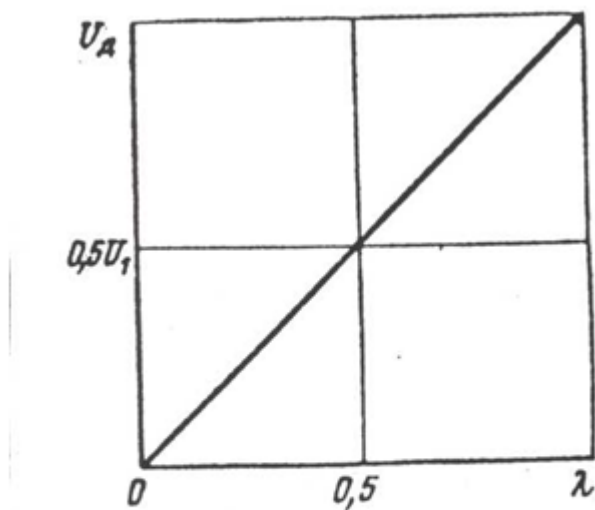


Рис.3.14 Зависимость напряжения на двигателе от коэффициента заполнения импульсов

Возможны следующие варианты импульсного управления:

- а) период  $T$  постоянный, изменяется время  $t_1$  проводящего состояния ключа. Такое управление называется *широотно-импульсным*;
- б) время проводящего состояния ключа остается постоянным, изменяется период  $T$ . Такое управление называется *частотно-импульсным*;
- в) изменяются время  $t_1$  проводящего состояния ключа и период  $T$ . Такое управление называется *смешанным*.

Для обеспечения работоспособности схем импульсного управления необходимо, чтобы:

- источник питания был безиндуктивным;
- ключ работал с большой частотой (при низкой частоте необходима большая индуктивность  $L$ , т.е. реактор будет громоздким, что нежелательно);
- ключ обладал способностью коммутировать большие токи.

Для соблюдения первого условия необходимо источник питания, т.е. контактную сеть, обладающую относительно большой индуктивностью, шунтировать конденсатором с большой емкостью. Это достигается установкой на входе импульсного преобразователя фильтра, состоящего из реактора и конденсатора.

В качестве ключа  $K$  применяют электронный ключ. Наибольшее распространение получили тиристорные ключи, которые накладывают на импульсное управление ряд особенностей. Тиристор – прибор, обладающей односторонней управляемостью. Можно управлять моментом открытия прибора.

### 3.6.2. Широтно-импульсный ключ.

Рассмотрим принцип работы широтно-импульсного ключа (рис.3.15). Ключ состоит из главного тиристора  $V1$  (рис.3.15, а), вспомогательного тиристора  $V2$ , коммутирующего конденсатора  $C_k$  и перезарядной цепи, состоящей из катушки индуктивности  $L_k$  и диода  $V_o$ .

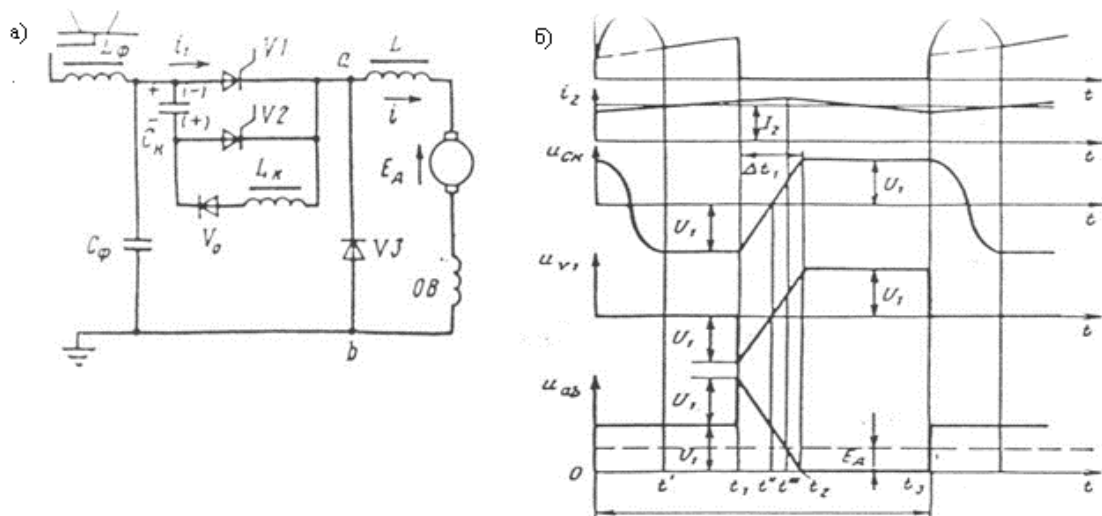


Рис.3.15 Принцип работы I широтно-импульсного тиристорного ключа:  
а — принципиальная схема; б — диаграмма напряжений

Пренебрегаем активными потерями в элементах ключа и принимаем, что в момент времени  $t=0$  конденсатор  $C_k$  заряжен до напряжения тяговой сети  $U_1$  с полярность, указанной на рис.3.15, а. На рис.3.15, б приведены диаграммы, поясняющие работу этого ключа.

В период времени  $0-t_1$  открыт главный тиристор  $V1$  при этом через него протекает ток и происходит накопление энергии в индуктивности  $L$ . Одновременно через открытый главный тиристор  $V1$  и перезарядную цепь происходит колебательный разряд конденсатора  $C_k$ , который перезаряжается до напряжения  $U_1$  с

полярностью, указанной в скобках (инт.  $0-t_1$ ), и это напряжение остается на конденсаторе до открытия тиристора V2. В момент  $t_2$  открывается вспомогательный тиристор V2. К тиристор V1 прикладывается отрицательное напряжение конденсатора  $C_k$ , при этом прекращается протекание тока через тиристор V1, и таким образом создаются условия для восстановления его управляющих свойств. Одновременно через V2, индуктивность L происходит перезаряд конденсатора  $C_k$  током тягового двигателя  $i_2$ . В момент  $t''$  напряжение на коммутирующем конденсаторе изменяет знак, и к тиристор V1 прикладывается положительное напряжение. Следовательно, в течение времени  $t''-t_1=\Delta t/2$  к тиристор V1 приложено отрицательное напряжение. К моменту  $t_2$  конденсатор  $C_k$  заряжается до напряжения тяговой сети  $U_1$ , открывается диод V3, и через него начинает протекать ток двигателя. Тиристор V2 закрывается, и создаются условия для восстановления его управляющих свойств.

В момент  $t_3$  снова открывается главный тиристор V1, и процесс повторяется. Учитывая, что индуктивность цепи достаточна велика, можно принять, что  $i_2=\text{const}$  и  $i_2=I_2$ . Напряжение на двигателе

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T U_{ab} dt = \frac{t_1 + \Delta t}{T} U_1 \quad (3.44)$$

Следовательно, коэффициент заполнения в этом случае

$$\lambda = (t_1 + \Delta t) / T \quad (3.45)$$

где

$$\Delta t = 2U_1 C_k / I_2 \quad (3.46)$$

Из выражений (3.44) и (3.46) следует, что напряжение на двигателе

$$U_d = \frac{t_1}{T} U_1 + \frac{2U_1^2 C_k}{T I_2} \quad (3.47)$$

Таким образом, напряжение на двигателе будет зависеть не только от работы системы управления тиристорами, но и от тока двигателя.

Возможны два способа включения преобразователей на подвижном составе. Первый способ – преобразователь включается только на период пуска и торможения тяговых двигателей. По окончании пуска он шунтируется контактором. Тяговые двигатели должны обеспечить работу при напряжении тяговой сети. В этом случае преобразователь рассчитывается на кратковременный режим работы. Такое включение нашло применение на городском электрическом транспорте. Второй способ – преобразователь включается на все время работы тяговых двигателей. В этом случае номинальное напряжение на тяговых двигателях может быть ниже, чем напряжение тяговой сети. Естественно, что преобразователь здесь должен быть рассчитан на продолжительный режим работы. Поэтому он обладает большей массой и габаритами, чем преобразователь для первого способа включения.



Для широтно-импульсного преобразователя вследствие жесткости его выходных характеристик приходится принимать специальные меры для улучшения распределения нагрузки между ключами. Одной из таких мер является работа каждого ключа на свой двигатель (рис.3.16).

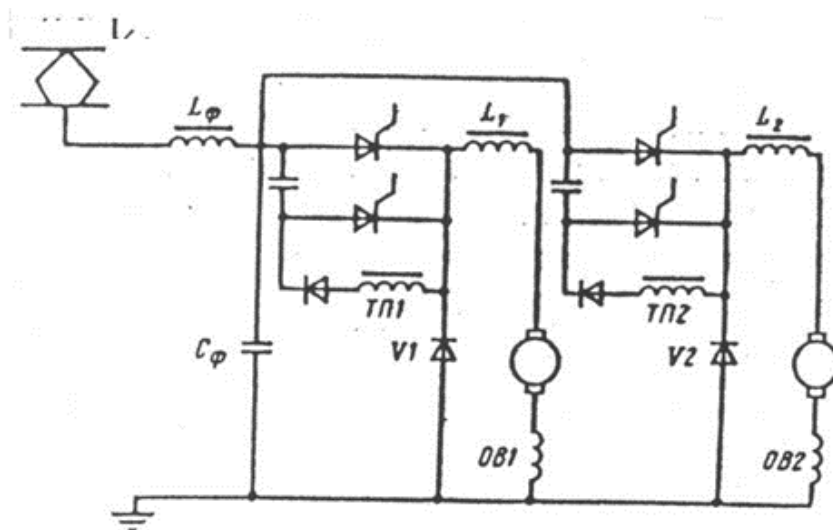


Рис.3.16 Схема э. п. с. с широтно-импульсными тиристорными ключами ТН1 и ТН2

Тиристорные преобразователи потребляют ток от источников в виде импульсов, поэтому требуется установка на входе преобразователя мощных фильтров, обладающих большой емкостью  $C_\phi$  и индуктивностью  $L_\phi$ .

Тиристорный преобразователь имеет практически бесконечно большое число внешних характеристик в режиме тяги. Следовательно, ПС может иметь такое же число тяговых характеристик. Реальное их число будет определяться системой управления э.п.с. в общем случае на эти характеристики наложены ограничения:

- по сцеплению,
- максимальной мощности преобразователя,
- наибольшему допустимому ослаблению возбуждения тягового двигателя при номинальном напряжении на его зажимах (рис.3.17).

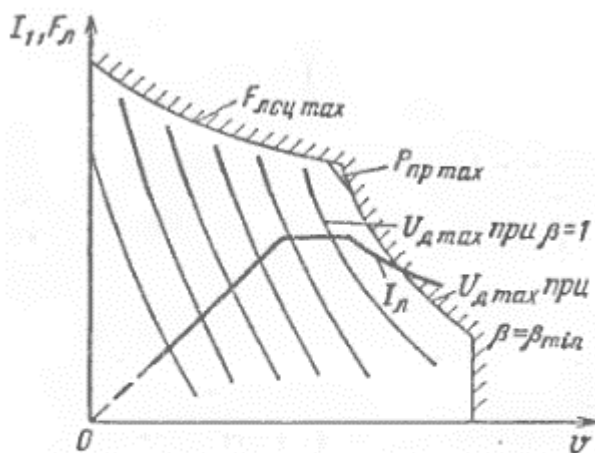


Рис. 3.17 Тяговые характеристики э. п. с. при применении импульсного регулятора при  $U_1 = \text{const}$

Характеристики регулирования, т.е. изменение величины  $t_1/T$  в функции тока того или иного параметра, определяют путем расчета их по отдельным точкам тяговых характеристик. По данной точке тяговой характеристики, используя электромеханические характеристики двигателя, находят значение тока двигателя. Напряжение на двигателе определяется в соответствии с выражением

$$U_d = C\Phi v + Ir \quad (3.48)$$

где  $v$  - скорость движения э.п.с.

## Раздел 4. ТОРМОЖЕНИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА.

### Тема 4.1. Системы торможения.

Торможение применяется для остановки подвижного состава и ограничения его скорости на спусках, перед кривыми участками и соответствующими путевыми знаками. По характеру использования тормозной силы различают служебное торможение и экстренное. Служебное торможение применяется в нормальных условиях работы, экстренное – для предупреждения несчастных случаев и аварий.

Процесс торможения определяется тормозными характеристиками, т.е. зависимостями тормозной силы подвижного состава от его скорости  $V(v)$ . Для проведения тяговых расчетов удобнее пользоваться характеристиками удельной тормозной силы  $b(v)$ , где  $b = B/(mg)$ , Н/кН.

При торможении на ПС действует тормозная сила  $B$ , сила основного сопротивления движению  $W_0$  и сила от уклона  $mg_i$ . Поэтому действующая замедляющая сила  $B_d$  будет равна сумме этих сил

$$B_d = B + W \pm mgi \quad (4.1)$$

или в удельных величинах

$$b_d = b + w \pm mgi \quad (4.2)$$

знак “+” относится к подъемам, а знак “-“ – к спускам.

На рис.4.1 изображены зависимости удельных действующих тормозных сил:  $b(v)$ ,  $w(v)$  и  $b+w_0=f(v)$ , чтобы получить замедляющую силу, нужно относительно зависимости  $b+w_0=f(v)$  сдвинуть ось абсцисс на величину  $i$  вниз при подъеме и вверх при спуске, как это показано на рис. 4.1.

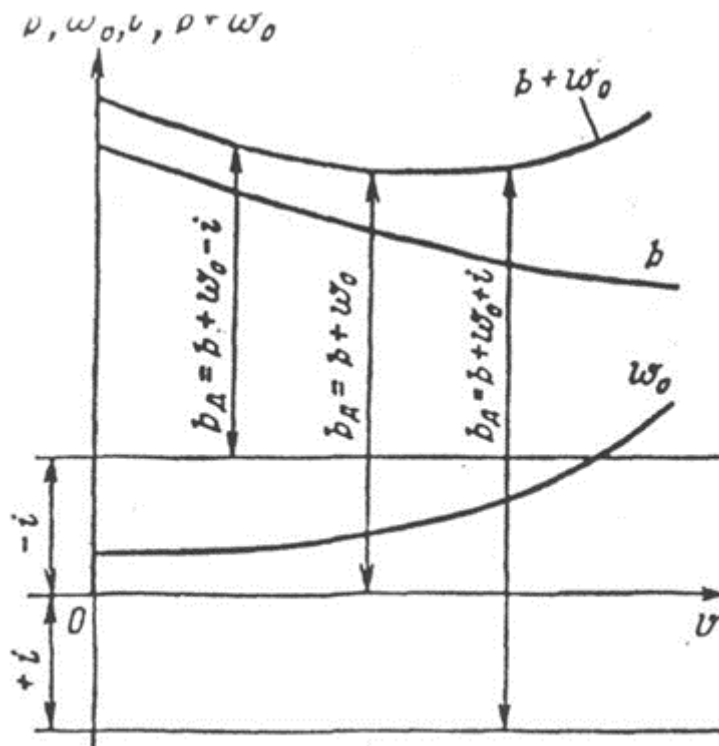


Рис.4.1

По способу создания тормозной силы различают системы *механического* и *электрического* торможения. При механическом торможении тормозная сила создается в результате сил трения между соприкасающимися взаимно скользящими поверхностями.

При электрическом торможении тяговые двигатели переводятся в генераторный режим. Момент, который требуется для вращения генератора, реализуется на ободу движущего колеса в виде тормозной силы. Различают электрическое *рекуперативное* и *реостатное* торможения.

Как при механическом, так и при реостатном торможении кинетическая или потенциальная энергия ПС преобразуется в тепловую энергию. При механическом торможении тепловая энергия выделяется непосредственно в месте трущихся поверхностей, что приводит к их чрезмерному нагреву и возникает задача охлаждения этих поверхностей. При реостатном торможении кинетическая или потенциальная энергия превращается сначала в электрическую и далее в тормозных реостатах - в тепловую, т.е. тепловая энергия выделяется в специальных предназначенных для этого аппаратах.

#### Тема 4.2. Рекуперативное торможение.

При рекуперативном торможении тяговые двигатели работают в генераторном режиме, при этом вырабатываемая ими энергия отдается обратно в тяговую сеть. Эта энергия может быть использована поездами, находящимися на линии, или

возвращена в первичную сеть. Рекуперативное торможение применяется как для торможения на спусках, так и для остановки подвижного состава, хотя последнее связано с определенными техническими трудностями.

Для осуществления рекуперативного торможения необходимо, чтобы сумма ЭДС тяговых двигателей в генераторном режиме при последовательном их соединении была выше напряжения контактной сети, т.е.

$$C\Phi_r v = U_{кc} + I_p r \quad (4.3)$$

Ток и скорость подвижного состава при рекуперации соответственно

$$I_p = (C\Phi_r v - U_{кc}) / r \quad (4.4)$$

$$v = (U_{кc} + I_p r) / C\Phi_r \quad (4.5)$$

где  $I_p$  - ток рекуперации,

$v$  - скорость подвижного состава,

$U_{кc}$  - напряжение контактной сети,

$C\Phi_r$  - магнитный поток.

Характеристики рекуперативного торможения могут быть построены, если известна зависимость магнитного потока от тока рекуперации. Указанная зависимость для каждой системы возбуждения двигателей постоянного тока имеет свой характер.

Рассмотрим характеристики рекуперативного торможения для тяговых двигателей различных систем возбуждения.

*Торможение при двигателях последовательного возбуждения.*

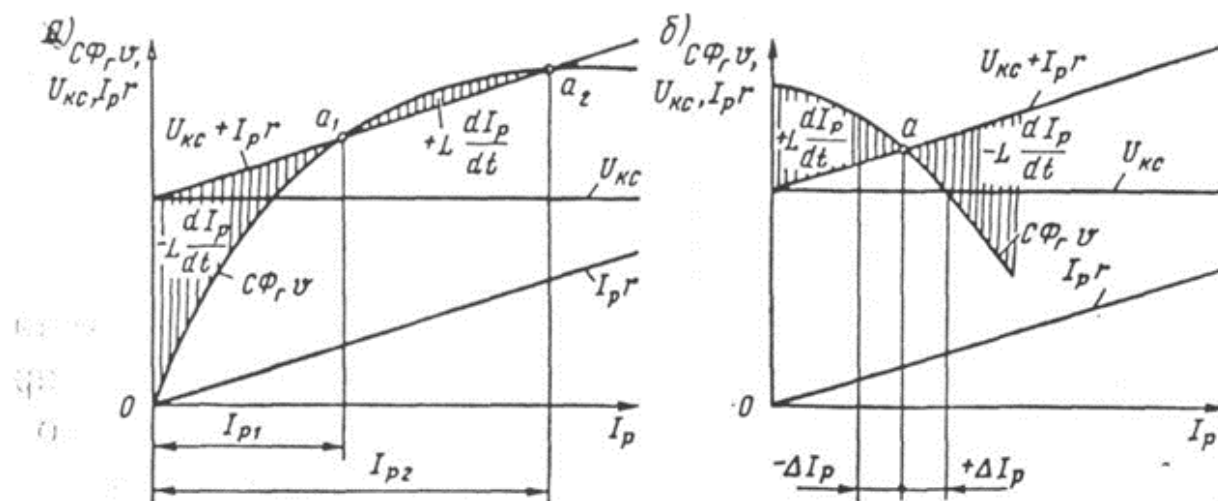


Рис.4.2.

На рис.4.2 представлены зависимости  $C\Phi_r v = f(I_p)$  при постоянной скорости  $v = \text{const}$  и суммы  $(U_{кc} + I_p r) = f(I_p)$  двигателя последовательного возбуждения. Переходной процесс при рекуперативном торможении описывается уравнением

$$C\Phi_r v = U_{кc} + I_p r + L \frac{dI_p}{dt} \quad (4.6)$$

отсюда

$$L \frac{dI_p}{dt} = C\Phi_r v - (U_{кc} + I_p r) \quad (4.7)$$

где  $L$  – индуктивность цепи рекуперативного торможения.

В режиме рекуперации, действующей будет ЭДС рекуперирующего тягового двигателя  $C\Phi_r v$ , а противодействующей – сумма напряжения контактной сети и падения напряжения в двигателе  $U_{кc} + I_p r$ .

Следовательно, условие электрической устойчивости можно представить в виде

$$\frac{dC\Phi_r v}{dI_p} < \frac{d(U_{кc} + I_p r)}{dI_p}$$

или

$$\frac{d(C\Phi_r v - I_p r)}{dI_p} < \frac{dU_{кc}}{dI_p}.$$

На рис.4.2, а, где представлены зависимости для двигателя последовательного возбуждения, точка  $a_1$  соответствует электрическому равновесию, но оно неустойчиво. Если произойдет случайное уменьшение тока  $I_{p1}$ , ЭДС станет меньше суммы  $U_{кc} + I_p r$ , а  $L(dI_p/dt) < 0$ , что приведет к еще большему уменьшению тока  $I_p$ . Этот процесс приведет к перемагничиванию тягового двигателя. Если произойдет случайное увеличение тока  $I_{p1}$ , ЭДС станет больше суммы  $U_{кc} + I_p r$ , и ток будет расти до тех пор, пока не станет равным  $I_{p2}$ , т.е. система достигнет точки  $a_2$  электрического равновесия. Равновесие будет устойчивым, но ток рекуперации  $I_{p2}$  может превышать допустимый по коммутации ток двигателя.

Чтобы система была электрически устойчивой, необходимо, чтобы внешняя характеристика рекуперирующей машины была падающей. Поэтому генератор последовательного возбуждения, у которого ЭДС растет с увеличением тока намного быстрее, чем падение напряжения, является электрически неустойчивым. По этой же причине электрически неустойчива в генераторном режиме машина согласно-смешанного возбуждения.

