

В.И. СОПОВ, Н.И. ЩУРОВ

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Учебник

НОВОСИБИРСК
2012

УДК 621.331 (075.8)

С 645

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *В.П. Горелов*,

д-р техн. наук, доц. *В.Н. Аносов*,

канд. техн. наук, доц. *В.В. Бирюков*

Сопов В.И.

С 645 Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе : учебник / В.И. Сопов, Н.И. Щуров. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – 728 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-1928-1

Изложены научные основы систем тягового электроснабжения на постоянном токе. Приведены краткие сведения о развитии знаний об электричестве и электрической тяге, устройствах генерации и транспорта электроэнергии. Показаны принципы устройства систем тягового электроснабжения, рассмотрены устройство, схемы, параметры внешней системы, подстанций и тяговых сетей. Приведены описания организации движения поездов, тяговых нагрузок, режимов напряжения и надежности системы. Подробно рассмотрены методы электрических расчетов и выбора параметров элементов системы. Даны сведения по защите тяговых сетей от сверхтоков и подземных сооружений от блуждающих токов. Рассмотрены вопросы энергосбережения, электромагнитной совместимости, электробезопасности, защиты от перенапряжений, организации эксплуатации. Математической основой учебника является теория вероятностей, сведения о которой обобщены в отдельной главе.

Адресован студентам (бакалаврам и магистрам), специализирующимся в области электрического транспорта, а также будет полезен инженерно-техническим работникам систем электроснабжения.

УДК 621.331 (075.8)

ISBN 978-5-7782-1928-1

© Сопов В.И., Щуров Н.И., 2012

© Новосибирский государственный
технический университет, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	11
Сокращения, обозначения, терминология и понятия, принятые в учебнике	14
<i>Глава 1. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ</i>	19
1.1. Развитие электрических наук, электротехники и электроэнергетики	19
1.2. Развитие электрической тяги.....	26
1.3. Развитие систем тягового электроснабжения постоянного тока	39
Вопросы для самопроверки	46
<i>Глава 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ</i>	47
2.1. Понятие энергосистем.....	47
2.2. Принципы устройства и характеристики электростанций	49
2.3. Линии электропередачи – электрические сети	60
2.4. Энергетические ресурсы и их краткая характеристика	63
Вопросы для самопроверки	69
<i>Глава 3. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА</i>	71
3.1. Структурные и функциональные схемы электрической тяги	71
3.2. Термины и определения тяговой электрики	77
3.3. Требования к системе и схемы тяговых сетей	84
3.4. Принципы выполнения систем тягового электроснабжения на постоян- ном токе	88
3.5. Системы электроснабжения на переменном токе.....	103
Вопросы для самопроверки	119

<i>Глава 4. УСТРОЙСТВА, СХЕМЫ, ПАРАМЕТРЫ И РАСЧЕТЫ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</i>	121
4.1. Устройство линий электропередач	121
4.2. Схемы питания тяговых подстанций	124
4.3. Параметры электрических сетей	128
4.4. Электрические параметры силовых трансформаторов	131
4.5. Электрические расчеты ЛЭП	132
4.6. Потери мощности и электроэнергии в питающих сетях и силовых трансформаторах	138
Вопросы для самопроверки	144
<i>Глава 5. УСТРОЙСТВА, СХЕМЫ И ПАРАМЕТРЫ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ</i>	145
5.1. Схемы тяговых подстанций	145
5.2. Коммутационное и защитное электрооборудование подстанций	152
5.3. Преобразователи тяговых подстанций постоянного тока	177
5.4. Параметры тяговых подстанций постоянного тока	208
Вопросы для самопроверки	210
<i>Глава 6. УСТРОЙСТВА, СХЕМЫ И ПАРАМЕТРЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ</i>	211
6.1. Устройства и схемы подключения питающих линий тяговой сети	211
6.2. Рельсовые сети систем отсоса тягового тока	217
6.3. Контактная сеть	219
6.4. Линейные устройства	243
6.5. Схемы питания и секционирования тяговой сети	247
6.6. Параметры тяговой сети	254
6.7. Выбор схем тяговых сетей с использованием метода эквивалентных сопротивлений	260
Вопросы для самопроверки	270
<i>Глава 7. КРАТКИЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ОПИСАНИЙ ЯВЛЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</i>	271
7.1. Краткая характеристика случайных явлений на электрическом транспорте	271