*Торможение при двигателях встречно-смешанного возбуждения.*

В режиме рекуперативного торможения данный двигатель может работать устойчиво, т.к. обладает падающей внешней характеристикой. Точка (рис.4.2, б) пересечения зависимостей  $C\Phi_r v(I_p)$  и  $U_{кc} + I_p r = f(I_p)$  соответствует электрическому равновесию. Это равновесие будет устойчиво, т.к. при увеличении тока на значение  $+\Delta I_p$  ЭДС машины становится меньше величины  $U_{кc} + I_p r$  и  $L(dI_p/dt) > 0$ . Это приведет к уменьшению тока, т.е. система возвращается в точку  $a$  электрического равновесия. При любом уменьшении тока на значение  $-\Delta I_p$  величина  $L(dI_p/dt) > 0$ , ток начинает возрастать, система стремится к точке  $a$  электрического равновесия.

*Торможение при двигателях независимого возбуждения.* При независимом возбуждении МДС не зависит от тока рекуперации. Тормозные характеристики являются жесткими, т.к. скорость почти не изменяется с изменением нагрузки. При некоторой наименьшей скорости  $v_{min}$  и наибольшей МДС рекуперативное торможение прекращается, т.к. ЭДС становится недостаточной для того, чтобы уравновесить напряжение сети.

Жесткость характеристик приводит к плохому распределению нагрузок между параллельно работающими двигателями их повышенной чувствительности к колебаниям напряжения сети. Поэтому применяют схемы, позволяющие получать более мягкие характеристики. Одной из таких схем является схема со стабилизирующим резистором (рис.4.3).

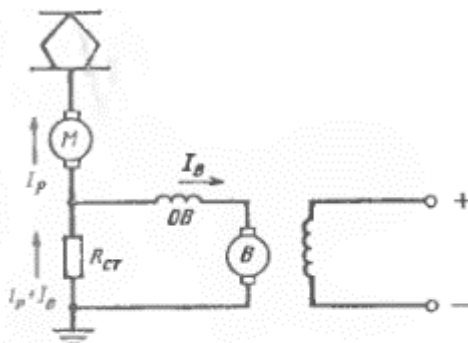


Рис. 4.3 Схема рекуперативного торможения двигателя независимого возбуждения со стабилизирующим резистором

В этой схеме возбуждатель В включен последовательно с обмоткой возбуждения ОВ двигателя М и стабилизирующим резистором. При увеличении тока в режиме рекуперации будет увеличиваться падение напряжения на стабилизирующем резисторе и соответственно уменьшаться напряжение на ОВ. Этим достигается уменьшение тока возбуждения и соответственно магнитного потока при увеличении тока  $I_p$ .

Таким образом, получаем мягкие характеристики, необходимые для осуществления режима рекуперативного торможения. При этом могут быть использованы двигатели последовательного возбуждения и статические возбуждители.

Для схемы рис.4.3 в режиме рекуперации справедливо выражение

$$E_b = I_b(r_b + r_o) + (I_b + I_p) R_{ст} \quad (4.10)$$

откуда

$$I_b = \frac{E_b - I_p R_{ст}}{R_{ст} + r_b + r_o} \quad (4.11)$$

где  $E_b$  – ЭДС возбуждателя,

$I_b, I_p$  – соответственно ток возбуждения и рекуперации,

$r_b$  – сопротивление обмотки возбуждения тягового двигателя,

$r_o$  – внутреннее сопротивление возбуждателя.

Из выражения (4.11) видно, что схема рис.4.3 имеет такие же рекуперативные характеристики, что и генератор встречно-смешанного возбуждения. Ток возбуждения  $I_b$  можно представить в виде разности двух токов

$$I_B = \frac{E_B}{R_{ст} + r_B + r_0} - I_P \frac{R_{ст}}{R_{ст} + r_B + r_0} = A - I_P B. \quad (4.12)$$

Первый член выражения (4.12) не зависит от тока нагрузки и эквивалентен МДС независимой обмотки возбуждения, второй эквивалентен МДС последовательной обмотки возбуждения. Регулируя ЭДС возбуждателя  $E_B$ , можно изменять характеристики системы торможения (рис.4.4).

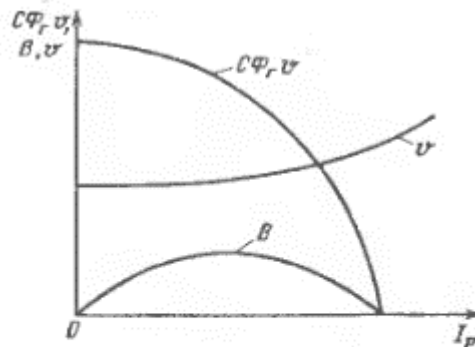


Рис. 4.4 Характеристики рекуперативного торможения двигателя независимого возбуждения со стабилизирующим резистором

Жесткость этих характеристик зависит от сопротивления стабилизирующего резистора. Чем выше значение  $R_{ст}$ , тем мягче характеристики при данных значениях сопротивлений  $r_0$  и  $r_B$ , тем лучше будет распределение нагрузок и меньшая чувствительность к колебаниям напряжения в контактной сети. Однако при увеличении  $R_{ст}$  увеличиваются потери в нем, растут напряжения и мощность возбуждателя. Поэтому значение сопротивления стабилизирующего резистора необходимо выбирать из условия получения необходимого наклона тормозных характеристик.

#### Тема 4.3. Реостатное торможение.

При реостатном торможении тяговые двигатели отключаются от контактной сети и замыкаются на тормозные реостаты. При этом механическая энергия движущегося подвижного состава сначала превращается в электрическую, а затем выделяется в виде тепла в тормозных реостатах.

##### 4.3.1. Торможение при двигателях последовательного возбуждения.

Двигатели последовательного возбуждения при реостатном торможении могут работать как генераторы с последовательным самовозбуждением или с независимым.

Рассмотрим процесс самовозбуждения двигателя последовательного возбуждения (рис.4.5).

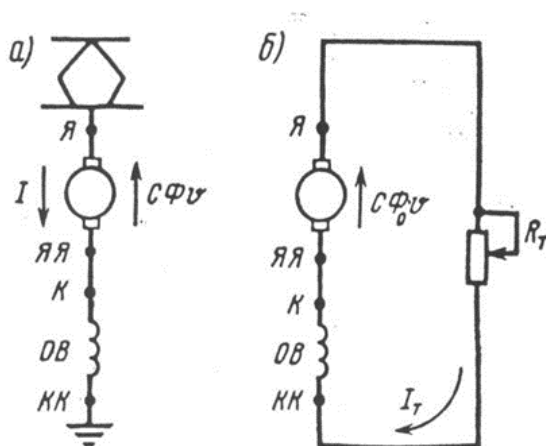


Рис.4.5

В режиме тяги (рис. 4.5,а) ток  $I$ , протекающий через якорь двигателя и обмотку возбуждения, создает магнитный поток  $C\Phi$ , под действием которого возникает ЭДС  $C\Phi v$ . Чтобы перейти в генераторный режим, отключим двигатель от контактной сети и замкнем его на тормозной резистор сопротивлением  $R_t$  (рис.4.5,б). В этом случае под действием остаточного потока  $C\Phi_0$ , который совпадает по направлению с потоком, создавшимся при двигательном режиме, возникает ЭДС  $C\Phi_0 v$ . Под действием этой ЭДС в цепи начнет протекать ток  $I_t$ , который вызовет появление магнитного потока, направленного навстречу остаточному магнитному потоку. При этом будет уменьшаться  $C\Phi_0 v$  и ток  $I_t$ , поэтому самовозбуждения двигателя не произойдет.

Таким образом, для самовозбуждения необходимо, чтобы остаточный магнитный поток совпадал с направлением основного потока. Для этого переключают либо концы обмотки возбуждения (рис.4.6, а), либо концы обмотки якоря (рис.4.6, б).

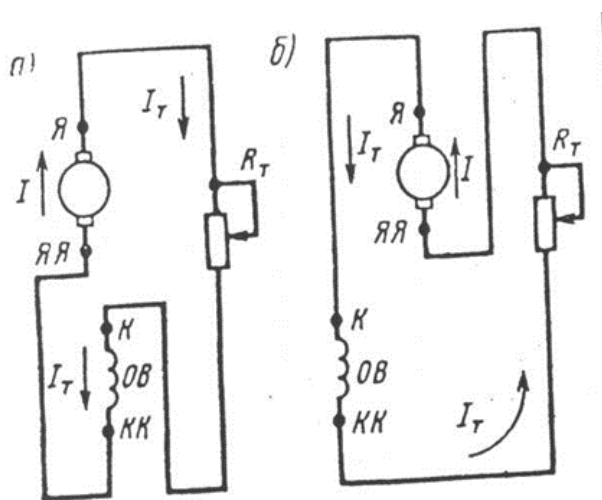


Рис.4.6

Под действием остаточного магнитного потока возникает ЭДС  $C\Phi_0 v$ , которая вызывает протекание в цепи тока  $I_t$ . Под действием тока  $I_t$  появляется магнитный



поток, который совпадает с направлением остаточного магнитного потока и усиливает его. Происходит самовозбуждение.

Рассмотрим процессы, происходящие в двигателе после переключения его в режим реостатного торможения. Пренебрегая влиянием вихревых токов, данный процесс можно охарактеризовать следующим уравнением

$$C\Phi v = I_m(r + R_m) + L \frac{dI_m}{dt} \quad (4.13)$$

откуда

$$L \frac{dI_m}{dt} = C\Phi v - I_m(r + R_m) \quad (4.14)$$

где  $L$ - индуктивность цепи реостатного торможения.

Составляющие уравнения (4.14) представлены графически в функции тока на рис.4.7 при скорости  $v=\text{const}$ :

- зависимость ЭДС  $C\Phi v(I_T)$  – кривой 1 с учетом начальной ЭДС  $E_o=C\Phi_o v$ ,
- сумма падений напряжений в двигателе и тормозном реостате  $I_T(r+R_T)$  – прямой 2, проходящей через начало координат,
- величина  $L(dI_T/dt)$  – заштрихованной разностью ординат кривой 1 и прямой 2.

Из графического решения уравнения (4.14) видно, что самовозбуждение генератора последовательного возбуждения возможно лишь при наличии в момент включения остаточной ЭДС  $C\Phi_o v$ . Благодаря наличию остаточной ЭДС величина  $L(dI_T/dt)$  в момент включения положительна, и ток начинает возрастать. По мере увеличения тока эта величина вначале возрастает, затем уменьшается, и при токе, равном  $I_{Ty}$ , в точке  $a$  пересечения кривой 1 и прямой 2 становится равной нулю. В этой точке возникает электрическое равновесие, т.е. ЭДС двигателя уравновешивается суммой падений напряжений во внутренней и внешней цепи двигателя

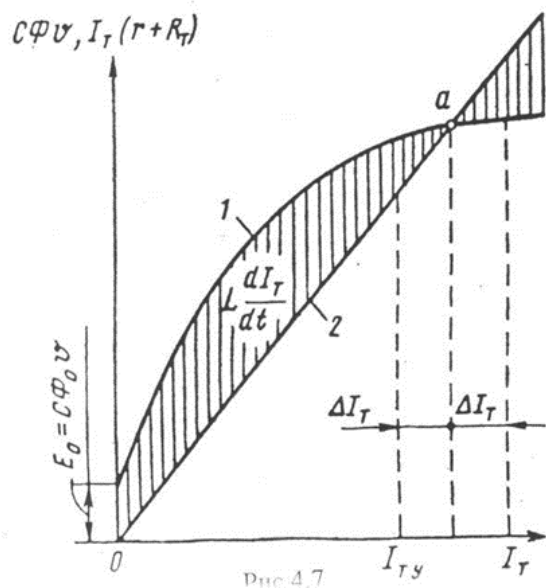
$$C\Phi v = I_T(r + R_T) \quad (4.15)$$

Установившееся значение тормозного тока

$$I_T = C\Phi v / (r + R_T) \quad (4.16)$$

#### 4.2.2. Электрическая устойчивость. Зависимости процессов самовозбуждения.

Рассмотрим, является ли реостатное торможение генератора последовательного возбуждения электрически устойчивым.



Из рис.4.7 видно, что при случайном увеличении тока на  $\Delta I_T$  ЭДС СФв становится меньше суммы падений напряжений  $I_T(r+R_T)$ . Величина  $L(dI_T/dt)$  станет отрицательной, и ток уменьшится, т.е. система будет стремиться возвратиться в точку  $a$ . Электрическое равновесие в точке  $a$  является устойчивым.

Устойчивость равновесия в точке  $a$  может быть установлена и из общего условия электрического равновесия: производная по току действующей ЭДС должна быть меньше производной по току противодействующей ЭДС. Действующей в данном случае будет ЭДС СФв, а противодействующей – падение напряжения. Как следует из рисунка 4.7, выполняется неравенство, т.е. соблюдается условие электрического равновесия.

При самовозбуждении разность ординат характеризует скорость нарастания тока. Чем быстрее протекает процесс самовозбуждения, тем раньше начинается процесс торможения. В обычных условиях тормозной ток достигает своего установившегося значения за 0.5-2с. Для ускорения процесса самовозбуждения остаточный магнитный поток может быть увеличен путем дополнительного подмагничивания. Ускорение процесса торможения может быть достигнуто за счет предварительного введения двигателя еще при движении в режиме выбега в режим торможения с малым тормозным током, т.е. небольшой тормозной силой. Такая система носит название *следящего выбега*.

Зависимость процесса самовозбуждения от сопротивления тормозного реостата. Представим графически решение уравнения электрического равновесия ЭДС СФв( $I_T$ ) и падений напряжения  $I_T(r+R_T)$  для различных значений сопротивлений  $R_{T1}$ ,  $R_{T2}$  тормозного реостата, причем  $R_{T2} > R_{T1}$  (рис.4.8). Точки пересечения ЭДС СФв с прямыми

$I_T(r+R_T)$  определяют значения тормозных токов при различных сопротивлениях. С увеличением сопротивления при одинаковой скорости  $v$  снижается и, следовательно, тормозная сила.

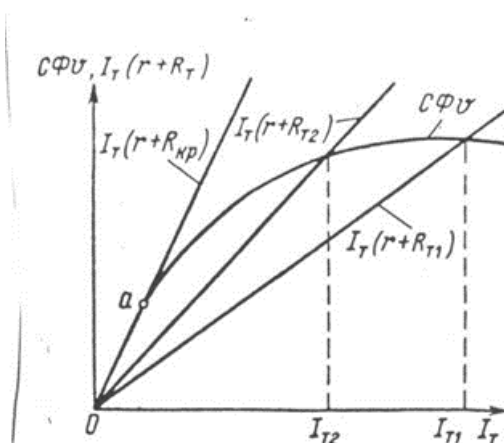


Рис.4.8

Поэтому регулирование тормозной силы в двигателе последовательного возбуждения можно осуществить изменением сопротивления  $R_T$ .

Тангенсы углов наклона прямых  $I_T(r+R_T) = f(I_T)$  пропорциональны сопротивлениям тормозного реостата. С увеличением сопротивления  $R_T$  увеличивается наклон прямой  $I_T(r+R_T)$  к оси абсцисс и при некотором сопротивлении  $R_{кр}$  прямая  $I_T(r+R_{кр})$  пересекает кривую  $C\Phi v$  в начальной ее части (точка  $a$ ), где самовозбуждение машины становится практически невозможным. *Предельное сопротивление, при котором невозможно самовозбуждение машины при данной скорости  $v$ , называется критическим.*

Зависимость процесса самовозбуждения от скорости. На рис.4.9 представлено графическое решение уравнения электрического равновесия (4.15) при различных скоростях  $v_1$ ,  $v_2$  и т.д. и одном и том же значении сопротивления  $r_T$  тормозного реостата, причем  $v_1 > v_2$ .

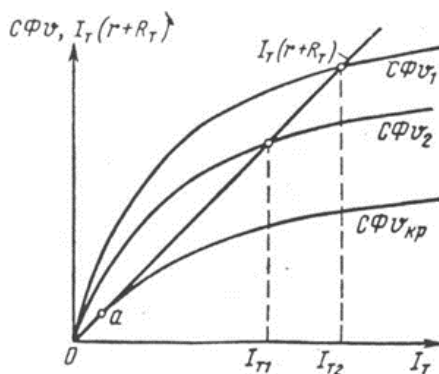


Рис.4.9

Из рис.4.9 при  $R_T = \text{const}$  с увеличением скорости возрастают ЭДС  $C\Phi v$  и токи  $I_T$ , а следовательно, и тормозные силы.

При уменьшении скорости и неизменном сопротивлении уменьшается тормозной ток  $I_T$ , и при некоторой достаточно низкой скорости прямая  $I_T(r+R_T)$  пересекает кривую  $C\Phi_{кр}$  в начальной ее части (точка  $a$ ), при которой самовозбуждение машины становится невозможным. Скорость, при которой самовозбуждение машины невозможно, называется критической  $v_{кр}$ . Каждой ступени сопротивления тормозного реостата соответствует определенное значение критической скорости. Чем больше сопротивление тормозного реостата, тем выше критическая скорость.

#### 4.3.3. Расчет характеристик реостатного торможения, ограничения тормозных характеристик.

Из уравнения электрического равновесия (4.15) можно получить выражение для определения скоростной характеристики

$$v = I_T(r+R_T)/C\Phi \quad (4.18)$$

характеристики установившегося режима реостатного торможения можно рассчитать при заданном сопротивлении тормозного реостата, если известна зависимость  $C\Phi(I)$ . Если зависимость не задана, характеристики реостатного торможения двигателя последовательного возбуждения могут быть построены по скоростной характеристике двигателя  $v(I)$  тягового режима, учитывая что  $C\Phi = (U_d - I_T r)/v$ , где  $v$  - скорость двигателя при напряжении  $U_d$  и токе  $I$ .

Тормозная сила определяется по следующему выражению

$$B = 0.367 C\Phi I_T + \Delta B \quad (4.19)$$

где  $\Delta B$  - сила, вызываемая магнитными и механическими потерями в двигателе при торможении.

Если отсутствуют данные о магнитных и механических потерях, величина  $\Delta B$  может быть принята равной  $\Delta F$  и найдена по характеристикам электромагнитной силы тяги  $F_{эм}(I)$  и силы тяги  $F(I)$ . При данном тормозном токе  $I_T$

$$\Delta B = \Delta F = F_{эм} - F \quad (4.20)$$

По кривым  $v(I_T)$  (рис.4.10) и  $B(I_T)$  (рис.4.11) строят тормозные характеристики реостатного торможения  $B(v)$  (рис.4.12) для различных значений сопротивлений тормозного реостата, причем  $R_{T1} < R_{T2} < R_{T3}$ .

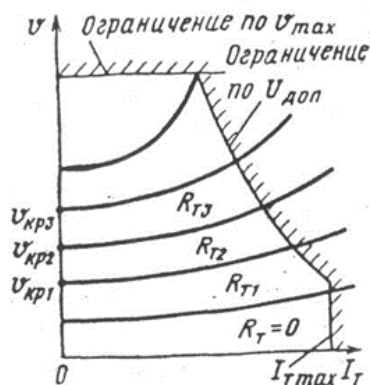


Рис.4.10

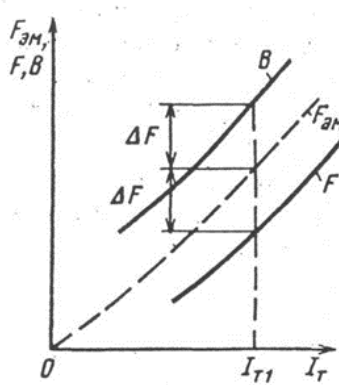


Рис.4.11

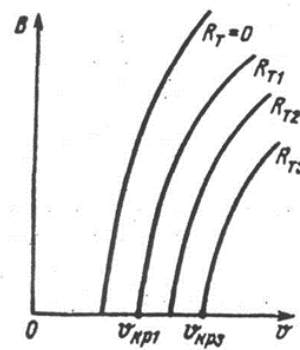


Рис.4.12

Выражения (4.15), (4.16) справедливы для схемы реостатного торможения с одним двигателем. Если общее число двигателей  $z_d$ , и они соединены в  $z_{п}$  параллельных цепей в  $z_c$  последовательно включенных двигателей в каждой цепи, то

ЭДС и падения напряжения в двигателях увеличатся в  $z_c$  раз, а ток в тормозном реостате – в  $z_n$  раз. Поэтому уравнение электрического равновесия примет вид

$$z_c C\Phi v = I_T(r z_c) + I_T(R_T z_n) \quad (4.21)$$

или

$$C\Phi v = I_T(r + R_T z_n / z_c) \quad (4.22)$$

где  $R_T z_n / z_c = R$  – сопротивление тормозного реостата, приведенное к одному двигателю.

Скоростная характеристика будет иметь вид

$$v = \frac{I_T(r + R_T z_n / z_c)}{C\Phi} \quad (4.23)$$

Тормозная сила в этом случае увеличится в  $z_d = z_n z_c$  раз и будет

$$B = z_d(0.367 C\Phi I_T + \Delta F) \quad (4.24)$$

Ограничение тормозных характеристик. Рассмотрим скоростные характеристики реостатного торможения для различных ступеней тормозного реостата (рис.4.10). Они имеют ограничения:

- 1) по наибольшему тормозному току  $I_{Tmax}$ ,
- 2) по наибольшей скорости  $v_{max}$ ,
- 3) по наибольшему допустимому напряжению на коллекторе тягового двигателя  $U_{доп}$ .

Ограничение по наибольшему тормозному току определяется либо условиями коммутации двигателя, либо сцеплением колеса и рельса:

$$I_{Tmax} \leq 2I_{ч} \quad (4.25)$$

$$B_{max} \leq 1000 m_t g \varphi \quad (4.26)$$

Допустимой по сцеплению тормозной силе соответствует допустимый по сцеплению ток

$$I_{Tmax} \leq I_{тсц} \quad (4.27)$$

Меньшее из этих ограничений и принимается за  $I_{Tmax}$ . Ограничение по наибольшей скорости  $v_{max}$  определяется конструкционной скоростью ПС.

Ограничение по наибольшему допустимому ограничению вызвано тем, что при реостатном торможении двигатель должен развивать наибольшую тормозную силу при скорости большей, чем скорость выхода на автоматическую характеристику при пуске. Так, при равенстве тормозного и пускового тока ЭДС при торможении будет равна  $C\Phi_{п} v_{max}$ , где  $C\Phi_{п}$  – магнитный поток, соответствующий пусковому току, а  $v_{max}$  – скорость начала торможения. В конце пуска ЭДС будет равна  $C\Phi_{п} v_{п}$ , где  $v_{п}$  – скорость выхода на автоматическую характеристику.

Таким образом, если  $I_T = I_{п}$ , то  $E_T / E_{п} = C\Phi_{п} v_{max} / (C\Phi_{п} v_{п}) = v_{max} / v_{п}$ , т.е. ЭДС при торможении в  $v_{max} / v_{п}$  раз больше, чем ЭДС в конце пуска, равная номинальному напряжению на двигателе.

Для двигателей ГЭТ, рассчитанных на рабочее реостатное торможение,  $U_{max} = 2U_{ном}$ .

Наибольшее сопротивление пускового реостата при одном двигателе определяется из условия

$$R_{пmax} = U_{ном} / I_{пmin} \quad (4.28)$$

Наибольшее сопротивление тормозного реостата необходимо выбирать из условия

$$R_{\text{тmax}} = U_{\text{max}} / I_{\text{пmin}} \quad (4.29)$$

ЭДС при торможении равна  $C\Phi_{\text{T}}v_{\text{max}}$  и соответствует максимальному напряжению на двигателе  $U_{\text{max}}$ , ЭДС во время пуска  $C\Phi_{\text{П}}v_{\text{П}}$  примерно равна номинальному напряжению на двигателе  $U_{\text{ном}}$ .

При равенстве пускового  $I_{\text{пmin}}$  и тормозного  $I_{\text{тmin}}$  токов  $C\Phi_{\text{T}} \approx C\Phi_{\text{П}}$  и  $R_{\text{тmax}} = R_{\text{пmax}}(v_{\text{max}}/v_{\text{П}})$ .

Таким образом, чтобы двигатель развивал при наибольшей скорости тормозную силу, примерно равную пусковой, он должен допускать ЭДС в  $v_{\text{max}}/v_{\text{П}}$  большую, чем ЭДС при номинальном напряжении сети  $U_{\text{ном}}$ . Для двигателей последовательного возбуждения  $v_{\text{max}}/v_{\text{П}} \approx 2$ .

Поэтому для того, чтобы реостатное торможение при высоких скоростях было эффективно, двигатель должен допускать примерно двукратное повышенное напряжения по отношению к номинальному.

Отсюда наибольшее сопротивление тормозного реостата

$$R_{\text{тmax}} \approx 2R_{\text{пmax}} \quad (4.32)$$

*Торможение при двигателях смешанного возбуждения.* При тяговых двигателях смешанного возбуждения наибольшее распространение получила схема реостатного торможения, представленная на рис.4.13.

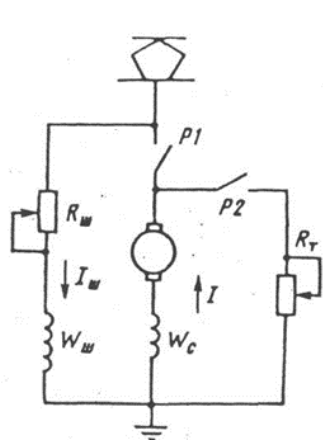


Рис.4.13

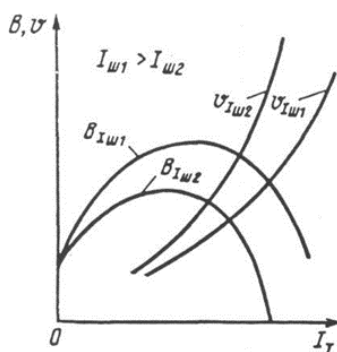


Рис.4.14

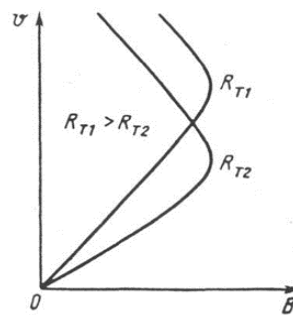


Рис.4.15

В этом случае для перехода в режим реостатного торможения якорь тягового двигателя отключается от сети и замыкается на тормозной реостат, а параллельная обмотка возбуждения получает питание от контактной сети. Тяговый двигатель переходит в режим генератора со встречно-смешанным возбуждением.

На рис.4.14 представлены характеристики  $v(I_T)$  и  $\Phi(I_T)$ , а на рис.4.15 – тормозная характеристика  $\Phi(v)$  двигателя встречно-смешанного возбуждения при реостатном торможении. Как видно из рис.4.15, тормозная характеристика имеет следующие достоинства:

- при торможении в широком диапазоне скоростей тормозное усилие практически постоянно, поэтому не требуется большое число ступеней реостата, а, следовательно, и аппаратов управления,

- обеспечивается устойчивость параллельной работы нескольких двигателей при равномерном распределении нагрузок между ними.

В то же время для увеличения тормозного усилия  $B$  необходимо увеличивать ток в параллельной обмотке  $I_{ш}$ , значение которого ограничено. Поэтому схема реостатного торможения (рис.4.13) не позволяет получить большое значение тормозного усилия  $B$ , т.к. магнитный поток в двигателе создается разностью МДС параллельной и последовательной обмоток двигателя. Благодаря такой системе возбуждения двигателя его ЭДС не превышает в режиме реостатного торможения практически наибольшего напряжения, допустимого в режиме тяги.

Изменение сопротивления  $R_T$  ведет к перемещению максимума тормозной силы: при увеличении сопротивления максимум перемещается в сторону высоких скоростей движения. На практике следует выбирать тормозное сопротивление равным  $R_T \approx (0.8-0.9)R_{п}$ .

#### *Тема 4.4. Рекуперативно-реостатное торможение.*

При рекуперативном торможении с контактными системами управления нельзя тормозить до низких скоростей движения. Это торможение также требует наличия либо потребителей электрической энергии в контактной сети, либо инверторных или поглощающих устройств на тяговых подстанциях. При чисто реостатном торможении вся тормозная энергия превращается в тепло в реостатах, т.е. бесполезно теряется. Реостатное торможение позволяет тормозить практически до полной остановки. Поэтому на практике целесообразно объединение обеих систем в одну: при высоких скоростях использовать рекуперативное торможение, а при низких скоростях и уменьшении эффективности рекуперативного торможения производить переход на реостатное торможение. Замещения рекуперативного торможения реостатным производиться и при исчезновении потребителей энергии в тяговой сети, что увеличивает надежность электрического торможения. Замещение одного вида торможения другим должно происходить без потери тормозной силы. Рассмотрим это на конкретных примерах.

##### *4.4.1. Торможение при двигателях смешанного возбуждения.*

Такое торможение осуществляется по схеме (рис.4.16, а).

При замыкании контактора напряжения Р3 увеличивается ЭДС двигателя и происходит рекуперация. После замыкания контактора Р4 ток возбуждения двигателя достигнет максимума, и при дальнейшем понижении скорости рекуперацию применять невозможно. Поэтому замыкается контактор Р2 и размыкается контактор Р1. Происходит переход на реостатное торможение, причем без потери силы торможения, т.к. двигатель подключен сначала к тяговой сети, затем одновременно к тяговой сети и тормозному реостату и далее к тормозному реостату. Тормозные характеристики этой системы показаны на рис.4.16, б. Для работы такой системы требуется наличие напряжения в тяговой сети, если оно пропадает, исчезает тормозной эффект. Для ликвидации этих недостатков возможна установка двух разделительных диодов в цепи параллельного возбуждения двигателя.

Система рекуперативно-реостатного торможения применяется на троллейбусах и трамвайных вагонах при двигателях смешанного возбуждения.

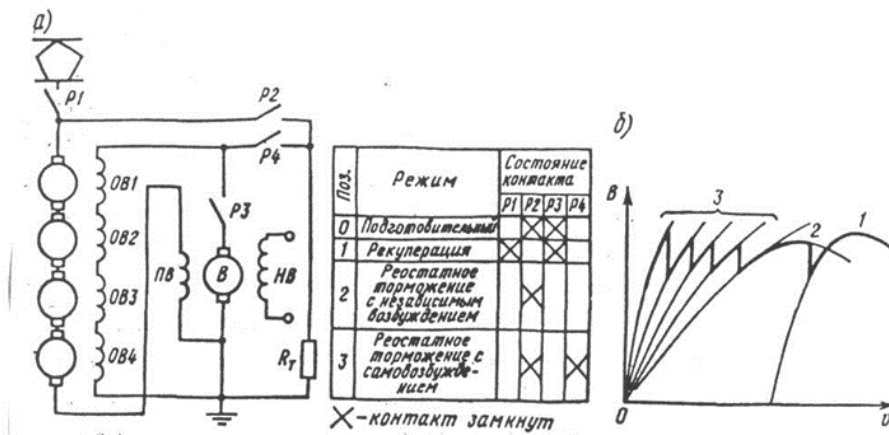


Рис.4.16

#### 4.4.2. Торможение при двигателях последовательного возбуждения.

Для упрощения силовой схемы и уменьшения числа переключений все четыре двигателя моторного вагона соединены последовательно (рис.4.17, а).

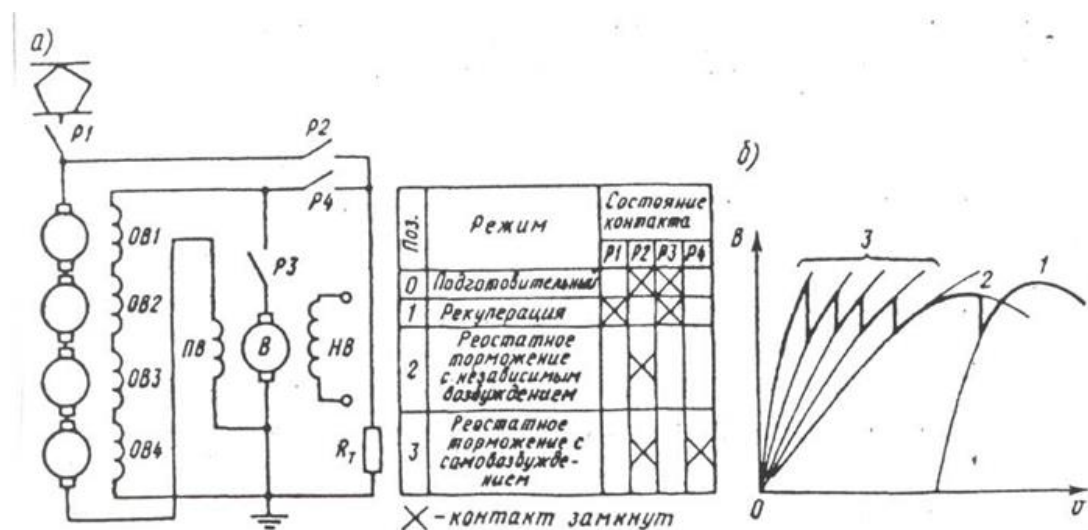


Рис.4.17

Для возможно рекуперации в схеме предусмотрен дифференциальный возбудитель В.

В начале контакторами  $P2$  и  $P3$  включается реостатное торможение. При этом двигатели получают возбуждение от возбудителя, напряжение которого плавно поднимается. Когда напряжение на двигателях становится равным напряжению сети, включается линейный контактор  $P1$ , далее отключается контактор  $P2$  и начинается рекуперативное торможение. Благодаря такому подготовительному реостатному торможению, включение на рекуперацию происходит плавно, без толчков тока в тяговых двигателях. Когда процесс рекуперативного торможения



заканчивается вследствие снижения скорости, снова включается контактор Р2, выключается линейный контактор Р1 и начинается реостатное торможение. Далее тяговые двигатели переводятся с независимого возбуждения на самовозбуждение, для чего возбудитель сначала шунтируется резистором  $R_T$  при включении контактора Р4 и далее отключается при размыкании контактора Р3. Для торможения практически до полной остановки выводится тормозной реостат  $R_T$ . Тормозные характеристики для такой системы торможения представлены на рис.4.17, б.

Чем до более низкой скорости возможно рекуперативное торможение, тем оно более эффективно. Рассматриваемая система позволяет производить рекуперацию до скорости 20-30 км/ч, далее идет реостатное торможение. Более эффективными являются системы с тиристорным импульсным регулированием, которые позволяют производить рекуперацию практически до полной остановки.

**Практический материал**  
Перечень средств обучения по дисциплине  
«Электрическая тяга»

Наименование	Количество
1	2
<b>Технические средства обучения</b>	
Технические устройства	
Ноутбук	1
Мультимедийный проектор	1
Дидактическое обеспечение	
Учебные презентации:	
Методы определения расхода электрической энергии и нагрева тяговых двигателей	2
Применение рекуперативного и реостатного торможения на транспортном средстве	2
Электромеханические характеристики тягового двигателя на ободу колеса	2
Электромеханические характеристики на валу тягового двигателя	2
Образование и ограничение силы тяги	3
Характеристики тяговых электродвигателей постоянного тока, применяемых на транспортном средстве; их достоинства и недостатки	1
Применение электрического торможения с помощью тиристорно-импульсных регуляторов	1
Образование и ограничение тормозной силы	1
Физические процессы образования силы сцепления	1
<b>Электронные средства обучения</b>	
Электронное учебно-методическое пособие	
<b>Печатные средства обучения</b>	
Раздаточный материал в составе:	15
Элементы электрической тяги	
Характеристика тяговых электродвигателей	
Пуск и регулирования скорости подвижного состава	
Торможение подвижного состава	
Методические указания для выполнения практических работ	15
Методические указания для изучения учебной дисциплины учащимися заочной формы обучения	15
<b>Оборудование помещения</b>	
Доска классная	1
Стенд информационный	2
Стол для преподавателя	1
Стол для учащихся	15
Стул	30
Экран проекционный	1

**Самоконтроль знаний**  
по учебной дисциплине «Электрическая тяга»

Вопросы	Уровень	Примечание
1. Дать понятие приведенной массе	I	I, Э
2. Дать понятие коэффициента инерции вращающихся частей	I	I, Э
3. Объясните влияние значения коэффициента инерции вращающихся частей на передаточное отношение редуктора	I	I, Э
4. Объясните, почему у моторного вагона коэффициент инерции вращающихся частей больше, чем у прицепного	I	I, Э
5. Объясните, почему коэффициент инерции вращающихся частей у ПС с пассажирами меньше, чем у подвижного состава без пассажиров	I	I, Э
6. Дать понятие зависимостям кривым движения	I	I, Э
7. Объясните разницу между сцепным, тормозным и полным весом ПС	I	I, Э
8. Объясните, почему в режиме торможения выбирают меньшее значение коэффициента сцепления, нежели в режиме тяги	I	I, Э
9. Объясните, почему необходимо включать пусковой резистор	I	I, Э
10. Перечислите способы уменьшения потерь в пусковых реостатах	I	I, Э
11. Раскройте, каким образом, путем изменения магнитного потока осуществлять пуск тяговых двигателей	I	I, Э
12. Объясните, что определяет коэффициент регулирования $\beta$	I	I, Э
13. Проанализируйте, почему сила тяги при изменении возбуждения не изменяется	I	I, Э
14. Дать понятие коэффициента заполнения импульсов	I	I, Э
15. Раскройте, для чего служит вспомогательный тиристор в схеме широтно-импульсного тиристорного ключа	I	I, Э
16. Объясните, почему для одного и того же тягового двигателя возможны различные электромеханические характеристики на обode колеса	I	I, Э
17. Объясните, какой тип двигателя имеет жесткие тяговые характеристики	I	I, Э
18. Объясните, какой тяговой характеристикой должен обладать двигатель, чтобы ПС не буксовал	I	I, Э

19. Объясните, какими тяговыми характеристиками должны обладать тяговые двигатели, если их установлено на ПС несколько	I	I, Э
20. Проанализируйте, с какой системой возбуждения двигатель обладает неустойчивой механической характеристикой	I	I, Э
21. Поясните, как определяется КПД двигателя	I	I, Э
22. Объясните, двигатель какого возбуждения может автоматически переходить в генераторный режим	I	I, Э
23. Опишите требования, предъявляемые к тяговому двигателю	II	I, Э
24. Приведите схему плавного реостатного пуска двигателя и объясните принцип ее работы	II	I, Э
25. Приведите последовательность расчёта характеристик при изменении сопротивления реостата	II	I, Э
26. Объясните, что такое шунтирование обмотки возбуждения. Приведите основные понятия и соотношения	II	I, Э
27. Объясните, что такое секционирование обмотки возбуждения. Приведите основные понятия и соотношения	II	I, Э
28. Опишите схему регулирования возбуждения с помощью специального возбудителя	II	I, Э
29. Опишите рекуперативное торможение при двигателях независимого возбуждения	II	I, Э
30. Опишите реостатное торможение при двигателях последовательного возбуждения	II	I, Э
31. Опишите электрическую устойчивость при реостатном торможении	II	I, Э
32. Объясните зависимость процесса самовозбуждения от сопротивления тормозного реостата	II	I, Э
33. Объясните зависимость процесса самовозбуждения от скорости	II	I, Э
34. Приведите классификация городского электрического транспорта	II	I, Э
35. Объясните применение уравнения движения подвижного состава	II	I, Э
36. Начертите электромеханические характеристики двигателей последовательного возбуждения. Приведите основные соотношения	II	I, Э
37. Начертите электромеханические характеристики двигателей параллельного возбуждения. Приведите основные соотношения	II	I, Э
38. Начертите электромеханические характеристики двигателей согласованно-смешанного возбуждения. Приведите основные соотношения	II	I, Э

39. Объясните процесс возникновения электрической устойчивости подвижного состава	II	I, Э
40. Объясните, что такое устойчивость коммутации. Приведите основные понятия и соотношения	II	I, Э
41. Проанализируйте, как происходит регулирование скорости тягового двигателя	II	I, Э
42. Начертите зависимости при рекуперативном торможении для двигателей последовательного возбуждения	II	I, Э
43. Выведите уравнение движения подвижного состава	III	I, Э
44. Объясните, что такое коэффициент инерции вращающихся частей, как он определяется	III	I, Э
45. Объясните, как происходит образование и ограничение силы тяги.	III	I, Э
46. Проанализируйте, как происходит образование и ограничения тормозной силы	III	I, Э
47. Объясните физические процессы образования силы сцепления, что такое коэффициент сцепления	III	I, Э
48. Выведите уравнения электромеханических характеристик на валу тягового двигателя	III	I, Э
49. Выведите уравнения электромеханических характеристик на ободу колеса тягового двигателя	III	I, Э
50. Объясните, что такое тяговые характеристики подвижного состава. Приведите основные понятия и соотношения	III	I, Э
51. Опишите требования, предъявляемые к тяговому двигателю (с примерами)	III	I, Э
52. Опишите механическую устойчивость подвижного состава для двигателей различных систем возбуждения	III	I, Э
53. Сравните двигатели различных систем возбуждения, исходя из требований, предъявляемым к тяговым двигателям, по всем показателям	III	I, Э
54. Проанализируйте, какие условия и системы пуска вы знаете. Приведите примеры	III	I, Э
55. Объясните явления, возникающие при ступенчатом пуске. Приведите порядок выбора значения расчетного пускового тока?	III	I, Э
56. Рассмотрите процесс пуска для одного двигателя при постоянном пусковом токе	III	I, Э
57. Начертите схему и характеристики двигателей при изменении напряжения	III	I, Э
58. Объясните принцип импульсного управления	III	I, Э

Вопросы входного контроля по учебной дисциплине  
«Электрическая тяга»

1. Дать определение автоматического выключателя. Объясните его назначение. Приведите их классификацию.
2. Приведите классификацию электрических аппаратов
3. Перечислите виды возбуждения двигателей переменного тока.
4. Дайте понятие: что такое трансформатор. Объясните его назначение
5. Дать определение механической и электромеханической характеристики
6. Перечислите составные части силовых трансформаторов
7. Дать определение электрической машины, опишите ее основные части
8. Дать определение реле. Объясните его назначение. Приведите их классификацию.
9. Приведите классификацию тепловых реле, условия их выбора и назначение.
10. Перечислите условия выбора предохранителей
11. Перечислите виды возбуждения двигателей постоянного тока
12. Опишите характеристики предохранителя, его назначение, достоинства и недостатки.
13. Опишите принцип работы двигателей постоянного тока
14. Перечислите способы измерения электрических величин
15. Перечислите причины, вызывающие искрение на коллекторе машины постоянного тока, какие из них являются наиболее опасными
16. Сформулируйте закон Ома для электрической цепи
17. Опишите режим работы асинхронной машины, при котором скольжение лежит в пределах от 0 до 1
18. Назовите единицы измерения следующих физических величин: ток, напряжение, сопротивление, мощность
19. Перечислите аппараты защиты, применяемые в электрических цепях
20. Опишите приборы для измерения электрических величин

Министерство образования Республики Беларусь  
Филиал БНТУ  
«Минский государственный политехнический колледж»

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

Методические рекомендации по выполнению  
практических работ для специальности  
2 – 37 01 05 «Городской электрический транспорт»

Разработчик

О. А. Метлицкая

Рецензент

А. Л. Седюкова

Указания рассмотрены и рекомендованы  
для  
внедрения в учебный процесс на:  
- заседании цикловой комиссии специдисци-  
плин  
специальностей 2 – 53 01 05 и 2 – 37 01 05  
Протокол № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Председатель комиссии А.Л. Седюкова  
– заседании экспертной методической ко-  
миссии  
Протокол № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

2015

## Содержание

Название практической работы	2 – 37 01 05	Номер страни
	Количество час	
1. Расчет силы тяги и торможения подвижным составом	2	3
2. Расчет электромеханических характеристик тягового двигателя	2	9
3. Расчет и построение графиков допустимой скорости движения	2	13
4. Расчет удельной действующей тормозной силы подвижного состава методом графической интерполяции	2	17
5. Расчет тормозного пути	2	19



## Практическая работа №1

### Расчет силы тяги и торможения подвижным составом

**1 Цель работы:** научиться рассчитывать силы тяги и торможения подвижным составом.

### 2 Теоретические сведения

Коэффициент инерции вращающихся частей.