7.2. Основные понятия и определения теории вероятностей	273
7.3. Теоремы сложения и умножения вероятностей событий и модели ЭТС на их основе.....	275
7.4. Случайные величины	280
7.5. Системы случайных величин.....	294
7.6. Некоторые понятия теории случайных процессов	306
7.7. Краткие сведения о потоках событий и их свойствах.....	313
7.8. Обобщение распределений вероятностей СВ	319
Вопросы для самопроверки	324
<i>Глава 8. ОРГАНИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ И ЧИСЛА ПОЕЗДОВ НА УЧАСТКАХ.....</i>	<i>325</i>
8.1. Организация движения поездов	325
8.2. Характеристики количества поездов на участках	326
8.3. Описание движения поездов как случайного явления.....	329
8.4. Моделирование движения поездов на линиях трамвая и троллейбуса	341
Вопросы для самопроверки	349
<i>Глава 9. ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ</i>	<i>351</i>
9.1. Расходы электрической энергии на движение поездов.....	351
9.2. Тяговые нагрузки фидеров и подстанций и методы их описаний	365
9.3. Универсальная выравнивающая функция для распределений вероятностей тяговых нагрузок.....	373
Вопросы для самопроверки	406
<i>Глава 10. РЕЖИМЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</i>	<i>407</i>
10.1. Режимы напряжения в системах электроснабжения	407
10.2. Вопросы надежности систем электроснабжения.....	414
10.3. Вынужденные режимы.....	417
Вопросы для самопроверки	418
<i>Глава 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</i>	<i>419</i>
11.1. Краткие замечания по истории развития методов электрических расчетов тяговых сетей.....	419

11.2. Классификация и точность методов электрических расчетов.....	421
11.3. Методы расчетов электрических величин по графику движения поез- дов	424
11.4. Расчет электрических величин в мгновенных схемах.....	432
11.5. Методы расчетов электрических величин по средним размерам дви- жения	436
11.6. Аналитический метод расчета электрических величин	442
11.7. Расчет максимальных нагрузок фидеров и подстанций.....	449
11.8. Краткая характеристика компьютерного моделирования электриче- ских расчетов	454
Вопросы для самопроверки	457

<i>Глава 12. ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</i>	459
12.1. Методы технико-экономической оценки параметров	459
12.2. Расчеты приведенных затрат и потерь электроэнергии в варианте сис- темы	461
12.3. Выбор вариантов размещения подстанций, схем питания и секциони- рования тяговой сети.....	467
12.4. Расчеты трансформаторной и вентильной мощности подстанции	470
12.5. Расчет сечений контактной сети и питающих линий.....	488
12.6. Расчеты пропускной способности тяговой сети	491
Вопросы для самопроверки	500

<i>Глава 13. КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ И ЗАЩИТА УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРО- СНАБЖЕНИЯ ОТ СВЕРХТОКОВ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ</i>	501
13.1. Характеристика коротких замыканий в тяговых сетях.....	501
13.2. Расчеты токов коротких замыканий	502
13.3. Защита тяговой сети от токов короткого замыкания	512
13.4. Релейная защита оборудования ТП.....	522
13.5. Защитные устройства контактных сетей и ЛЭП.....	535
Вопросы для самопроверки	543

<i>Глава 14. БЛУЖДАЮЩИЕ ТОКИ РЕЛЬСОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА</i>	545
14.1. Расчеты потенциалов рельсовой сети и подземных сооружений	545
14.2. Защита подземных сооружений от коррозии блуждающими токами	552
14.3. Защита от электрокоррозии конструкций железнодорожного транспорта	556
14.4. Мероприятия по снижению блуждающих токов и уменьшению потенциалов ходовых рельсов метрополитенов.....	561
Вопросы для самопроверки	568
<i>Глава 15. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ</i>	569
15.1. Общая характеристика электромагнитных влияний	569
15.2. Защита устройств от опасных влияний	571
15.3. Сглаживающие фильтры тяговых подстанций с выпрямителями	577
15.4. Качество электрической энергии на электрическом транспорте	582
Вопросы для самопроверки	586
<i>Глава 16. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА</i>	587
16.1. Общая характеристика мероприятий по повышению энергоэффективности электрического транспорта.....	587
16.2. Эффективность использования энергии электрических торможений подвижного состава.....	599
16.3. Энергосберегающие режимы работы выпрямительных агрегатов подстанций электрического транспорта.....	630
Вопросы для самопроверки	640
<i>Глава 17. АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</i>	641
17.1. Автоматизация управления системой электроснабжения железных дорог	641
17.2. Спутниковые технологии в электроснабжении и на транспорте	658
17.3. Автоматизированные системы учета электроэнергии	667
Вопросы для самопроверки	686

<i>Глава 18. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</i>	<i>687</i>
18.1. Общая характеристика организации эксплуатации тяговой сети и подстанций	687
18.2. Вагон-лаборатория для испытаний контактной сети	692
18.3. Встроенные диагностические устройства контактных сетей и ЛЭП.....	700
18.4. Содержание контактной сети	704
18.4.1. Общая характеристика систем содержания КС.....	704
18.4.2. Нормы устройства и содержания контактных подвесок	706
18.4.3. Токосъём, параметры и износы контактных проводов.....	710
18.4.4. Техническая эксплуатация КС	713
18.4.5. Содержание технических обслуживаний и ремонтов.....	715
Вопросы для самопроверки	719
Библиографический список.....	720