Уравнение движения подвижного состава

$$m(1 + \gamma) \frac{dv}{dt} = F_{\partial} \quad \text{или} \quad m_{np} \frac{dv}{dt} = F_{\partial} \quad (1.1)$$

где  $m$  – масса подвижного состава,

$F_{\partial}$  – действующая сила.

На практике коэффициент инерции вращающихся частей  $(1+\gamma)$  определяют, воспользовавшись выражением

$$m_{\partial} = \sum \frac{J_{\partial}}{R_{\partial}^2} + \sum \frac{J_B}{R_B^2} + \sum \frac{J_{я}}{R_{\partial}^2} \mu^2, \quad (1.2)$$

где  $J_{\partial}$  – момент инерции движущихся колесных пар и ведущих мостов троллейбуса;

$J_B$  – момент инерции колесных пар прицепных вагонов и ведомых мостов троллейбуса;

$J_{я}$  – момент инерции якорей тяговых двигателей, включая части передачи, жестко связанные с валом двигателя;

$R_{\partial}$  – радиус движущихся колес,

$R_B$  – радиус колес прицепного вагона и ведомых мостов

троллейбуса,

$\mu$  - передаточное число редуктора

Момент инерции  $J$  каждого тела, входящий в выражение (1.2), представим в виде произведения

$$I = m_{ч} \cdot g_{ч}^2 \quad (1.3)$$

где  $m_{ч}$  – масса вращающейся части,

$g_{ч}$  – радиус вращения вращающейся части.

Эквивалентная масса определяется по формуле

$$m_{\partial} = \sum m_{\partial} \cdot \frac{g_{\partial}^2}{R_{\partial}^2} + \sum m_{\partial} \cdot \frac{g_{\partial}^2}{R_{\partial}^2} + \sum m_{я} \cdot \frac{g_{я}^2}{R_{\partial}^2} \cdot \mu^2 \quad (1.4)$$

где значение  $\gamma = \frac{m_{\partial}}{m}$

При вычислении  $m_{\partial}$  можно исходить из средних значений отношений радиусов инерции  $g$  к радиусам  $R$  внешних окружностей вращающихся частей.

Для движущихся и поддерживающих колесных пар и колес  $g/R$  равно 0,75 – 0,80;

для зубчатых колес 0,8;

для якорей тяговых двигателей 0,65 – 0,75.

При расчетах достаточную точность дают следующие значения  $(1+\gamma)$  для подвижного состава различных типов:

Тип подвижного состава	Коэффициент $(1+\gamma)$
1. Трамвай:	
моторные вагоны	1,09 – 1,15
прицепные вагоны	1,05 – 1,08
2. Троллейбусы	1,15 – 1,20

Величину  $(1+\gamma)$  для подвижного состава, состоящего из моторных и прицепных вагонов, определяют как средневзвешенное значение по выражению

$$1 + \gamma = 1 + \frac{\sum_{i=1}^k m_i v_i}{\sum_{i=1}^k m_i} \quad (1.5)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -ого однотипного вагона, у которого  $m_{\text{э}i} \neq m_i = \gamma_i$ ,

$k$  – число типов вагонов подвижного состава.

Коэффициент инерции вращающихся частей тем больше, чем меньше масса подвижного состава и больше число вращающихся частей, а также их размеры и, следовательно, масса. Коэффициент инерции двухосных вагонов меньше, чем четырехосных. Коэффициент инерции для любого подвижного состава с пассажирами меньше, чем без пассажиров.

Определение потребной мощности тягового двигателя троллейбуса

Потребную максимальную мощность тягового двигателя определяют из уравнения тягового баланса троллейбуса

$$P_{\max} = \frac{v_{\max}}{3600 \cdot \eta_{\text{тр}}} \cdot \left( gm\psi_d + \frac{K_B \cdot A_B \cdot v_{\max}^2}{3,6^2} \right) \quad (1.6)$$

где  $v_{\max}$  – максимальная (конструкционная) скорость,

$\eta_{\text{тр}}$  – КПД трансмиссии ( $\eta_{\text{тр}}=0,85 - 0,90$ ),

$\psi_d$  – коэффициент сопротивления дороги ( $\psi_d=0,018 - 0,03$ ),

$m$  – масса подвижного состава с пассажирами,

$K_B \cdot A_B$  – фактор обтекаемости ( $K_B \cdot A_B = 2,625 - 3,375$ ).

Передаточное число моста

$$n_m = \frac{0,377 \cdot r_0 \cdot n_{\text{дв max}}}{v_{\max}}, \quad (1.7)$$

где  $r_0$  – свободный радиус колеса,

$n_{\text{дв max}}$  – максимальное число оборотов тягового двигателя.

Режиму  $v_{\max}$  соответствует минимальный динамический фактор  $D_{\min}=0,05$ , следовательно, тяговый двигатель при этом работает на максимальных оборотах и развивает при этом минимальный крутящий момент

$$P = M_{\min} \quad (1.8)$$

Отсюда

$$M = \frac{P}{\omega_{\min}} \quad (1.9)$$

где  $\omega = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв max}}}{30}$  – угловая скорость вала,

$P$  – мощность двигателя, выбранная по каталогу.

#### Расчет ограничения силы тяги

Силу сцепления определяют, как произведение силы нажатия  $G_k$  колеса на рельс и коэффициента сцепления  $\psi_k$  колеса с рельсом, т.е.

$$T_k = G_k \cdot \psi_k \quad (1.10)$$

Если измерять нажатие колеса на рельс  $G_k$  в килоньютонах, то чтобы получить силу сцепления  $T_k$  в ньютонах, в правую часть выражения (1.10) необходимо ввести коэффициент, равный 1000. Следовательно, сила сцепления, Н

$$T_k = 1000 \cdot G_k \cdot \psi_k \quad (1.11)$$

Тогда для всего подвижного состава

$$F_{\max} \leq 1000 \cdot G_{\text{сц}} \cdot \psi \quad \text{или} \quad F_{\max} \leq 1000 \cdot m_{\text{сц}} \cdot g \cdot \psi \quad (1.12)$$

где  $F_{\max}$  - наибольшая допустимая по условиям сцепления сила тяги, Н

$G_{\text{сц}} = m_{\text{сц}} \cdot g$  - сцепной вес (сумма сил нажатия всех движущих осей подвижного состава, кН);

$\psi$  - коэффициент сцепления,

$m_{\text{сц}}$  - сцепная масса, т,

$g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

#### Расчет тормозной силы

Предельная сила сцепления подвижного состава при торможении равна произведению суммы нажатий всех тормозных колес  $G_T$  на коэффициент сцепления  $\psi$ .

$$T_{\text{пр}} = 1000 G_T \cdot \psi = 1000 \cdot m_T \cdot g \cdot \psi \quad (1.13)$$

Законы сцепления приближенно можно сформулировать:

1) наибольшая сила тяги не должна превосходить предельной силы сцепления

$$F_{\max} \leq T_{\text{пр}} \quad \text{или} \quad F_{\max} \leq 1000 \cdot m_{\text{сц}} \cdot g \cdot \psi$$

2) наибольшая тормозная сила не должна превосходить предельной силы сцепления

$$B_{\max} \leq T_{\text{пр}} \quad \text{или} \quad B_{\max} \leq 1000 \cdot m_T \cdot g \cdot \psi,$$

где  $B_{\max}$  - наибольшая допустимая суммарная тормозная сила, не вызывающая скольжения ни одной из тормозных осей.

3) если сила тяги подвижного состава  $F$  или тормозная сила  $B$  больше предельной силы сцепления  $T_{\text{пр}}$  нормальное движение состава невозможно (в режиме тяги возникает боксование, в режиме торможения - юз).

#### Коэффициент сцепления

В среднем расчетный коэффициент сцепления трамвая без индивидуального полотна за исключением дней листопада и гололеда принимается  $\psi_p = 0,15$ .

В средних условиях для тяговых расчетов можно принимать расчетный коэффициент сцепления троллейбуса

$$\psi_p = 0,3 - 0,35.$$

### 3 Порядок выполнения работы

3.1 Ознакомиться с методическими указаниями

3.2 Определить ограничение силы тяги подвижного состава, тормозную силу подвижного состава, коэффициент сцепления подвижного состава, коэффициент инерции вращающихся частей подвижного состава, действующую силу подвижного состава (в соответствии с заданием)

3.3 Оформить отчет

3.4 Сделать выводы по работе

3.5 Ответить на контрольные вопросы

### 4 Условия задач

#### *Задача 1*

Определить ограничение по сцеплению (наибольшую силу тяги), которую может развить трамвайный вагон (данные для расчетов взять из таблицы 1.1).

#### *Задача 2*

Определить ограничение по сцеплению (наибольшую силу тяги), которую может развить троллейбус (данные для расчетов взять из таблицы 1.1).

#### *Задача 3*

При движении трамвайного вагона (тип ПС задан вариантом) без пассажиров на затяжном подъеме сила тяги трамвая возросла до  $F$ , а коэффициент сцепления на данном участке пути  $\psi$ . Определить при каком коэффициенте сцепления возможно поступательное движение трамвая? (данные для расчетов взять из таблицы 1.1)

#### *Задача 4*

Определить коэффициент инерции вращающихся частей прицепного четырехосного вагона, если его масса  $m_{ПВ}$ , а масса одной колесной пары  $m_{КП}$ . (данные для расчетов взять из таблицы 1.1)

#### *Задача 5*

Определить коэффициент инерции вращающихся частей трамвайного поезда, состоящего из моторного вагона массой  $m_{МВ}$  и двух прицепных вагонов, каждый из которых имеет массу  $m_{ПВ}$ . (данные для расчетов взять из таблицы 1.1)

#### *Задача 6*

Определить какую необходимо приложить действующую силу  $F_d$  к троллейбусу типа TR-9 для получения ускорения  $a$ , если его физическая масса  $m$ . (данные для расчетов взять из таблицы 1.1)

Таблица 1.1 – Исходные данные для расчета

Вариант	Задача					
	1	2	3	4	5	6
1	АКСМ-60102	АКСМ-321	$F= 25$ кН	$m_{ПВ} = 13,8$ т	$m_{МВ} = 16$ т	$a= 1$ м/с <sup>2</sup>

			$\psi = 0,1$	$m_{\text{КП}} = 0,4 \text{ т}$	$m_{\text{ПВ}} = 10 \text{ т}$	$m = 8,89 \text{ т}$
2	АКСМ-321	АКСМ-213	$F = 24 \text{ кН}$ $\psi = 0,13$	$m_{\text{ПВ}} = 13,5 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,45 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 16 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 9 \text{ т}$	$a = 0,9 \text{ м/с}^2$ $m = 8,9 \text{ т}$
3	АКСМ-420	АКСМ-60102	$F = 20,9 \text{ кН}$ $\psi = 0,09$	$m_{\text{ПВ}} = 13,6 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,5 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 17 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 10 \text{ т}$	$a = 1,1 \text{ м/с}^2$ $m = 8,7 \text{ т}$
4	АКСМ-60103	АКСМ-420	$F = 21 \text{ кН}$ $\psi = 0,11$	$m_{\text{ПВ}} = 13,5 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,4 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 16,5 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 10 \text{ т}$	$a = 1,05 \text{ м/с}^2$ $m = 8,75 \text{ т}$
5	АКСМ-321	АКСМ-60103	$F = 23 \text{ кН}$ $\psi = 0,1$	$m_{\text{ПВ}} = 13,2 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,43 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 15 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 11 \text{ т}$	$a = 1,1 \text{ м/с}^2$ $m = 8,8 \text{ т}$
6	АКСМ-333	АКСМ-321	$F = 26 \text{ кН}$ $\psi = 0,09$	$m_{\text{ПВ}} = 13,3 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,44 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 1,5 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 10 \text{ т}$	$a = 0,85 \text{ м/с}^2$ $m = 8,85 \text{ т}$
7	АКСМ-60102	АКСМ-201	$F = 25 \text{ кН}$ $\psi = 0,12$	$m_{\text{ПВ}} = 13,7 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,43 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 16 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 9,5 \text{ т}$	$a = 0,95 \text{ м/с}^2$ $m = 8,92 \text{ т}$
8	АКСМ-321	АКСМ-60103	$F = 21,9 \text{ кН}$ $\psi = 0,1$	$m_{\text{ПВ}} = 13,7 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,35 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 17 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 10,5 \text{ т}$	$a = 1,1 \text{ м/с}^2$ $m = 8,91 \text{ т}$
9	АКСМ-420	АКСМ-333	$F = 24 \text{ кН}$ $\psi = 0,11$	$m_{\text{ПВ}} = 13,6 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,25 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 16,4 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 11 \text{ т}$	$a = 1 \text{ м/с}^2$ $m = 8,9 \text{ т}$
10	АКСМ-60103	АКСМ-321	$F = 23,3 \text{ кН}$ $\psi = 0,1$	$m_{\text{ПВ}} = 13,4 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,4 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 15,8 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 9 \text{ т}$	$a = 1,05 \text{ м/с}^2$ $m = 8,85 \text{ т}$
11	АКСМ-201	АКСМ-213	$F = 25 \text{ кН}$ $\psi = 0,14$	$m_{\text{ПВ}} = 13,5 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,45 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 16,2 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 8,9 \text{ т}$	$a = 0,95 \text{ м/с}^2$ $m = 8,84 \text{ т}$
12	АКСМ-60103	АКСМ-201	$F = 26 \text{ кН}$ $\psi = 0,12$	$m_{\text{ПВ}} = 13,6 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,48 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 15,9 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 9,4 \text{ т}$	$a = 1,1 \text{ м/с}^2$ $m = 8,89 \text{ т}$
13	АКСМ-60102	АКСМ-321	$F = 27 \text{ кН}$ $\psi = 0,13$	$m_{\text{ПВ}} = 13,9 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,5 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 16 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 10,2 \text{ т}$	$a = 0,9 \text{ м/с}^2$ $m = 8,86 \text{ т}$
14	АКСМ-60103	АКСМ-333	$F = 25,5 \text{ кН}$ $\psi = 0,1$	$m_{\text{ПВ}} = 13,7 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,35 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 15,7 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 9,6 \text{ т}$	$a = 1 \text{ м/с}^2$ $m = 8,83 \text{ т}$
15	РВ3-6М2	АКСМ-60103	$F = 24,5 \text{ кН}$ $\psi = 0,11$	$m_{\text{ПВ}} = 13,65 \text{ т}$ $m_{\text{КП}} = 0,45 \text{ т}$	$m_{\text{МВ}} = 16,1 \text{ т}$ $m_{\text{ПВ}} = 9,8 \text{ т}$	$a = 0,85 \text{ м/с}^2$ $m = 8,9 \text{ т}$

## 5 Содержание отчета

5.1 Название и цель работы

5.2 Общие сведения по расчету силы тяги и торможения

5.3 Исходные данные (условие задачи)

5.4 Решение задач

5.5 Выводы о проделанной работе

## 6 Контрольные вопросы

6.1 Дайте понятие движущиеся колесные пары

6.2 Сформулируйте понятия сил тяги и торможения

6.3 Объясните разницу между сцепным, тормозным и полным весом подвижного состава

6.4 Определите, чем отличаются буксование и юз друг от друга; какое явление опаснее; обоснуйте свой ответ примерами

## Литература

1. Байрыева Л.С., Шевченко В.В. Электрическая тяга. – М.; Транспорт, 1986. – 200с.
2. Троллейбусы (устройство и техническое обслуживание) под редакцией Богдана Н.В.,- Минск: Ураджай, 1999-62с.
3. Богдан Н.В., Атаманов Ю.Е., Сафонов А.И. Троллейбус (теория, конструирование, расчет).- Минск: Ураджай, 1999-345с.
4. Осипов С.И., Осипов С. С., Феоктистов В.П. Теория электрической тяги. М.: Маршрут, 2006. – 436с.

## Практическая работа №2

### Расчет электромеханических характеристик тягового двигателя

**1 Цель работы:** научиться рассчитывать и строить электрические и механические характеристики тягового двигателя.

#### 2 Теоретические сведения

Потери напряжения на активном сопротивлении обмоток двигателя, В

$$I r = I(r_{я} + r_{дп} + r_{в}) \quad (2.1)$$

Частота вращения якоря, об/мин, вычисляется по формуле

$$n = \frac{E}{C' \Phi} - \frac{U_{д} - I r}{C' \Phi} \quad (2.2)$$

Для определения к.п.д. двигателя рассчитываем электрические потери, Вт

$$I^2 r = I^2(r_{я} + r_{дп} + r_{в}) \quad (2.3)$$

По характеристикам, представленным на рисунке 2.1, для определения значений частоты вращения и магнитодействующей силы находим сумму механических и магнитных потерь, Вт

$$\Delta P_M + \Delta P_C \quad (2.4)$$

Затем по выражению определяем к.п.д., %

$$n_{д} = \frac{P_M}{P} = \frac{P_M}{U_{д} \cdot I} = \frac{U_{д} \cdot I - \sum \Delta P}{U_{д} \cdot I} \quad (2.5)$$

Момент двигателя, Н·м, рассчитывается по формуле

$$M = \frac{30 U_{д} \cdot I}{\pi} \cdot \eta_{д} \quad (2.6)$$

Для получения электромеханических характеристик на ободе колеса определяем скорость на ободе колеса, км/ч

$$v = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{D_k}{2} \cdot \frac{3600}{1000} = 0,1885 \cdot \frac{D_k \cdot n}{\mu} \quad (2.7)$$

КПД двигателя, % определяется по формуле

$$\eta = \eta_d \cdot \eta_3 \quad (2.8)$$

Принимаем КПД редуктора для трамвая АКСМ-60102 равным 0,95, что соответствует зубчатой передаче с карданным валом. Сила тяги на ободу колеса, кН, определяется по формуле

$$F = \frac{M \cdot \mu}{D_K / 2} \cdot \eta_3 \quad (2.9)$$

### 3 Порядок выполнения работы

3.1 Ознакомиться с методическими указаниями

3.2 По значениям магнитодвижущей силы и тока якоря, пользуясь характеристиками, приведенными на рисунке 2.1, найти значение магнитного потока.

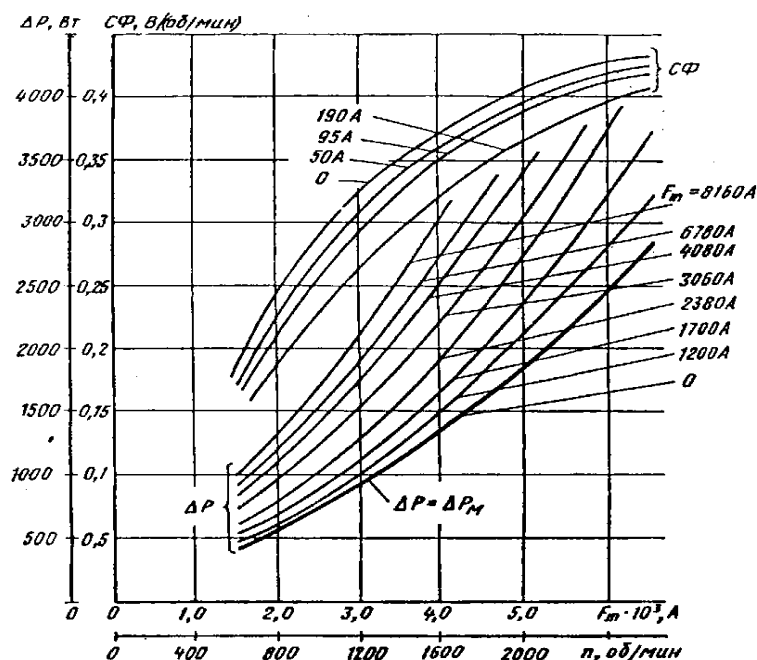


Рисунок 2.1 - Характеристики механических и магнитных потерь

Рассчитать все значения, представленные в таблице 2.1. Построить на миллиметровой бумаге электромеханические характеристики на валу и на ободу колеса.

3.3 Оформить отчет

3.4 Сделать выводы по работе

3.5 Ответить на контрольные вопросы

Таблица 2.1 – Данные расчета электромеханических характеристик

I, А	30	50	70	100	150	200
М.д.с., А						
СФ, В/(об/мин)						
I <sub>r</sub> , В						
n, об/мин						
I <sup>2</sup> <sub>r</sub> , Вт						
ΔP <sub>М</sub> +ΔP <sub>С</sub> , Вт						
ΣΔP, кВт						
U <sub>Д</sub> I, кВт						
η <sub>Д</sub> , %						
M, Н·м						
v, км/ч						
η, %						
F, кН						

#### 4 Условие задачи

Рассчитать и построить электромеханических характеристик тягового двигателя.

Технические характеристики тягового двигателя, необходимые для расчетов, представлены в таблицах 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2 – Параметры тягового двигателя (варианты 1-7)

Данные двигателя	Вариант						
	1	2	3	4	5	6	7
Номинальное напряжение, В	550	550	550	550	550	550	550
Ток часовой, А	50	190	95	190	50	190	95
Частота вращения, об/мин	1530	1500	1470	1440	1430	1460	1420
К. п. д., %	88,5	90	85	87	85	84	83
Число витков главного полюса	34	34	34	34	34	34	34
Активное сопротивление обмоток якоря $r_{я}$ при $t = 100^{\circ}\text{C}$ , Ом	0,195	0,190	0,200	0,180	0,185	0,179	0,188
главных полюсов $r_{в}$	0,085	0,080	0,075	0,090	0,086	0,089	0,083
добавочных полюсов $r_{дп}$	0,080	0,090	0,085	0,075	0,085	0,093	0,081
Передаточное число редуктора	7,98	7,95	7,99	7,96	7,94	7,98	7,93
Диаметр ведущего колеса, мм	780	780	785	775	795	780	785



Таблица 2.3 – Параметры тягового двигателя (варианты 8-15)

Данные двигателя	Вариант							
	8	9	10	11	12	13	14	14
Номинальное напряжение, В	550	550	550	550	550	550	550	550
Ток часовой, А	50	190	95	50	190	95	0	190
Частота вращения, об/мин	1530	1500	1470	1440	1390	1380	1500	1490
К. п. д., %	88,9	91	83	85	89	84	80	89
Число витков главного полюса	34	34	34	34	34	34	34	34
Активное сопротивление обмоток якоря $r_{я}$ при $t = 100^{\circ}\text{C}$ , Ом	0,191	0,195	0,203	0,187	0,182	0,192	0,196	0,199
главных полюсов $r_{в}$	0,075	0,065	0,082	0,094	0,082	0,089	0,086	0,081
добавочных полюсов $r_{дп}$	0,086	0,094	0,089	0,075	0,093	0,094	0,091	0,092
Передаточное число редуктора	7,95	7,98	7,94	7,98	7,84	7,83	7,88	7,91
Диаметр ведущего колеса, мм	783	788	781	773	794	798	793	796

## 5 Содержание отчета

5.1 Название и цель работы

5.2 Исходные данные

5.3 Таблица 2.2 с рассчитанными значениями.

5.4 Пример расчета электромеханических характеристик на валу и на ободе колеса (для одной точки)

5.5 Электромеханические характеристики тягового двигателя на валу якоря и на ободе колеса, построенные на миллиметровой бумаге

5.6 Выводы о проделанной работе.

5.7 Ответы на контрольные вопросы

## 6 Контрольные вопросы

6.1 Сформулируйте понятия электромеханические характеристики

6.2 Объясните, почему для одного и того же тягового двигателя возможны различные электромеханические характеристики на ободе колеса

6.3 Объясните какой тип двигателя имеет жёсткие тяговые характеристики

- 6.4 Обоснуйте, как определяется к.п.д. двигателя  
6.5 Определите двигатель какого возбуждения может автоматически переходить в генераторный режим

### Практическая работа №3

#### *Расчет и построение графиков допустимой скорости движения*

**1 Цель работы:** рассчитать и построить графики допустимой скорости движения троллейбуса.

#### **2 Теоретические сведения**

В условиях работы на линии допустимая скорость движения подвижного состава определяется его тормозными средствами. При экстренном торможении они должны обеспечить максимально возможные замедления для остановки подвижного состава на заданном по условиям безопасности тормозном пути, так как потребность в экстренной остановке может возникнуть в любой момент движения и, следовательно, в любой точке пути, то наибольшая допустимая скорость движения не должна превышать скорости начала экстренного торможения, при которой тормозной путь получается равным допустимому тормозному пути.

При решении тормозных задач исходят из наиболее тяжелого случая экстренного торможения, при котором используются, как правило, механические тормоза с наибольшим нажатием колодок. В связи с тем, что невозможно предвидеть все случаи экстренного торможения, обычно задаются определенным расчетным тормозным путем  $p_m$ , на котором при любых условиях тормозные средства должны обеспечить остановку подвижного состава.

Тормозной путь зависит от замедляющей силы, создаваемой тормозными средствами подвижного состава, уклона пути и скорости начала торможения. Для того чтобы подвижной состав мог в любой момент времени остановиться на протяжении расчетного тормозного пути, необходимо найти зависимость между  $p_m$ , удельной действующей тормозной силой  $b + \omega_0$  скоростью торможения  $v$  и уклоном пути. Возможны четыре варианта тормозных задач:

1) по заданному тормозному пути  $p_m$ , уклону и удельной действующей тормозной силе  $b + \omega_0$  определить допустимую тормозную скорость начала торможения  $v_m$ ;

2) по тормозному пути  $p_m$ , уклону и скорости торможения  $v_m$  определить удельную действующую тормозную силу  $b + \omega_0$

3) определить тормозной путь  $p_m$  по заданному уклону, скорости торможения  $v_m$  и удельной действующей тормозной силе  $b + \omega_0$  подвижного состава;

4) найти значение уклона при заданных  $p_m$ ,  $v_m$  и удельной действующей тормозной силе  $b + \omega_0$ .

На практике наиболее часто встречаются задачи первого и второго вариантов.

Расчетный тормозной путь  $L_{рт}$  — это путь, проходимый подвижным составом с момента возникновения необходимости торможения до полной остановки. Он состоит из действительного тормозного пути  $m$ , где на подвижной состав действует тормозная сила, и пути подготовки  $n$ , который подвижной состав проходит за время подготовки  $n$ .

Рассмотрим методику построения кривой  $v(l)$  графическим способом.

Для этого задаются последовательными интервалами скорости  $\Delta v$  и в пределах каждого из них принимают равнодействующую силу  $f_d$  равной ее значению в середине интервала  $\Delta v$ . При таком построении кривая  $v(l)$  будет состоять из отрезков, каждый из которых заключен в принятых интервалах скорости.

Для определения масштабов используем соотношение

$$m_f = \xi m_v^2 / (1+\gamma)m_l \quad (3.15)$$

выбираем стандартные масштабы скорости  $m_v$  и пути  $m_l$ , а масштаб силы  $m_f$  вычисляем.

После определения масштабов в левом координатном углу строят диаграмму действующих сил  $f(v)$ , а справа от нее кривую  $v(l)$ . Построение кривой движения производят с момента трогания подвижного состава.

### 3 Порядок выполнения работы

3.1 Ознакомиться с методическими указаниями

3.2 Определить допустимую скорость движения троллейбуса;

3.3 Рассчитать характеристику удельной тормозной силы по выражению при наибольшем нажатии колодок

$$b = 1000\varphi_k\theta, \quad (3.1)$$

где  $\varphi_k$  принимаем равным 0,35, а  $\theta = \delta$ .

3.4 Рассчитать зависимость удельного основного сопротивления движению  $\omega(v)$  по выражению при движении без тока

$$\omega_0 = 16 + 0,004v^2 \quad (3.2)$$

и зависимость удельной действующей тормозной силы  $b + \omega = (v)$ .

Результаты расчета сводятся в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты расчета параметров

$v$ , км/ч	0	10	20	30	40	50	60
$\omega$ , Н/кН							
$b$ , Н/кН							
$b + \omega$ , Н/кН							

Для того чтобы построить зависимость удельной действующей тормозной силы  $b + \omega = (v)$ , выбирать масштабы скорости и пути

$$= \text{мм}/(\text{км}/\text{ч}), = 1 \text{ мм}/\text{м} \quad (3.3)$$

По формуле определяем масштаб силы

$$m = \xi / (1 + \gamma) \quad (3.4)$$

3.5 В выбранном масштабе построить характеристику удельной действующей тормозной силы в зависимости от скорости  $\omega = (v)$ . На диаграмме  $u(l)$  по оси абсцисс в выбранном масштабе пути отложить расчетный тормозной путь  $p_{тл} = 30$  м и из его конца  $O'$  в обратном порядке (от  $y = 0$ ) графическим методом построить кривые торможения  $u(l)$  для данных уклонов

Начало координат переноситься на отрезок вниз по оси ординат в случае подъема, в случае спуска начало координат переноситься вверх.

Следует помнить, что подъем или спуск, выраженный в тысячных долях, численно равен удельной действующей силе, выраженной в ньютонах на килоньютоны. Для учета подготовительного пути достаточно для любой скорости  $v$  отложить от оси ординат отрезок  $n = n \cdot v / 3,6$  в выбранном масштабе пути и соединить его прямой линией с точкой  $O$ . Для скорости  $v = 72$  км/ч путь подготовки  $n = 1 \cdot 72 / 3,6 = 20$  м. с учетом масштаба  $n = 1 \cdot 20 = 20$  мм.

3.6 Оформить отчет

3.7 Сделать выводы по работе

3.8 Ответить на контрольные вопросы

#### 4 Условия задачи

Рассчитать и построить графики допустимой скорости движения подвижного состава.

Технические данные, необходимые для расчетов, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические данные для решения задачи

Вариант	L, м	Уклон, %	$1 + \gamma$	$\delta$	$\xi$
1	30	-35 , + 40	1.09	1,5	0.127
2	30	-25 , + 35	1.11	3	0.124
3	30	-40 , + 30	1.13	2	0.121
4	30	-30 , + 35	1.15	4	0.125
5	30	-45 , + 25	1.16	4,5	0.126
6	30	-35 , + 40	1.04	3,5	0.121
7	30	-25 , + 30	1.06	1.5	0.127
8	30	-35 , + 40	1.12	3,5	0.122
9	30	-40 , + 30	1.13	2,5	0.128
10	30	-30 , + 35	1.15	4	0.123
11	30	-25 , + 35	1.14	3,5	0.127
12	30	-35 , + 45	1.17	3	0.126
13	30	-40 , + 30	1.19	2	0.125
14	30	-30 , + 35	1.12	4,5	0.129
15	30	-25 , + 35	1.16	3	0.127

#### 5 Содержание отчета

- 5.1 Название и цель работы
- 5.3 Исходные данные (условие задачи)
- 5.4 Расчет и построение зависимости допустимой тормозной скорости на заданном участке
- 5.5 Оформление отчета
- 5.6 Выводы о проделанной работе

## **6 Контрольные вопросы**

- 6.1 Дать понятие тормозной путь и объясните от чего он зависит
- 6.2 Приведите варианты решения тормозных задач
- 6.3 Объясните принцип реостатного торможения тягового двигателя
- 6.4 Опишите системы торможения подвижного состава
- 6.5 Начертите зависимости при реостатном торможение для двигателей смешанного возбуждения; приведите основные соотношения

### **Практическая работа №4**

#### **Расчет удельной действующей тормозной силы подвижного состава методом графической интерполяции**

**1 Цель работы:** По заданным пути, скорости и уклону найти удельную действующую тормозную силу подвижного состава используя способ графической интерполяции.

#### **2 Порядок выполнения работы**

- 2.1 Ознакомиться с методическими указаниями
- 2.2 Задаться несколькими значениями тормозного коэффициента  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  и т.д.;
- 2.3 Рассчитать характеристику удельной тормозной силы  $b(v)$  по формуле (3.1);
- 2.4 Рассчитать характеристику удельного основного сопротивления движению  $w_0(v)$  для данного типа подвижного состава;
- 2.5 Определить на заданном уклоне  $i$  допустимые скорости  $v_{m1}$ ,  $u_{m2}$  и т.д., соответствующие тормозным коэффициентам  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  и т.д.;
- 2.6 По полученным значениям  $u_{m1}$ ,  $u_{m2}$  и т.д. построить зависимость тормозного коэффициента от скорости торможения;
- 2.7 Определить для заданного значения скорости  $u_m$  значение искомого тормозного коэффициента  $\theta_m$ .
- 2.8 Оформить отчет
- 2.9 Сделать выводы по работе
- 2.10 Ответить на контрольные вопросы

### 3 Условия задачи

Рассчитать удельную действующую тормозную силу подвижного состава методом графической интерполяции

Технические данные для расчета допустимой скорости представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Технические данные

Вариант	L, м	Уклон, %	$1+\gamma$	$\delta$	$\xi$
1	30	-35 , + 40	1.09	1,5	0,126
2	30	-25 , + 35	1.11	3,5	0.128
3	30	-40 , + 30	1.13	2	0.123
4	30	-30 , + 35	1.15	4	0.124
5	30	-35 , + 40	1.09	1,5	0.126
6	30	-25 , + 35	1.11	3	0.121
7	30	-40 , + 30	1.13	2	0.123
8	30	-30 , + 35	1.15	4,5	0.126
9	30	-35 , + 40	1.09	1,5	0.129
10	30	-25 , + 35	1.11	3	0.127
11	30	-40 , + 30	1.13	2,5	0.123
12	30	-30 , + 35	1.15	4	0.127
13	30	-45 , + 25	1.16	4,5	0.122
14	30	-30 , + 35	1.14	4	0.126
15	30	-45 , + 25	1.18	4,5	0.124

### 4 Содержание отчета

- 4.1 Название и цель работы
- 4.2 Оснащение рабочего места
- 4.3 Исходные данные (условие задачи)
- 4.4 Расчет и построение зависимости допустимой тормозной скорости на заданном участке
- 4.5 Оформление отчета
- 4.6 Выводы о проделанной работе

### 5 Контрольные вопросы

- 5.1 Опишите принцип рекуперативного торможения тягового двигателя
- 5.2 Объясните зависимость процесса самовозбуждения от сопротивления тормозного реостата
- 5.3 Начертите схему и характеристики рекуперативного торможения двигателя встречно-смешанного возбуждения.
- 5.4 Опишите зависимость процесса самовозбуждения от скорости

## 5.5 Объясните, какие ограничения тормозных характеристик бывают

### Практическая работа №5

#### Расчет тормозного пути

**1 Цель работы:** По скорости, тормозному коэффициенту, и уклону найти тормозной путь.

#### 2 Порядок выполнения работы

2.1 Ознакомиться с методическими указаниями

2.2 Построение кривой движения  $v(l)$  выполняется от скорости начала торможения  $v_m$  до скорости  $v=0$ . В выбранном масштабе построить характеристику удельной действующей тормозной силы в зависимости от скорости  $+w=(v)$ . На диаграмме  $v(l)$  по оси абсцисс в выбранном масштабе пути отложить расчетный тормозной путь.

2.3 Оформить отчет

2.4 Сделать выводы по работе

2.5 Ответить на контрольные вопросы

#### 3 Условие задачи

Рассчитать тормозной путь подвижного состава

Технические данные для расчета представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Технические данные

Вариант	L, м	Уклон, %	$1+\gamma$	$\delta$	$\xi$
1	30	-35, +40	1.05	1,5	0.121
2	20	-25, +35	1.12	3,5	0.128
3	25	-40, +30	1.13	2	0.127
4	35	-30, +35	1.15	4	0.126
5	20	-35, +40	1.07	1,5	0.127
6	30	-25, +35	1.13	3	0.122
7	40	-40, +30	1.19	2	0.127
8	35	-30, +35	1.15	4	0.124
9	30	-35, +40	1.09	1,5	0.126
10	20	-25, +35	1.11	3	0.121
11	30	-40, +30	1.12	2	0.127
12	25	-30, +35	1.15	4	0.129
13	30	-35, +40	1.03	1,5	0.127
14	35	-25, +35	1.15	3	0.128
15	40	-40, +30	1.17	2	0.125

## 4 Содержание отчета

- 4.1 Название и цель работы
- 4.2 Оснащение рабочего места
- 4.3 Исходные данные (условие задачи)
- 4.4 Расчет и построение зависимости допустимой тормозной скорости на заданном участке
- 4.5 Оформление отчета
- 4.6 Выводы о проделанной работе

## 5 Контрольные вопросы

- 5.1 Начертите зависимости при рекуперативно-реостатном торможение для двигателей смешанного возбуждения; приведите основные соотношения
- 5.2 Начертите зависимости при рекуперативно-реостатном торможение для двигателей последовательного возбуждения; приведите основные соотношения
- 5.3 Приведите основные соотношения для расчёта характеристик реостатного торможения
- 5.4 Опишите электрическую устойчивость при реостатном торможении
- 5.5 Объясните, двигатель какого возбуждения может автоматически переходить в генераторный режим



Министерство образования Республики Беларусь  
Филиал БНТУ  
«Минский государственный политехнический колледж»

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА**

Методические указания и задания для домашней контрольной работы  
для учащихся заочной формы обучения для специальности  
2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

Разработчик  
Рецензент

О.А. Метлицкая  
Т.С. Шмакова

Методические указания и задания для домашней контрольной работы рассмотрены и рекомендованы для внедрения в образовательный процесс на:

-заседании цикловой комиссии спецдисциплин специальностей 2-37 01 05, 2-53 01 05

Протокол № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2016г.

Председатель ЦК \_\_\_\_\_ А.Л. Седюкова

-заседании экспертного методического совета

Протокол № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2016г.

## Содержание

Введение	3
1 Тематический план	4
2 Содержание дисциплины и методические рекомендации по ее изучению	6
3 Задание для домашней контрольной работы	26
4 Методические рекомендации к выполнению домашней контрольной работы	32
Литература	35

## Введение

Методические указания по учебной дисциплине «Электрическая тяга» разработаны для учащихся заочного отделения специальности 2-37 01 05 «Городской электрический транспорт» с целью оказания методической помощи учащимся при изучении дисциплины. В содержательной части методических указаний для каждой темы приведен краткий конспект, требования к уровню знаний, контрольные вопросы.

Программа дисциплины «Электрическая тяга» предусматривает изучение элементов электрической тяги, тяговых характеристик подвижного состава и системы торможения подвижного состава. Программа дисциплины «Электрическая тяга» разработана на основе тематического плана, утвержденного Министерством образования Республики Беларусь 19.03.2010 к учебному плану № 73Д/к.

В результате изучения предмета учащиеся должны знать на уровне представления:

- классификацию подвижного состава городского электрического транспорта,
  - основные направления развития тягового привода,
  - принципиальные схемы тягового привода,
- понимания:
- режимы движения подвижного состава городского электрического транспорта,
  - общее устройство и тяговые характеристики подвижного состава городского электрического транспорта,
  - способы пуска тягового двигателя и системы торможения подвижного состава городского электрического транспорта.

Учащиеся должны уметь:

- рассчитывать силы тяги и торможения подвижным составом;
- рассчитывать электромеханические характеристики тяговых двигателей;
- читать схемы включения тягового двигателя.

Учебная дисциплина «Электрическая тяга» разработана для специальности 2-37 01 05 «Городской электрический транспорт» и базируется на следующих дисциплинах: «Основы электропривода», «Основы промышленной электроники», «Электрооборудование городского транспорта», «Электрические аппараты», «Электрические машины».

В методических указаниях приведены примерные критерии оценки результатов учебной деятельности учащихся по учебной дисциплине, которые разработаны на основе десятибалльной шкалы и показателей оценки результатов учебной деятельности обучающихся в учреждениях среднего специального образования (постановление Министерства образования Республики Беларусь от 29.03.2004 № 17).

## 1 Тематический план

Раздел, тема	Количество учебных часов			
	Всего по учебному плану для дневной формы	Всего по учебному плану для заочной формы	В том числе	На самостоятельное изучение
			на практические работы	
1	2	3	4	5
Введение	2	2		
<b>Раздел 1 Элементы электрической тяги</b>	10	4	2	6
Тема 1.1 Режимы движения подвижным составом	4	2		2
Тема 1.2 Реализация сил тяги и торможения	4			4
<i>Практическая работа №1</i> Расчет сил тяги и торможения подвижным составом	2		2	-
<b>Раздел 2 Характеристики тяговых электродвигателей</b>	18	2		16
Тема 2.1 Электромеханические характеристики на валу тяговых двигателей	2	2		-
Тема 2.2 Электромеханические	8			8

характеристики на обode вращающегося колеса				
<i>Практическая работа №2</i> Расчет электромеханических характеристик тяговых двигателей	2			2
Тема 2.3 Тяговые характеристики электроподвижного состава	2			2
Тема 2.4 Сравнение тяговых электродвигателей	6			6
<b><i>Раздел 3 Пуск и регулирование скорости подвижного состава</i></b>	14	2		12
Тема 3.1 Способы пуска подвижного состава	4	2		-
Тема 3.2 Регулирование скорости тягового двигателя	2			2
Тема 3.3 Характеристики двигателей при изменении напряжения	2			2
Тема 3.4 Характеристики двигателей при изменении возбуждения	2			2

Тема 3.5 Тиристорно-импульсное управление тягового двигателя	4			4
<b>Раздел 4 Торможение подвижного состава</b>	16	2		14
Тема 4.1 Системы торможения	2	2		-
Тема 4.2 Рекуперативное торможение	2			2
Тема 4.3 Реостатное торможение	4			4
Тема 4.4 Рекуперативно-реостатное торможение	2			2
<i>Расчетно-графическая работа</i> Определение допустимой тормозной скорости на заданном участке	6			6
<b>Итого</b>	<b>60</b>	<b>10</b>	<b>2</b>	<b>48</b>

## 2 Содержание дисциплины и методические рекомендации по ее изучению

### Введение

Цели и задачи учебной дисциплины. Связь с другими учебными дисциплинами. Электрическая тяга на городском электрическом транспорте. Классификация электрического транспорта: магистральный, городской, промышленный.

### Методические рекомендации

При ознакомлении с материалом учащийся раскрывает понятие городского электрического транспорта, излагает классификацию электрического транспорта, определяет связь с другими учебными дисциплинами.

### Контрольные вопросы

- 1 Охарактеризуйте понятие «Городской электрический транспорт».
- 2 Перечислите учебные дисциплины, знания по которым будут способствовать качественному изучению дисциплины «Электрическая тяга».
- 3 Приведите классификацию электрического транспорта.
- 4 Объясните отличие городского, магистрального и промышленного транспорта.

Литература: [1] с.5-10.

### Раздел 1 Элементы электрической тяги

#### *Тема 1.1 Режимы движения подвижным составом*

Основные режимы движения подвижного состава: под током (режим тяги), выбег (движение без тока) и торможение. Кривые движения: зависимости скорости от пройденного пути  $v(t)$  и пути от времени  $l(t)$ . Вывод уравнения движения подвижного состава Понятие коэффициента инерции вращающихся частей и методы его определения.

Применение уравнения движения к различным видам движения подвижного состава (режим тяги, режим выбега и торможения).

### Методические рекомендации

При изучении темы учащийся формирует понятие коэффициента инерции вращающихся частей, описывает методы определения коэффициента инерции; выводит уравнения движения подвижного состава; выявляет

режимы движения, конкретизирует уравнение действующей силы в каждом режиме движения подвижным составом.

В режиме тяги к ПС приложена сила тяги, развиваемая тяговыми электродвигателями. В режиме выбега тяговые двигатели отключаются от контактной сети, и подвижной состав движется по инерции под действием сил сопротивления движению, направленных против движения. В режиме торможения на ПС действует направленная против движения тормозная сила.

Движение ПС по рельсовому и безрельсовому пути характеризуется зависимостями скорости от пройденного пути  $v(t)$  и пути от времени  $l(t)$ , называемых кривыми движения.

Расчет этих зависимостей производится с помощью уравнения движения ПС, которое устанавливает в дифференциальной форме связь между скоростью  $v$ , временем  $t$  и пройденным путем  $l$  и дает возможность построить кривые движения.

Учащиеся должны знать допущения, принимаемые при выводе уравнения движения:

- ПС принимают за материальную точку, которая расположена условно в центре тяжести ПС;
- Эта материальная точка движется поступательно под воздействием равнодействующей от всех сил  $F_d$ , действующих на подвижной состав. Сила  $F_d$  направлена по движению ПС и может быть как положительной, так и отрицательной.

### Контрольные вопросы

1 Объясните отличие режимов движения подвижного состава, перечислите силы, действующие в каждом из них.

2 Перечислите допущения, которые применяются при выводе уравнения движения подвижного состава.

3 Охарактеризуйте понятия «коэффициент инерции вращающихся частей» и «приведенная масса подвижного состава».

4 Охарактеризуйте размерности величин, входящих в уравнение движения.

5 Объясните, что понимают под удельной силой.

6 Объясните какие зависимости называют кривыми движения.

Литература: [1] с.11-15.

### *Тема 1.2 Реализация сил тяги и торможения*

Движущиеся колесные пары. Возникновение силы сцепления отдельного колеса Образование и ограничение силы тяги. Касательная сила тяги на ободу движущего колеса.

Условие нормального качения колеса при торможении Образование и ограничение тормозной силы. Понятие юза. Контактная или опорная



площадка. зона качения или покоя. Физические процессы образования силы сцепления, коэффициент сцепления.

### Методические рекомендации

При изучении темы учащийся раскрывает понятие движущихся колесных пар, касательной силы тяги боксования колес, объясняет причину возникновения предельной силы сцепления; выявляет силы действующие на колесную пару, сравнивает образования силы тяги и силы торможения; формирует понятие опорной площадки и зоны сцепления; описывает причины возникновения коэффициента сцепления.

Для поступательного движения ПС необходимо наличие внешних сил. Такая внешняя сила возникает в результате сцепления движущих колес с рельсами или дорожным покрытием.

Силу, которая обусловлена вращающим моментом тягового двигателя, называют силой тяги.

Сила тяги ограничивается предельно допустимой силой сцепления, имеющей природу сил трения. Если этот предел будет превышен, произойдет срыв сцепления. Движущие колеса начнут скользить относительно пути в точке касания. При этом их угловая скорость  $\omega'$  будет больше угловой скорости  $\omega$ , соответствующей поступательной скорости  $v$ , а значение угловой скорости  $\omega_{ск}$  колес по рельсам  $\omega' = \omega + \omega_{ск}$ . Начнется боксование колес, при котором происходит повышенный износ бандажей (или шин) и пути.

Если в режиме торможения тормозная сила превысит предельно допустимую силу сцепления, произойдет заклинивание колес. Тормозные колеса начнут скользить относительно пути в точке касания. Это явление называется *юзом*. При юзе резко уменьшается тормозная сила, т.к. она определяется коэффициентом трения качения между колесом и рельсом при скольжении их относительно друг друга. А коэффициент скольжения всегда меньше коэффициента сцепления. Юз – опасное явление для безопасности движения, т.к. во время юза увеличиваются время торможения и тормозной путь. Кроме того, во время юза при скольжении колес происходит сильное истирание бандажей колесных пар или шин троллейбуса.

Учащиеся должны уметь пользоваться законами сцепления:

а) наибольшая сила тяги подвижного состава не должна превышать предельной силы сцепления;

б) наибольшая тормозная сила подвижного состава не должна превосходить предельной силы сцепления;

в) если сила тяги подвижного состава или тормозная сила больше предельной силы сцепления, нормальное движение подвижного состава невозможно (в режиме тяги возникает боксование, в режиме торможения – юз).

На ПС, как правило, имеется несколько колесных пар. Коэффициент сцепления ПС  $\psi$  в целом всегда меньше коэффициента сцепления колеса  $\psi_k$ . Это обусловлено причинами:

1. Неравенство силы тяги или тормозной силы отдельных осей вследствие неодинаковости диаметров движущих колес и электромеханических характеристик двигателей,
2. Разный вес, приходящийся на движущие и тормозные оси,
3. Загрязнение рельсов и бандажей колес (дорожного покрытия и шин).

#### Контрольные вопросы

- 1 Объясните, что такое боксование и юз.
- 2 Объясните процессы, возникающие при взаимодействии колес с дорожным покрытием.
- 3 Объясните, что такое контактная площадка.
- 4 Охарактеризуйте, что понимают под зоной скольжения.
- 5 Объясните, почему коэффициент сцепления является одним из основных факторов, влияющих на эксплуатационные и технико-экономические показатели электрического транспорта.

Литература: [1] с.16-21

#### Практическая работа №1

Расчет сил тяги и торможения подвижным составом

#### Методические рекомендации

При проведении работы учащийся рассчитывает силы тяги и торможения подвижного состава, решает задачи по определению коэффициента инерции подвижного состава

#### Контрольные вопросы

- 1 Дайте понятие движущиеся колесные пары.
- 2 Сформулируйте понятия сил тяги и торможения.
- 3 Объясните разницу между сцепным, тормозным и полным весом подвижного состава.
- 4 Определите, чем отличаются буксование и юз друг от друга; какое явление опаснее; обоснуйте свой ответ примерами.

Литература: [1] с.22-25

#### Раздел 2 Характеристика тяговых электродвигателей

*Тема 2.1 Электромеханические характеристики на валу тяговых двигателей*

Электромеханические характеристики на валу якоря тягового двигателя: скоростная  $n(I)$ , вращающего момента  $M(I)$ , КПД  $\eta_d(I)$ .

#### Методические рекомендации

При изучении темы учащийся демонстрирует навыки по овладению методики расчета электромеханических характеристик на валу двигателя.

Электромеханическими характеристиками на валу электрического двигателя называются зависимости частоты вращения двигателя от тока, вращающего момента от тока и коэффициента полезного действия от тока при напряжении питания, равном номинальному.

В электроподвижном составе ГЭТ в основном применяются ДПТ последовательного, параллельного, смешанного и независимого возбуждения. Каждая система возбуждения обладает своими характерными особенностями, которые и определяют степень пригодности двигателя для той или иной цели.

Учащиеся должны уметь рассчитывать и строить электромеханические характеристики на валу двигателя.

#### Контрольные вопросы

1 Охарактеризуйте режим работы подвижного состава при движении его под током.

2 Объясните, что такое электродвижущая сила и как она определяется.

Литература: [1] с.27-35

#### *Тема 2.2 Электромеханические характеристики на обode движущего колеса*

Электромеханические характеристики на обode движущего колеса: зависимости скорости  $v$ , силы тяги  $F$  и КПД от тока. Соотношения, используемые для перехода от электромеханических характеристик на валу тягового двигателя к характеристикам на обode колеса.

Характеристики двигателей последовательного возбуждения (принцип их построения).

Характеристики двигателя параллельного возбуждения. режим рекуперативным торможением.

Характеристики двигателя согласно-смешанного и встречно-смешанного возбуждения.

#### Методические рекомендации

При изучении темы учащийся выявляет различие между электромеханическими характеристиками на валу и на обode колеса, рассчитывает электромеханические характеристики на обode колеса; описывает принципы

построения характеристик ДПТ последовательного возбуждения описывает характеристики ДПТ параллельного возбуждения; выявляет различие между характеристиками двигателей различного возбуждения; строит характеристики ДПТ смешанного возбуждения

Зависимости скорости, силы тяги и КПД двигателя с учетом потерь энергии в передаче от тока двигателя называются электромеханическими характеристиками на обode движущего колеса.

Учащиеся должны научиться отличать характеристики разных способов возбуждения двигателей.

У двигателей последовательного возбуждения магнитодвижущая сила (МДС) пропорциональна току якоря  $I$ . Поэтому зависимость  $C\Phi(I)$  близка по форме к зависимости магнитного потока  $\Phi(I_b)$ , снятой при независимом возбуждении и отсутствии нагрузки.

У двигателя параллельного возбуждения обмотку возбуждения к сети подключают через регулируемый реостат. Ток возбуждения пропорционален приложенному напряжению, следовательно, МДС не зависит от тока якоря. С увеличением тока якоря  $I$  магнитный поток  $C\Phi$  незначительно уменьшается из-за размагничивающего действия реакции якоря. Скоростная характеристика  $v(I)$  жесткая, т.е. скорость почти не зависит от нагрузки. С увеличением нагрузки скорость только незначительно уменьшается вследствие увеличения падения напряжения в цепи двигателя  $I_r$ .

Характеристика электромагнитной силы тяги  $F_{эм}(I)$  изображается прямой линией, проходящей через начало координат, т.к. магнитный поток практически постоянен. Сила тяги отличается от электромагнитной силы на значение потерь  $\Delta F$  и пересекает ось абсцисс при токе  $X X I_x$ .

Если приложить к ПС внешнюю силу, направленную по движению, то скорость ПС и ЭДС начнут увеличиваться. При некоторой скорости, равной  $v_0$ , ЭДС двигателя станет равной приложенному напряжению  $U_d$ . Ток в двигателе станет равным нулю. При дальнейшем увеличении скорости ЭДС станет больше приложенного напряжения, и ток в двигателе изменит свое направление.

Т.к. направление магнитного потока при этом не изменится, то сила тяги тоже изменит свой знак и будет направлена против движения, следовательно, станет тормозной силой. Тяговый двигатель при этом автоматически перейдет в генераторный режим и будет отдавать энергию в тяговую сеть.

Такой режим называется *рекуперативным торможением*. При этом двигатели будут тормозить ПС, одновременно возвращая электрическую энергию в питающую сеть.

При изучение данной темы учащиеся должны научиться рассчитывать и строить электромеханические характеристики на обode колеса.

### Контрольные вопросы

1 Объясните почему для одного и того же тягового двигателя возможны различные электромеханические характеристики на обode колеса.

2 Охарактеризуйте систему возбуждения двигателя, обладающую неустойчивой механической характеристикой.

3 Объясните, как определяется КПД двигателя.

4 Объясните, двигатель какого возбуждения может автоматически переходить в генераторный режим.

Литература: [1] с.55-70

Практическая работа №2

Расчёт электромеханических характеристик тяговых двигателей

Методические рекомендации

В результате выполнения работы учащийся рассчитывает и строит электромеханические характеристики двигателя

Контрольные вопросы

1 Сформулируйте понятия электромеханические характеристики.

2 Объясните, почему для одного и того же тягового двигателя возможны различные электромеханические характеристики на обode колеса.

3 Объясните какой тип двигателя имеет жёсткие тяговые характеристики.

4 Обоснуйте, как определяется к.п.д. двигателя.

5 Определите двигатель какого возбуждения может автоматически переходить в генераторный режим.

Литература: [1] с.64-73

*Тема 2.3 Тяговые характеристики электроподвижного состава*

Тяговые характеристики двигателей различных систем возбуждения. Коэффициентом жесткости. Жесткие и мягкие характеристики.

Методические рекомендации

При изучении темы учащийся раскрывает понятие мягких и жёстких тяговых характеристик объясняет различие между тяговыми характеристиками.

Зависимость между силой тяги подвижного состава и его скоростью на той или иной ступени регулирования и соответствующих ей параметрах схемы включения двигателя называется тяговой характеристикой подвижного состава.

Тяговую характеристику строят на основании электромеханических характеристик двигателя на обode колеса. Необходимо строить эти характеристики для всех ступеней регулирования, применяемых на данном ПС.

Тяговые характеристики могут иметь различный вид в зависимости от типа двигателей и системы тяги. На практике в основном используются падающие тяговые характеристики, т.е. с увеличением скорости сила тяги снижается. Но степень ее снижения может быть различна у разных двигателей. Она характеризуется коэффициентом жесткости.

Характеристики, у которых сила тяги резко снижается с увеличением скорости, т.е. с высоким коэффициентом жесткости ( $dF/dt \rightarrow \infty$ ), называются жесткими. Жесткой характеристикой обладает двигатель постоянного тока параллельного возбуждения. Характеристики, у которых скорость резко изменяется с изменением силы тяги, т.е. с низким коэффициентом жесткости  $dF/dt \rightarrow 0$ , называются мягкими. К ним относятся характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. В большинстве случаев для целей тяги наиболее благоприятными являются мягкие тяговые характеристики.

Наибольшая допустимая нагрузка тягового двигателя ограничивается его механической прочностью, устойчивой коммутацией и опрокидывающим моментом. Для каждого двигателя при определенной схеме его включения установлен наибольший допустимый ток  $I_{п\ max}$ , выше которого двигатель нагружать нельзя. Этому току соответствует максимальная сила тяги  $F_{л\ max}$ .

Тяговые характеристики имеют ограничение также по наибольшей допустимой скорости движения, которая является конструкционной скоростью  $v_{констр}$ . Эта скорость определяется прочностью тягового двигателя и конструктивными качествами всего подвижного состава.

В тяговой характеристике двигателя последовательного возбуждения в зоне малых скоростей сила тяги при увеличении скорости резко падает. При дальнейшем увеличении скорости сила тяги изменяется незначительно, т.е. тяговая характеристика становится мягкой.

Тяговая характеристика двигателя параллельного возбуждения жесткая и близка к прямой линии.

### **Контрольные вопросы**

1 Охарактеризуйте тип двигателя, имеющий жесткие тяговые характеристики.

2 Объясните, какой тяговой характеристикой должен обладать двигатель, чтобы ПС не боксовал.

3 Перечислите, какими тяговыми характеристиками должны обладать тяговые двигатели, если их установлено на ПС несколько.

Литература: [1] с.71-72

## Тема 2.4 Сравнение двигателей различных систем возбуждения

Требования, предъявляемые к тяговым двигателям. Допущения, применяемые при анализе электрической устойчивости работы тяговых двигателей. Диаграммы напряжений  $U_d$ , ЭДС СФ $\upsilon$  и падений напряжения для двигателей (последовательного, параллельного, и встречно – смешанного) возбуждения. Анализ электрической устойчивости на примере двигателя последовательного возбуждения.

Анализ механической устойчивости ПС по тяговым характеристикам  $F_d(v)$  для двигателей последовательного параллельного, согласно-смешанного и встречно-смешанного возбуждения. Распределение нагрузок.

Устойчивость коммутации. Регулирование скорости Регулирование скорости и рекуперация. Конструктивные показатели и оценка двигателей. Сравнения тяговых двигателей по требованиям, предъявляемым к тяговым двигателям.

### Методические рекомендации

При изучении данной темы учащийся сравнивает диаграмма напряжений различных систем возбуждения; оценивает электрическую устойчивость при различных системах возбуждения; анализирует тяговые характеристики различных систем возбуждения, сравнивает скоростные характеристики двигателей; сравнивает двигатели, выявляет двигатель с наилучшими показателями, комментирует требования, предъявляемые к ТД.

При изучении данной темы учащиеся должны знать требования, предъявляемые к тяговым двигателям:

- электрическая устойчивость, т.е. способность автоматически стремиться к состоянию электрического равновесия при переходе с одного режима на другой;
- механическая устойчивость, т.е. способность автоматически приближаться к состоянию динамического равновесия;
- равномерное распределение нагрузок между параллельно работающими двигателями;
- максимальное использование сцепного веса;
- устойчивость коммутации;
- наименьшее воздействие на энергосистему;
- возможность плавного регулирования скорости и применения рекуперации;
- простота конструкции.
- Анализ электрической устойчивости работы тяговых двигателей проводится при следующих допущениях:
  - пренебрегаем вихревыми токами, возникающими в двигателе;
  - рассматриваем только силовую цепь двигателя и считаем, что при случайных отклонениях от состояния равновесия в силовой цепи токи в параллельных ветвях остаются неизменными.

Разница электромеханических характеристик двигателей одного и того же типа приводит к тому, что скорости двигателей при одном и том же значении момента неодинаковы.

Эти различия характеристик приводят к неравномерному распределению нагрузок между двигателями и, как следствие этого, неодинаковому потреблению токов.

С точки зрения системы электроснабжения наиболее предпочтительными являются мягкие характеристики.

Регулирование скорости и рекуперация. С этой точки зрения двигатели параллельного и согласно-смешанного возбуждения имеют преимущества по сравнению с двигателем последовательного возбуждения. Одним из основных преимуществ этих двигателей является автоматический переход в генераторный режим, что позволяет легко осуществлять рекуперативное торможение.

Конструктивные показатели и оценка двигателей. В этом отношении двигатели последовательного возбуждения, имеющие простую обмотку возбуждения из обмоточной меди с большой площадью сечения, обладают значительными преимуществами по сравнению с двигателями параллельного и согласно-смешанного возбуждения, у которых параллельная обмотка, имеющая много витков из провода малой мощности сечения, ненадежна как в механическом, так и в электрическом отношении. Наличие параллельной обмотки в сою очередь приводит к увеличению габаритов и усложнению конструкции двигателя.

В результате сравнения двигателей различных систем возбуждения наиболее полно удовлетворяют условиям электрической тяги двигателя последовательного возбуждения. На трамваях и троллейбусах нашли применение двигатели согласно-смешанного возбуждения благодаря возможности простого регулирования скорости в широких пределах, а также простоте осуществления рекуперативного торможения. Двигатели параллельного возбуждения в электрической тяге используются редко.

При применении двигателей независимого возбуждения, получающих питание от управляемого тиристорного преобразователя, возможно получение любых характеристик – мягких или жестких. Недостатком такой системы является установка относительно мощного тиристорного преобразователя, обеспечивающего необходимую форсировку по току двигателя в переходных режимах.

#### Контрольные вопросы

1 Объясните при каких допущениях проводится анализ электрической устойчивости.

2 Охарактеризуйте различие характеристик двигателей, установленных на одном и том же подвижном составе.

Литература: [1] с.73-80



## Раздел 3 Пуск и регулирование скорости подвижного состава.

### Тема 3.1 Способы пуска подвижного состава

Выбор параметров пускового периода Условия пуска тягового двигателя. Системы пуска. Плавный и ступенчатый реостатный пуск. Выбор пускового тока.

Допущения, применяемые при рассмотрении процесса пуска для одного двигателя. Энергетика пуска подвижного состава.

#### Методические рекомендации

При изучении данной темы учащийся оценивает системы пуска ПС; обобщает знания о плавном реостатном пуске и о ступенчатом пуске; объясняет диаграмму мощности для одного двигателя и при перегруппировки двигателя в процессе пуска.

Учитывая, что для электрического городского подвижного состава характерны частые остановки с последующими пусками, параметры пускового периода необходимо выбирать так, чтобы обеспечивались наиболее экономичные и безопасные условия его работы.

При изучении данной темы учащиеся должны знать (и уметь обосновать целесообразность применения той или иной) системы пуска:

- плавный реостатный пуск, при котором в течение всего времени пуска поддерживается неизменный пусковой ток;
- ступенчатый реостатный пуск;
- безреостатный пуск, который осуществляется с помощью импульсных преобразователей.

При плавном реостатном пуске последовательно с двигателем включается пусковой реостат. Для поддержания неизменным пускового тока необходимо плавно выводить пусковой реостат по мере увеличения скорости.

Плавным регулированием сопротивления пускового реостата обладают системы пуска с многокулачковыми или коллекторными контроллерами, с угольными реостатами. Т.к. плавное регулирование пускового реостата связано с усложнением системы управления, то на электроподвижном составе применяется ступенчатое выведение пускового реостата.

При ступенчатом реостатном способе пуска уже невозможно поддерживать постоянным пусковой ток  $I_{п}$ , а, следовательно, пусковое ускорение  $a_{п}$  и пусковую силу тяги  $F_{п}$ . Они будут изменяться в некоторых пределах от максимума до минимума. Во время разгона ПС на какой-либо ступени реостата с неизменным сопротивлением ток начнет уменьшаться, т.к. будет возрастать ЭДС по характеристике, соответствующей данной ступени реостата. В момент выключения ступени реостата происходит переход с одной скоростной характеристики на другую, которая соответствует меньшему значению сопротивления пускового реостата. В результате этого резко возрастает ток двигателя.

При изучении данной темы учащиеся должны рассмотреть процесс пуска для одного двигателя при постоянном пусковом токе и следующих допущениях:

- магнитные и механические потери в двигателе малы и ими можно пренебречь,
- сопротивление движению при пуске постоянно.

#### Контрольные вопросы

- 1 Объясните, почему необходимо включать пусковой реостат.
- 2 Перечислите системы пуска тягового двигателя.
- 3 Объясните, как выбрать значение расчетного пускового тока.
- 4 Перечислите способы уменьшения потерь в пусковых реостатах вы знаете.

Литература: [1] с.80-90

#### *Тема 3.2 Регулирование скорости*

Способы регулирования скорости тягового двигателя: изменением напряжения на зажимах двигателя  $U_d$ , включением последовательно с двигателями регулируемого резистора сопротивлением  $R$ , изменением магнитного потока  $C\Phi$ .

#### Методические рекомендации

При изучении данной темы учащийся сравнивает различные способы регулирования скорости, комментирует каждый из них.

Скорость двигателя можно регулировать тремя способами:

1. Изменением напряжения на зажимах двигателя;
2. Включением последовательно с двигателями регулируемого резистора сопротивлением;
3. Изменением магнитного потока.

Изменение напряжения на зажимах тягового двигателя при заданном напряжении контактной сети можно осуществить различными путями. На ГЭТ нашли применение переключения тяговых двигателей с последовательного на параллельное соединение; использование импульсного регулирования.

Последовательно-параллельное переключение тяговых двигателей – достаточно экономичный способ и не требует сложного дополнительного оборудования. Однако он обладает следующими недостатками:

- отсутствие плавного регулирования скорости,
- наличие значительного числа коммутационной аппаратуры,
- при последовательном соединении двигателей – мягкие тяговые характеристики, что способствует боксованию.

В настоящее время применяются способы регулирования напряжения с помощью статических полупроводниковых преобразователей на ПС. Наиболее целесообразным является использование тиристорных импульсных регуляторов. В этом случае напряжение контактной сети прикладывается к импульсному регулятору, на выходе которого получается регулируемое в широких пределах напряжение, которое подводится к тяговым двигателям.

При изучении темы необходимо научиться рассчитывать характеристики двигателей при изменении сопротивления реостата.

#### Контрольные вопросы

1 Охарактеризуйте переключения тяговых двигателей нашли применение на городском электрическом транспорте.

2 Объясните, как увеличивается напряжение, приложенное к двигателю, при последовательно-параллельном соединении двигателей.

Литература: [1] с.90-101

#### *Тема 3.3 Характеристики двигателей при изменении напряжения*

Характеристики двигателей при изменении сопротивления реостата: достоинства и недостатки

#### Методические рекомендации

При изучении данной темы учащийся выводит и строит электромеханические характеристики при изменении сопротивления.

Если для двигателей последовательного возбуждения имеются характеристики при номинальном напряжении, их можно пересчитать на другое напряжение. Для этого необходимо иметь характеристику зависимости магнитного потока от тока.

При регулировании напряжения на зажимах двигателя смешанного возбуждения пересчет характеристик производится таким же способом, как и у двигателей последовательного возбуждения, если ток в параллельной обмотке возбуждения не изменяется.

Учащийся должен знать, что такой способ для длительного регулирования скорости применяется редко, т.к. он обладает существенными недостатками:

- Значительные потери энергии в реостате,
- Скоростные характеристики получаются мягкими, что увеличивает вероятность возникновения боксования.

Как правило, такой способ регулирования применяется в сочетании с перегруппировкой двигателей.

#### Контрольные вопросы

1 Охарактеризуйте влияние на регулирование скорости включения последовательно с тяговым двигателем регулируемого реостата.

2 Объясните, как изменяется падение напряжения на сопротивлении реостата по мере возрастания нагрузки.

3 Перечислите, какими недостатками обладает данный способ регулирования скорости.

Литература: [1] с.102-103

### *Тема 3.4 Характеристики двигателей при изменении возбуждения*

Способы изменения возбуждения у двигателей последовательного возбуждения.

#### Методические рекомендации

При изучении данной темы учащийся анализирует каждый способ изменения возбуждения, определяет их достоинство и недостатки.

У двигателей последовательного возбуждения изменение возбуждения можно осуществить различными способами:

- шунтированием обмотки возбуждения;
- секционированием обмотки возбуждения;
- регулирования возбуждения с помощью специального возбудителя;
- импульсным регулированием возбуждения.

У двигателей смешанного возбуждения регулирование возбуждения осуществляется изменением тока возбуждения параллельной обмотки.

При изучении данной темы учащиеся должны научиться рассчитывать скоростную характеристику при регулировании возбуждения, исходя из формулы

$$v' = (U_d - I r') / C \Phi'$$

где  $v'$  - скорость при измененном возбуждении и токе якоря  $I$ ;

$r'$  - полное сопротивление двигателя при измененном возбуждении;

#### Контрольные вопросы

1 Проанализируйте, можно ли путем возбуждения магнитного потока осуществлять пуск тяговых двигателей.

2 Объясните, что определяет коэффициент регулирования возбуждения.

3 Охарактеризуйте, почему сила тяги при изменении напряжения не изменяется.

Литература: [1] с.102-103

### *Тема 3.5 Тиристорно-импульсное управление тяговыми двигателями*

Принцип импульсного управления. Коэффициент заполнения импульсов. Принцип работы широтно – импульсного ключа. Ограничения, накладываемые на внешние характеристики в режиме тяги.

#### Методические рекомендации

При изучении темы учащийся объясняет принцип импульсного управления, описывает варианты импульсного управления; оценивает принцип действия схемы широтно – импульсного ключа; производит постарение тяговых характеристик ПС при применении импульсного регулятора.

При импульсном управлении энергия подводится к тяговым двигателям и накопительным элементам в виде отдельных импульсов. В промежутки времени между импульсами энергия в тяговые двигатели поступает от накопительных элементов, в качестве которых используются катушки индуктивности и конденсаторы.

Учащиеся должны знать, какие бывают варианты импульсного управления:

- а) период постоянный, изменяется время проводящего состояния ключа. Такое управление называется широтно-импульсным;
- б) время проводящего состояния ключа остается постоянным, изменяется период. Такое управление называется частотно-импульсным;
- в) изменяются время проводящего состояния ключа и период. Такое управление называется смешанным.

Для обеспечения работоспособности схем импульсного управления необходимо, чтобы:

- источник питания был безиндуктивным;
- ключ работал с большой частотой;
- ключ обладал способностью коммутировать большие токи.

При изучении данной темы учащимся необходимо научиться объяснять принцип работы широтно-импульсного ключа.

#### Контрольные вопросы

1 Перечислите варианты импульсного управления тяговыми двигателями.

2 Охарактеризуйте принцип работы широтно-импульсного тиристорного ключа.

3 Объясните, что такое коэффициент заполнения импульсов.

4 Опишите назначение вспомогательного тиристора в схеме широтно-импульсного тиристорного ключа.

Литература: [1] с.103-113

## Раздел 4 Торможение подвижного состава

### Тема 4.1 Системы торможения

Виды торможения по характеру использования тормозной силы. Сущность и значение торможения. Системы торможения

#### Методические рекомендации

При изучении темы учащийся должны давать понятие сущности и значению торможения, сформировать понятия о системах торможения.

Торможение применяется для остановки подвижного состава и ограничения его скорости на спусках, перед кривыми участками и соответствующими путевыми знаками. По характеру использования тормозной силы различают служебное торможение и экстренное.

Процесс торможения определяется тормозными характеристиками, т.е. зависимостями тормозной силы подвижного состава от его скорости.

По способу создания тормозной силы различают системы *механического* и *электрического* торможения. При механическом торможении тормозная сила создается в результате сил трения между соприкасающимися взаимно скользящими поверхностями.

При электрическом торможении тяговые двигатели переводятся в генераторный режим. Момент, который требуется для вращения генератора, реализуется на ободу движущего колеса в виде тормозной силы. Различают электрическое рекуперативное и реостатное торможения.

Процесс торможения должен быть очень надежным, поэтому каждый тип подвижного состава оборудуется, как минимум двумя независимыми друг от друга системами тормозов.

#### Контрольные вопросы

- 1Объясните, что такое служебное и экстренное торможение.
- 2Перечислите системы торможения.
- 3Охарактеризуйте системы торможения, которыми оборудуется подвижной состав.

Литература: [1] с.114-116

### Тема 4.2 Рекуперативное торможение

Рекуперативное торможение для двигателей различных систем возбуждения

#### Методические рекомендации

При изучении темы учащиеся должны научиться выводить и строить зависимости магнитного потока от тока регулирования.

При рекуперативном торможении тяговые двигатели работают в генераторном режиме, при этом вырабатываемая ими энергия отдается обратно в тяговую сеть. Эта энергия может быть использована поездами, находящимися на линии, или возвращена в первичную сеть. Рекуперативное торможение применяется как для торможения на спусках, так и для остановки подвижного состава, хотя последнее связано с определенными техническими трудностями.

Для осуществления рекуперативного торможения необходимо, чтобы сумма ЭДС тяговых двигателей в генераторном режиме при последовательном их соединении была выше напряжения контактной сети.

Характеристики рекуперативного торможения могут быть построены, если известна зависимость магнитного потока от тока рекуперации. Указанная зависимость для каждой системы возбуждения двигателей постоянного тока имеет свой характер.

При изучении данной темы учащиеся должны знать различия торможения при двигателях последовательного, независимого и смешанного возбуждения.

#### Контрольные вопросы

1 Объясните причину невозможности применения двигателя с последовательной системой возбуждения для рекуперативного торможения.

2 Охарактеризуйте, к чему приводит жесткость характеристик двигателя независимого возбуждения.

3 Объясните, что необходимо, чтобы система была электрически устойчивой.

Литература: [1] с.137-139

#### *Тема 4.3 Реостатное торможение*

Реостатное торможение для двигателей последовательного возбуждения  
Электрическая устойчивость  
Зависимости процессов самовозбуждения.  
Система следящего выбега.

Характеристики реостатного торможения. Ограничение тормозных характеристик: по наибольшему тормозному току  $I_{\text{тmax}}$ ,

по наибольшей скорости  $v_{\text{max}}$ , по наибольшему допустимому напряжению на коллекторе тягового двигателя  $U_{\text{доп}}$ .

#### Методические рекомендации

При изучении темы учащиеся должны изучить процессы самовозбуждения, происходящие в двигателе, научить определять является ли реостатное

торможение для определенного двигателя электрическим устойчивым; обучить расчёту характеристик реостатного торможения; научить рассматривать ограничения для скоростных характеристик.

При реостатном торможении тяговые двигатели отключаются от контактной сети и замыкаются на тормозные реостаты. При этом механическая энергия движущегося подвижного состава сначала превращается в электрическую, а затем выделяется в виде тепла в тормозных реостатах.

Учащиеся должны ознакомиться с ограничениями скоростных характеристик реостатного торможения для различных ступеней тормозного реостата:

- 4) по наибольшему тормозному току,
- 5) по наибольшей скорости,
- 6) по наибольшему допустимому напряжению на коллекторе тягового двигателя.

Достоинства тормозной характеристики двигателя встречно-смешанного возбуждения:

- при торможении в широком диапазоне скоростей тормозное усилие практически постоянно, поэтому не требуется большое число ступеней реостата, а следовательно, и аппаратов управления,
- обеспечивается устойчивость параллельной работы нескольких двигателей при равномерном распределении нагрузок между ними.

#### Контрольные вопросы

1 Сформулируйте основные условия при применении двигателей последовательного возбуждения, чтобы возникло реостатное торможение.

2 Объясните, является ли реостатное торможение генератора последовательного возбуждения электрически устойчивым.

3 Охарактеризуйте, что такое критическое сопротивление и критическая скорость.

4 Объясните, какие ограничения имеют скоростные характеристики реостатного торможения для различных ступеней тормозного реостата.

5 Приведите достоинства тормозной характеристики двигателя смешанного возбуждения.

Литература: [1] с.140-141

Практическая работа №3

Расчет и построение графиков допустимой скорости движения

Методические рекомендации

В результате выполнения работы учащиеся должны рассчитать и построить графики допустимой скорости движения троллейбуса.



## Контрольные вопросы

- 1 Дать понятие тормозной путь и объясните от чего он зависит.
- 2 Приведите варианты решения тормозных задач.
- 3 Объясните принцип реостатного торможения тягового двигателя
- 4 Опишите системы торможения подвижного состава.
- 5 Начертите зависимости при реостатном торможение для двигателей смешанного возбуждения; приведите основные соотношения.

Литература: [1] с.136-137

## Практическая работа №4

Расчет удельной действующей тормозной силы подвижного состава методом графической интерполяции

### Методические рекомендации

В результате выполнения работы учащиеся должны по заданным пути, скорости и уклону найти удельную действующую тормозную силу подвижного состава используя способ графической интерполяции.

## Контрольные вопросы

- 1 Опишите принцип рекуперативного торможения тягового двигателя.
- 2 Объясните зависимость процесса самовозбуждения от сопротивления тормозного реостата.
- 3 Начертите схему и характеристики рекуперативного торможения двигателя встречно-смешанного возбуждения.
- 4 Опишите зависимость процесса самовозбуждения от скорости.
- 5 Объясните, какие ограничения тормозных характеристик бывают.

## Практическая работа №5

### Расчет тормозного пути

### Методические рекомендации

В результате выполнения работы учащиеся должны по скорости, тормозному коэффициенту, и уклону найти тормозной путь

## Контрольные вопросы

1 Начертите зависимости при рекуперативно-реостатном торможении для двигателей смешанного возбуждения; приведите основные соотношения.

2 Начертите зависимости при рекуперативно-реостатном торможении для двигателей последовательного возбуждения; приведите основные соотношения.

3 Приведите основные соотношения для расчёта характеристик реостатного торможения.

4 Опишите электрическую устойчивость при реостатном торможении.

5 Объясните, двигатель какого возбуждения может автоматически переходить в генераторный режим.

#### *Тема 4.4 Рекуперативно-реостатное торможение*

Схемы рекуперативно-реостатного торможения для двигателей различных систем возбуждения

#### Методические рекомендации

При изучении темы учащиеся должны сформировать знания о характеристиках рекуперативно-реостатного торможения.

При рекуперативном торможении с контактными системами управления нельзя тормозить до низких скоростей движения. Это торможение также требует наличия либо потребителей электрической энергии в контактной сети, либо инверторных или поглощающих устройств на тяговых подстанциях. При чисто реостатном торможении вся тормозная энергия превращается в тепло в реостатах, т.е. бесполезно теряется. Реостатное торможение позволяет тормозить практически до полной остановки. Поэтому на практике целесообразно объединение обеих систем в одну: при высоких скоростях использовать рекуперативное торможение, а при низких скоростях и уменьшении эффективности рекуперативного торможения производить переход на реостатное торможение. Замещение рекуперативного торможения реостатным производится и при исчезновении потребителей энергии в тяговой сети, что увеличивает надёжность электрического торможения. Замещение одного вида торможения другим должно происходить без потери тормозной силы.

Система рекуперативно-реостатного торможения применяется на троллейбусах и трамвайных вагонах при двигателях смешанного возбуждения.

#### Контрольные вопросы

1 Объясните, почему возрастает масса тормозных резисторов по сравнению с пусковыми.

2 Перечислите достоинства рекуперативно-реостатного торможения.

3 Расскажите, где применяется система рекуперативно-реостатного торможения.

Литература: [1] с.142-143

### 3 Задание для домашней контрольной работы

Заданием для домашней контрольной работы являются вопросы по учебной дисциплине «Электрическая тяга». Вопросы для каждого варианта контрольной работы подобраны из основных разделов дисциплины и меняются в произвольном порядке. Контрольная работа состоит из двух теоретических вопросов (1-44) и задачи (45-64). При решении задач рекомендуется использовать приложение А.

Каждый учащийся выполняет вариант контрольной работы в зависимости от присвоенного ему шифра в соответствии с таблицей 2.

Объем рукописного текста контрольной работы должен быть не более 7-12 листов ученической тетради. При выполнении контрольной работы следует пользоваться рекомендуемой литературой. Дословное переписывание текста книг, сборников, справочников и другой литературы запрещается.

Тетрадь с выполненной в ней контрольной работой должна иметь пронумерованные страницы, выписанные вопросы задания и ответы на них, необходимые рисунки, таблицы, список литературы, а конце работы подпись и дату.

Таблица 2 – Задания для контрольной работы

№ варианта	Вопрос 1	Вопрос 2	Вопрос 3
1	2	3	4
1	1	40	46
2	2	21	47
3	3	22	48
4	4	23	49
5	5	24	50
6	6	25	51
7	7	26	52
8	8	27	56
9	9	28	53
10	10	29	54
11	11	30	55
12	12	31	57
13	13	39	58
14	14	32	59
15	15	38	60
16	16	33	61
17	17	37	62
18	19	34	63
19	20	36	64
20	6	35	45
21	5	21	59

22	4	25	58
23	3	22	57
24	2	24	56
25	1	23	55
26	7	40	54
27	8	31	53
28	9	42	52
29	10	43	51
30	20	37	50
31	19	23	61
32	11	33	61
33	12	26	63
34	13	29	64
35	17	38	45
36	18	33	46
37	14	24	48
38	15	21	47
39	16	24	49
40	11	32	45
41	9	24	63
42	1	29	50
43	2	38	59
44	8	29	51
45	7	37	58
46	3	25	52
47	4	23	57
48	6	21	53
49	5	31	56
50	20	29	54
51	19	42	55
52	11	38	45
53	12	24	46
54	13	37	48
55	16	25	47
56	17	36	53
57	3	44	56
58	8	40	54
59	9	41	57
60	12	41	56
61	19	43	55
62	14	35	54
63	15	39	49
64	18	38	65

65	4	37	63
66	20	36	50
67	7	35	59
68	9	34	60
69	11	33	61
70	3	32	62
71	10	31	63
72	4	30	64
73	18	21	46
74	13	22	57
75	2	23	56
76	3	24	55
77	4	25	54
78	9	26	46
79	14	25	47
80	13	26	48
81	16	28	49
82	18	27	50
83	1	29	51
84	11	31	47
85	12	39	49
86	5	35	58
87	9	34	59
88	1	30	60
89	19	32	61
90	3	31	62
91	2	33	63
92	7	39	46
93	8	36	48
94	4	37	47
95	5	32	53
96	15	44	56
97	16	43	54
98	18	42	57
99	20	41	45
100	13	40	63

### Перечень вопросов к домашней контрольной работе

- 1 Выведите уравнение движения подвижного состава.
- 2 Объясните, что такое коэффициент инерции вращающихся частей, охарактеризуйте, какими методами он определяется.
- 3 Объясните процесс образования и ограничения силы тяги.

- 4 Объясните процесс образования и ограничения тормозной силы.
- 5 Объясните физические процессы образования силы сцепления. Объясните, что такое коэффициент сцепления.
- 6 Приведите схему плавного реостатного пуска двигателя и объясните принцип ее работы.
- 7 Приведите последовательность расчёта характеристик при изменении сопротивления реостата.
- 8 Объясните, что такое шунтирование обмотки возбуждения. Приведите основные понятия и соотношения.
- 9 Объясните, что такое секционирование обмотки возбуждения. Приведите основные понятия и соотношения.
- 10 Опишите схему регулирования возбуждения с помощью специального возбудителя.
- 11 Опишите рекуперативное торможение при двигателях независимого возбуждения.
- 12 Опишите реостатное торможение при двигателях последовательного возбуждения.
- 13 Опишите электрическую устойчивость при реостатном торможении.
- 14 Объясните зависимость процесса самовозбуждения от сопротивления тормозного реостата.
- 15 Объясните зависимость процесса самовозбуждения от скорости.
- 16 Приведите классификация городского электрического транспорта.
- 17 Объясните применение уравнения движения подвижного состава.
- 18 Начертите электромеханические характеристики двигателей последовательного возбуждения. Приведите основные соотношения.
- 19 Начертите электромеханические характеристики двигателей параллельного возбуждения. Приведите основные соотношения.
- 20 Начертите электромеханические характеристики двигателей согласо-смешанного возбуждения. Приведите основные соотношения.
- 21 Объясните процесс возникновения электрической устойчивости подвижного состава.
- 22 Объясните, что такое устойчивость коммутации. Приведите основные понятия и соотношения.
- 23 Объясните, как происходит регулирование скорости тягового двигателя.
- 24 Начертите зависимости при рекуперативном торможении для двигателей последовательного возбуждения.
- 25 Выведите уравнения электромеханических характеристик на валу тягового двигателя.
- 26 Выведите уравнения электромеханических характеристик на обode колеса тягового двигателя.
- 27 Объясните, что такое тяговые характеристики подвижного состава? Приведите основные понятия и соотношения.
- 28 Опишите требования, предъявляемые к тяговому двигателю (с примерами).

- 29 Опишите механическую устойчивость подвижного состава для двигателей различных систем возбуждения.
- 30 Сравните двигатели различных систем возбуждения, исходя из требований, предъявляемым к тяговым двигателям, по всем показателям.
- 31 Объясните, какие бывают условия и системы пуска. Приведите примеры.
- 32 Объясните явления, возникающие при ступенчатом пуске. Объясните, как выбрать значение расчетного пускового тока.
- 33 Рассмотрите процесс пуска для одного двигателя при постоянном пусковом токе.
- 34 Начертите схему и характеристики двигателей при изменении напряжения.
- 35 Объясните принцип импульсного управления.
- 36 Начертите схему широтно-импульсного ключа и объясните принцип ее работы.
- 37 Опишите системы торможения подвижного состава.
- 38 Начертите схему и характеристики рекуперативного торможения двигателя встречно-смешанного возбуждения.
- 39 Начертите схему и характеристики рекуперативного торможения двигателя независимого возбуждения.
- 40 Приведите основные соотношения для расчёта характеристик реостатного торможения.
- 41 Объясните, какие бывают ограничения тормозных характеристик.
- 42 Начертите зависимости при реостатном торможении для двигателей смешанного возбуждения; приведите основные соотношения.
- 43 Начертите зависимости при рекуперативно-реостатном торможении для двигателей смешанного возбуждения; приведите основные соотношения.
- 44 Начертите зависимости при рекуперативно-реостатном торможении для двигателей последовательного возбуждения; приведите основные соотношения.
- 45 Задача. Определить ограничение по сцеплению (наибольшую силу тяги), которую может развить трамвайный вагон АКСМ-60102
- 46 Задача. Определить ограничение по сцеплению (наибольшую силу тяги), которую может развить троллейбус типа АКСМ-201
- 47 Задача. Определить, какую необходимо приложить действующую силу  $F_d$  к троллейбусу типа АКСМ-213 для получения ускорения  $1,5\text{ м/с}^2$ , если его физическая масса  $9,29\text{ т}$ .
- 48 Задача. Определить ограничение по сцеплению (наибольшую силу тяги), которую может развить троллейбус типа АКСМ-201.
- 49 Задача. При движении трамвайного вагона АКСМ-60103 без пассажиров на затяжном подъеме сила тяги трамвая возросла до  $F=25\text{ кН}$ , а коэффициент сцепления на данном участке пути  $\psi = 0,1$ . Определить при каком коэффициенте сцепления возможно поступательное движение трамвая.
- 50 Задача. Определить ограничение по сцеплению (наибольшую силу тяги), которую может развить трамвайный вагон РВЗ-6М2.

51 Задача. Определить коэффициент инерции вращающихся частей трамвайного поезда, состоящего из моторного вагона массой 14 т и двух прицепных вагонов, каждый из которых имеет массу 11 т.

52 Задача. Определить ограничение по сцеплению (наибольшую допустимую по сцеплению тормозную силу) трамвайного вагона типа РВЗ - 6М2.

53 Задача. Определить наибольшую допустимую по сцеплению тормозную силу троллейбуса АКСМ-321.

54 Задача. Определить коэффициент инерции вращающихся частей прицепного четырехосного вагона, если его масса 12,9 т, а масса одной колесной пары 0,75т.

55 Задача. Определить ограничение по сцеплению (наибольшую силу тяги), которую может развить трамвайный вагон АКСМ-60103.

56 Задача. Определить коэффициент инерции вращающихся частей прицепного четырехосного вагона, если его масса  $m=13,8$ т, а масса одной колесной пары  $m_B=0,45$ т.

57 Задача. Определить коэффициент инерции вращающихся частей трамвайного поезда, состоящего из моторного вагона массой 18т и двух прицепных вагонов, каждый из которых имеет массу 9т.

58 Задача. Определить ограничение по сцеплению (наибольшую силу тяги), которую может развить троллейбус типа АКСМ-333.

59 Задача. Определить какую необходимо приложить действующую силу  $F_d$  к троллейбусу типа АКСМ-420 для получения ускорения  $0,9 \text{ м/с}^2$ , если его физическая масса  $m=7,32$ т.

60 Задача. При движении трамвайного вагона АКСМ-60103 без пассажиров на затяжном подъеме сила тяги трамвая возросла до  $F=23$ кН, а коэффициент сцепления на данном участке пути  $\psi = 0,12$ . Определить при каком коэффициенте сцепления возможно поступательное движение трамвая.

61 Задача. Определить коэффициент инерции вращающихся частей прицепного четырехосного вагона, если его масса 14,5т, а масса одной колесной пары 0,39т.

62 Задача. Определить коэффициент инерции вращающихся частей прицепного четырехосного вагона, если его масса 11,9т, а масса одной колесной пары 0,65т.

63 Задача. Определить, какую необходимо приложить действующую силу  $F_d$  к троллейбусу типа АКСМ-420 для получения ускорения  $1 \text{ м/с}^2$ , если его физическая масса 8.89 т.

64 Задача. При движении трамвайного вагона АКСМ-60102 без пассажиров на затяжном подъеме сила тяги трамвая возросла до  $F=21$ кН, а коэффициент сцепления на данном участке пути  $\psi = 0,19$ . Определить при каком коэффициенте сцепления возможно поступательное движение трамвая.



## 4 Методические рекомендации к выполнению домашней контрольной работы

### 4.1 Определение коэффициента инерции вращающихся частей.

Уравнение движения подвижного состава

$$m(1 + \gamma) \frac{dv}{dt} = F_d \quad \text{или} \quad m_{np} \frac{dv}{dt} = F_d \quad (4.1)$$

где  $m$  – масса подвижного состава,

$F_d$  – действующая сила.

На практике коэффициент инерции вращающихся частей  $(1 + \gamma)$  определяют, воспользовавшись выражением

$$m_{\text{Э}} = \sum \frac{J_d}{R_d^2} + \sum \frac{J_B}{R_B^2} + \sum \frac{J_{\text{я}}}{R_d^2} \mu^2, \quad (4.2)$$

где  $J_d$  – момент инерции движущихся колесных пар и ведущих мостов троллейбуса;

$J_B$  – момент инерции колесных пар прицепных вагонов и ведомых мостов троллейбуса;

$J_{\text{я}}$  – момент инерции якорей тяговых двигателей, включая части передачи, жестко связанные с валом двигателя;

$R_d$  – радиус движущихся колес,

$R_B$  – радиус колес прицепного вагона и ведомых мостов троллейбуса,

$\mu$  – передаточное число редуктора

Момент инерции  $J$  каждого тела, входящий в выражение (4.2), представим в виде произведения

$$I = m_{\text{ч}} \cdot g_{\text{ч}}^2 \quad (4.3)$$

где  $m_{\text{ч}}$  – масса вращающейся части,

$g_{\text{ч}}$  – радиус вращения вращающейся части.

Эквивалентная масса определяется по формуле

$$m_{\text{Э}} = \sum m_d \cdot \frac{g_d^2}{R_d^2} + \sum m_B \cdot \frac{g_B^2}{R_B^2} + \sum m_{\text{я}} \cdot \frac{g_{\text{я}}^2}{R_d^2} \cdot \mu^2 \quad (4.4)$$

где значение  $\gamma = \frac{m_{\text{Э}}}{m}$

При вычислении  $m_{\text{Э}}$  можно исходить из средних значений отношений радиусов инерции  $g$  к радиусам  $R$  внешних окружностей вращающихся частей.

Для движущихся и поддерживающих колесных пар и колес  $g/R$  равно 0,75 – 0,80;

для зубчатых колес 0,8;

для якорей тяговых двигателей 0,65 – 0,75.

При расчетах достаточную точность дают следующие значения  $(1 + \gamma)$  для подвижного состава различных типов:

Тип подвижного состава	Коэффициент (1+γ)
1. Трамвай:	
моторные вагоны	1,09 – 1,15
прицепные вагоны	1,05 – 1,08
2. Троллейбусы	1,15 – 1,20

Величину (1+γ) для подвижного состава, состоящего из моторных и прицепных вагонов, определяют как средневзвешенное значение по выражению

$$1 + \gamma = 1 + \frac{\sum_{i=1}^k m_i v_i}{\sum_{i=1}^k m_i} \quad (4.5)$$

где  $m_i$  масса  $i$ -ого однотипного вагон, у которого  $m_{\text{э}i} \neq m_i = \gamma_i$ ,

$k$  – число типов вагонов подвижного состава.

Коэффициент инерции вращающихся частей тем больше, чем меньше масса подвижного состава и больше число вращающихся частей, а также их размеры и, следовательно, масса. Коэффициент инерции двухосных вагонов меньше, чем четырехосных. Коэффициент инерции для любого подвижного состава с пассажирами меньше, чем без пассажиров.

#### 4.2 Определение потребной мощности тягового двигателя троллейбуса

Потребную максимальную мощность тягового двигателя определяют из уравнения тягового баланса троллейбуса

$$P \frac{v_{\max}}{3600 \cdot \eta_{\text{тр}} \left( g m \psi_d + \frac{K_B \cdot A_B \cdot v_{\max}^2}{3,6^2} \right)} \quad (4.6)$$

где  $v_{\max}$  – максимальная (конструкционная) скорость,

$\eta_{\text{тр}}$  – КПД трансмиссии ( $\eta_{\text{тр}}=0,85 - 0,90$ ),

$\psi_d$  – коэффициент сопротивления дороги ( $\psi_d=0,018 - 0,03$ ),

$m$  – масса подвижного состава с пассажирами,

$K_B \cdot A_B$  – фактор обтекаемости ( $K_B \cdot A_B = 2,625 - 3,375$ ).

Передаточное число моста

$$n_m = \frac{0,377 \cdot r_0 \cdot n_{\text{дв max}}}{v_{\max}} \quad (4.7)$$

где  $r_0$  – свободный радиус колеса,

$n_{\text{дв max}}$  – максимальное число оборотов тягового двигателя.

Режиму  $v_{\max}$  соответствует минимальный динамический фактор  $D_{\min}=0,05$ , следовательно, тяговый двигатель при этом работает на максимальных оборотах и развивает при этом минимальный крутящий момент

$$P = M_{\min} \quad (4.8)$$

Отсюда

$$M = \frac{P}{\omega_{\min}} \quad (4.9)$$

где  $\omega = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв max}}}{30}$  – угловая скорость вала,

$P$  – мощность двигателя, выбранная по каталогу.

#### 4.3 Расчет ограничения силы тяги

Силу сцепления определяют, как произведение силы нажатия  $G_k$  колеса на рельс и коэффициента сцепления  $\psi_k$  колеса с рельсом, т.е.

$$T_k = G_k \cdot \psi \quad (4.10)$$

Если измерять нажатие колеса на рельс  $G_k$  в килоньютонах, то чтобы получить силу сцепления  $T_k$  в ньютонах, в правую часть выражения (1.10) необходимо ввести коэффициент, равный 1000. Следовательно, сила сцепления, Н

$$T_k = 1000 \cdot G_k \cdot \psi_k \quad (4.11)$$

Тогда для всего подвижного состава

$$F_{\max} \leq 1000 \cdot G_{\text{сц}} \cdot \psi \quad \text{или} \quad F_{\max} \leq 1000 \cdot m_{\text{сц}} \cdot g \cdot \psi \quad (4.12)$$

где  $F_{\max}$  - наибольшая допустимая по условиям сцепления сила тяги, Н

$G_{\text{сц}} = m_{\text{сц}} \cdot g$  - сцепной вес (сумма сил нажатия всех движущих осей подвижного состава, кН);

$\psi$  - коэффициент сцепления,

$m_{\text{сц}}$  - сцепная масса, т,

$g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

#### 4.4 Расчет тормозной силы

Предельная сила сцепления подвижного состава при торможении равна произведению суммы нажатий всех тормозных колес  $G_T$  на коэффициент сцепления  $\psi$ .

$$T_{\text{пр}} = 1000 G_T \cdot \psi = 1000 \cdot m_T \cdot g \cdot \psi \quad (4.13)$$

Законы сцепления приближенно можно сформулировать:

2) наибольшая сила тяги не должна превосходить предельной силы сцепления

$$F_{\max} \leq T_{\text{пр}} \quad \text{или} \quad F_{\max} \leq 1000 \cdot m_{\text{сц}} \cdot g \cdot \psi$$

4) наибольшая тормозная сила не должна превосходить предельной силы сцепления

$$B_{\max} \leq T_{\text{пр}} \quad \text{или} \quad B_{\max} \leq 1000 \cdot m_T \cdot g \cdot \psi,$$

где  $B_{\max}$  - наибольшая допустимая суммарная тормозная сила, не вызывающая скольжения ни одной из тормозных осей.

5) если сила тяги подвижного состава  $F$  или тормозная сила  $B$  больше предельной силы сцепления  $T_{\text{пр}}$  нормальное движение состава невозможно (в режиме тяги возникает боксование, в режиме торможения - юз).

Коэффициент сцепления

В среднем расчетный коэффициент сцепления трамвая без индивидуального полотна за исключением дней листопада и гололеда принимается  $\psi_p = 0,15$ .

В средних условиях для тяговых расчетов можно принимать расчетный коэффициент сцепления троллейбуса

$$\psi_p = 0,3 - 0,35.$$

## Приложение А

Таблица 1 - Технические данные основных типов трамвайных вагонов

Параметры	АКСМ-60102	АКСМ-60103	РВ3-6М2
Длина кузова, мм	15270	15270	14080
Ширина кузова, мм	2500	2500	2596
Диаметр колеса, мм	710	710	700
Масса вагона (без пассажиров), кг	20000	20000	16500
Число мест для сидения	30	29	37
Вместимость при наполнении 8 чел/м <sup>2</sup>	211	159	197
Мощность, кВт	80x4(320)	50x4(200)	31x4(124)
Скорость, км/ч	62	100	64
Конструкционная скорость, км/ч	62	100	64
Тип тяговых двигателей	ДК-263Б		ДК-259
Число двигателей	4	4	4

Таблица 2 - Технические данные основных типов троллейбусов

Параметры	АКСМ-201	АКСМ-213	АКСМ-321	АКСМ-333	АКСМ-420
Длина кузова (по буферам), мм	12100	17906	11755	18380	11790
Ширина кузова (по обтекателям), мм	2510	2500	2500	2500	2500
Высота ненагруженного троллейбуса с опущенными токоприемниками, мм.	3050	3187	3666	3661	2862
Масса троллейбуса без пассажиров, кг	10515	16500	11100	16400	10900
Число пассажирских мест для сидения	25	41	26	44	29
Вместимость при максимальном наполнении, 8 чел/м <sup>2</sup>	109	168	115	160	104
Напряжение сети, В	550	550	550	550	550
Мощность, кВт	115	170	170	185	185
Ток, А	340	340	340	340	340
Конструкционная скорость, км/ч	60	55	60	55	60
Тип тяговых двигателей	Динамо ДК-213; Динамо ЕК-213	ДК-211 БМ	ДК-211БМ	ДК-263Б	SKODA ML 3550

## Примерный перечень вопросов по дисциплине

1. Дать понятие приведенной массе
2. Дать понятие коэффициента инерции вращающихся частей
3. Объясните влияние значения коэффициента инерции вращающихся частей на передаточное отношение редуктора
4. Объясните, почему у моторного вагона коэффициент инерции вращающихся частей больше, чем у прицепного
5. Объясните, почему коэффициент инерции вращающихся частей у ПС с пассажирами меньше, чем у подвижного состава без пассажиров
6. Дать понятие зависимостям кривым движения
7. Объясните разницу между сцепным, тормозным и полным весом ПС
8. Объясните, почему в режиме торможения выбирают меньшее значение коэффициента сцепления, нежели в режиме тяги
9. Объясните, почему необходимо включать пусковой резистор
10. Перечислите способы уменьшения потерь в пусковых реостатах
11. Раскройте, каким образом, путем изменения магнитного потока осуществлять пуск тяговых двигателей
12. Объясните, что определяет коэффициент регулирования $\beta$
13. Проанализируйте, почему сила тяги при изменении возбуждения не изменяется
14. Дать понятие коэффициента заполнения импульсов
15. Раскройте, для чего служит вспомогательный тиристор в схеме широтно-импульсного тиристорного ключа
16. Объясните, почему для одного и того же тягового двигателя возможны различные электромеханические характеристики на обode колеса
17. Объясните, какой тип двигателя имеет жесткие тяговые характеристики
18. Объясните, какой тяговой характеристикой должен обладать двигатель, чтобы ПС не буксовал
19. Объясните, какими тяговыми характеристиками должны обладать тяговые двигатели, если их установлено на ПС несколько
20. Проанализируйте, с какой системой возбуждения двигатель обладает неустойчивой механической характеристикой
21. Поясните, как определяется КПД двигателя
22. Объясните, двигатель какого возбуждения может автоматически переходить в генераторный режим
23. Опишите требования, предъявляемые к тяговому двигателю
24. Приведите схему плавного реостатного пуска двигателя и объясните принцип ее работы
25. Приведите последовательность расчёта характеристик при изменении сопротивления реостата
26. Объясните, что такое шунтирование обмотки возбуждения. Приведите основные понятия и соотношения

27. Объясните, что такое секционирование обмотки возбуждения. Приведите основные понятия и соотношения
28. Опишите схему регулирования возбуждения с помощью специального возбудителя
29. Опишите рекуперативное торможение при двигателях независимого возбуждения
30. Опишите реостатное торможение при двигателях последовательного возбуждения
31. Опишите электрическую устойчивость при реостатном торможении
32. Объясните зависимость процесса самовозбуждения от сопротивления тормозного реостата
33. Объясните зависимость процесса самовозбуждения от скорости
34. Приведите классификация городского электрического транспорта
35. Объясните применение уравнения движения подвижного состава
36. Начертите электромеханические характеристики двигателей последовательного возбуждения. Приведите основные соотношения
37. Начертите электромеханические характеристики двигателей параллельного возбуждения. Приведите основные соотношения
38. Начертите электромеханические характеристики двигателей согласно-смешанного возбуждения. Приведите основные соотношения
39. Объясните процесс возникновения электрической устойчивости подвижного состава
40. Объясните, что такое устойчивость коммутации. Приведите основные понятия и соотношения
41. Проанализируйте, как происходит регулирование скорости тягового двигателя
42. Начертите зависимости при рекуперативном торможение для двигателей последовательного возбуждения
43. Выведите уравнение движения подвижного состава
44. Объясните, что такое коэффициент инерции вращающихся частей, как он определяется
45. Объясните, как происходит образование и ограничение силы тяги.
46. Проанализируйте, как происходит образование и ограничения тормозной силы
47. Объясните физические процессы образования силы сцепления, что такое коэффициент сцепления
48. Выведите уравнения электромеханических характеристик на валу тягового двигателя
49. Выведите уравнения электромеханических характеристик на ободе колеса тягового двигателя
50. Объясните, что такое тяговые характеристики подвижного состава. Приведите основные понятия и соотношения
51. Опишите требования, предъявляемые к тяговому двигателю (с примерами)

52. Опишите механическую устойчивость подвижного состава для двигателей различных систем возбуждения
53. Сравните двигатели различных систем возбуждения, исходя из требований, предъявляемым к тяговым двигателям, по всем показателям
54. Проанализируйте, какие условия и системы пуска вы знаете. Приведите примеры
55. Объясните явления, возникающие при ступенчатом пуске. Приведите порядок выбора значения расчетного пускового тока?
56. Рассмотрите процесс пуска для одного двигателя при постоянном пусковом токе
57. Начертите схему и характеристики двигателей при изменении напряжения
58. Объясните принцип импульсного управления

## Перечень учебных изданий и информационно-аналитических материалов, рекомендуемых для изучения учебной дисциплины

- 1 Байрыева, Л. С. Электрическая тяга / Л. С. Байрыева, В. В. Шевченко. – М. : Транспорт, 2006
- 2 Богдан, Н. В. Троллейбус (теория, конструирование, расчет) / Н. В. Богдан, Ю. Е. Атаманов, А. И. Сафонов. - Минск : Ураджай, 2009
- 3 Богдан, Н. В. Перспективные направления развития городского нерельсового электрического транспорта / Н. В. Богдан, В. П. Николаев. – Минск : Ураджай, 2007
- 4 Осипов, С. И. Теория электрической тяги / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов. - М. : Маршрут, 2006
- 5 Южаков, Б. Г. Технология и организация обслуживания и ремонта устройств электроснабжения / Б. Г. Южаков. - М. : Маршрут, 2004
- 6 Макаров, Е. Ф. Обслуживание и ремонт электрооборудования электростанций и сетей / Е. Ф. Макаров. - М. : Изд. центр «Академия», 2003
- 7 Афанасьев, А. С. Контактные сети трамвая и троллейбуса / А. С. Афанасьев. - М. : Транспорт, 2008
- 8 Куценко, Г. Ф. Монтаж, эксплуатация и ремонт электроустановок / Г. Ф. Куценко. -М. : Дизайн ПРО, 2003

ГОСТ 12.0.001-82 Система стандартов безопасности труда. Основные положения

ГОСТ 12.0.002-80 Система стандартов безопасности труда. Термины и определения

ГОСТ 12.1.002-84 Система стандартов безопасности труда. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах

ГОСТ 12.1.004-85 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность

ГОСТ 12.1.006-84 Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля

ГОСТ 12.1.019-79 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования

ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление

ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов (с изменением N 1)

ГОСТ 12.1.045-84 Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля

ГОСТ 12.1.051-90 ССБТ. Электробезопасность. Расстояния безопасности в охранной зоне линий электропередачи напряжением свыше 1000 В



ГОСТ 12.2.007-75 ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.3.019-80 Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.3.019-80 Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.4.026-2001 Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний

ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования

ТКП 181-2009 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей

ГОСТ Р МЭК 332-1-96 Испытание трансформаторного масла

ГОСТ Р МЭК 332-2-96 Испытание вертикально расположенного изолированного провода или кабеля с медными жилами

ТКП 339-2011 (02230) Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий.

ГОСТ 721-77 Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В

ГОСТ 839-80 Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия (с Изменениями N 1, 2)

ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции

ГОСТ 2933-83 Аппараты электрические низковольтные методы испытаний

ГОСТ 2990-78 Методика измерения сопротивления изоляции

ГОСТ 3484.1-88 Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний

ГОСТ 3484.3-88 Трансформаторы силовые. Методы измерений диэлектрических параметров изоляции

ГОСТ 3484.5-88 Трансформаторы силовые. Испытания баков на герметичность

ГОСТ 6490-93 Изоляторы линейные подвесные тарельчатые. Общие технические условия.

ГОСТ 11677-85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия

ГОСТ 12965-85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ. Технические условия.

ГОСТ 15845-80 Изделия кабельные. Термины и определения

ГОСТ 16442-80 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией

ГОСТ 20690-75 Электрооборудование переменного тока на напряжение 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции

ГОСТ 21023-75 Трансформаторы силовые. Методы измерений характеристик частичных разрядов при испытаниях напряжением промышленной частоты

ГОСТ 22012-82 Радиопомехи промышленные от линий электропередачи и электрических подстанций. Нормы и методы измерений

ГОСТ 22756-77 Трансформаторы (силовые и напряжения) и реакторы. Методы испытаний электрической прочности изоляции

ГОСТ 27751-88 (СТ СЭВ 384-87) Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету (с Изменением N 1)

ГОСТ 28856 Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные. Общие технические условия

ГОСТ Р 51177-98 Арматура линейная. Общие технические условия

ГОСТ 51320-99 Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний технических средств - источников электромагнитных радиопомех

ГОСТ Р МЭК 60331-11—2003 Испытательные длительные переменные напряжения внутренней изоляции силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов

ГОСТ Р МЭК 60331-21-2003 Испытания кабелей 0,6/1,0 кВ в условиях воздействия пламени

ГОСТ Р МЭК 60331-23-2003 Испытания масляных выключателей