

В. Я. Хорольский  
М. А. Гарзнов  
В. Н. Шемшин

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

**В.Я. Хорольский, М.А. Таранов, В.Н. Шемякин**

## **ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

Допущено  
Министерством сельского хозяйства  
Российской Федерации в качестве учебного пособия  
для бакалавров высших учебных заведений, обучающихся  
по направлению 140200.62 — «Электроэнергетика»  
и магистров, обучающихся по направлению  
110300.68 — «Агроинженерия»

Зерноград  
ФГОУ ВПО АЧГАА  
2010

УДК 621.31(075.8)  
ББК 40.76я73  
Х81

**Рецензенты:**

Заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. кафедры эксплуатации электрооборудования и электрических машин Саратовского государственного аграрного университета) *Г.П. Ерошенко*  
д-р техн. наук, зав. кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Северо-Кавказского государственного технического университета *Ю.Г. Кононов*

**Хорольский В.Я., Таранов М.А., Шемякин В.Н.**

**X81** Электроэнергетика: учебное пособие. — Зерноград : ФГОУ ВПО АЧГАА, 2010. — 600 с.

ISBN 978-5-91833-009-8

В пособии в систематизированном виде рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с принципами построения, устройством и особенностями функционирования электроэнергетических систем. Учтены отечественные и зарубежные разработки в области создания новейших образцов электротехнических изделий. Цель учебного пособия заключается в получении студентами базовых знаний в вопросах производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии для дальнейшего углубленного изучения специальных дисциплин.

ISBN 978-5-91833-009-8

УДК 621.31(075.8)  
ББК 40.76я 73

© Текст: Хорольский В.Я., Таранов М.А., Шемякин В.Н., 2010  
© Оформление: «Терра», 2010

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Жизнь современного общества трудно представить без использования электрической энергии. Функции обеспечения электроэнергией потребителей возлагаются на энергопредприятия, которые должны бесперебойно поставлять электроэнергию в необходимых количествах и требуемого качества. При этом таким организациям приходится решать широкий комплекс задач, связанных с производством, передачей, распределением и потреблением электроэнергии.

В настоящее время электроэнергетика Российской Федерации находится в стадии реформирования и модернизации. Помимо организационных мероприятий, проводимых с целью внедрения оптимальной структуры управления производством электрической энергии и эксплуатацией энергетического оборудования, значительный объем работ проводится по техническому перевооружению электрических сетей.

Основное направление таких работ связано с применением линий электропередачи с самонесущими изолированными проводами, установкой нового коммутационного оборудования на подстанциях, использованием принципиально новых устройств релейной защиты и автоматики, широким внедрением диагностических систем. Серьезные изменения в связи с повсеместным применением цифровых устройств произошли в разработке оборудования для проведения пусконаладочных работ, профилактических измерений и эксплуатационных испытаний.

В пособии излагаются принцип действия, устройство, электрические схемы и основные теоретические сведения об электроустановках, входящих в электроэнергетические системы. Последовательность изложения материала в пособии принята в соответствии с делением всей системы на отдельные подсистемы. Значительное внимание также уделено таким важным общесистемным вопросам, как автоматика,

релейная защита, надежность и экономичность работы электроэнергетических систем, качество электроэнергии, защита оборудования от перенапряжений и др.

При написании материала авторы придерживались позиции, что выпускник вуза электроэнергетического профиля должен иметь ясное представление о тех процессах и явлениях, которые происходят в электроустановках, о принципах построения и функционирования отдельных элементов и электроэнергетической системы в целом и о тех мерах, которые должен проводить персонал по поддержанию работоспособного состояния электроустановок.

Учебное пособие разработано в соответствии с примерной программой дисциплины «Электроэнергетика» для направления подготовки бакалавров 140200.62 — «Электроэнергетика» и может быть полезно при подготовке магистров по направлению подготовки 110300.68 «Агроинженерия».

никли на водохранилищах Курейской, Усть-Хантайской и других ГЭС.

В зону затопления часто попадают крупные населенные пункты, и десятки тысяч людей вынуждены менять место жительства.

Одной из наиболее острых проблем гидроэнергетики является уменьшение рыбных запасов и урон, наносимый рыбоводству. Плотина ГЭС, перегораживая реки, становится непреодолимой преградой на пути миграции рыб. Рыбоподъемники используются далеко не на всех ГЭС, а эффективность их низка. Например, на Волжской ГЭС машинный зал имеет длину около километра. У крайнего генератора имеется рыбоход. Поднимаясь из Каспийского моря, рыба упирается в плотину и перед ней стоит весьма сложная задача — найти рыбоход и по нему попасть в ванну, которая затем специальным подъемником переносится через плотину. Волга, перегороженная плотинами ГЭС, напоминает цепь водохранилищ, течение воды в которых в летний период почти отсутствует. Вода в них застаивается, количество рыбы уменьшается, промышленный лов становится малоэффективным.

Подводя итог, следует отметить, что значительная часть человеческой деятельности отрицательно сказывается на природе. Научно-технический прогресс остановить нельзя. Общая задача всех, в том числе и энергетиков, заключается в минимизации его отрицательных последствий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 2006.
2. Будзко И.А., Лещинская Т.Б., Сукманов В.И. Электроснабжение сельского хозяйства: Учебник для вузов. — М.: Колос, 2000.
3. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: Учебное пособие для вузов. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2008.
4. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Госстандарт, 1997.
5. Дмитриев М.В. Применение ограничителей перенапряжений в электрических сетях 6–750 кВ. — Санкт-Петербург, 2007.
6. Дубинский Г.Н., Левин Л.Г. Наладка устройств электроснабжения напряжением свыше 1000 вольт. — М.: СОЛОН — Пресс, 2005.
7. Дьяков А.Ф., Овчаренко Н.И. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем: Учебное пособие для вузов. — М.: Издательство МЭИ, 2000.
8. Загорюкин В.П. Техника высоких напряжений: Конспект лекций. — Иркутск: ИрГУПС, 2005.
9. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов: Учебное пособие для студентов среднего профессионального образования. — М.: Издательство «Мастерство», 2002.
11. Короткевич М.А. Эксплуатация электрических сетей: Учебник для вузов. — Минск: Высшая школа, 2005.

12. Костин В.Н., Распопов Е.В., Родченко Е.А. Передача и распределение электроэнергии: Учебное пособие для вузов. — Санкт-Петербург: СЗГЗТУ, 2003.
13. Кужеков С.Л., Гончаров С.В. Практическое пособие по электрическим сетям и электрооборудованию. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2008.
14. Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: Учебное пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1990.
15. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: Учебное пособие для вузов. — М.: Логос, 2008.
16. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
17. Новиков А.В., Медов Р.В. Электрические станции: Учебное пособие. — Киров: Вят. ГУ, 2006.
18. Овчаренко Н.И. Автоматика энергосистем: Учебник для вузов / Под ред. А.Ф. Дьякова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
19. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник. — М.: Издательский дом «Форум» — ИНФРА-М, 2008.
20. Основы современной энергетики: Курс лекций для менеджеров энергетических компаний / Под ред. Е.В. Аметистова. — М.: Издательство МЭИ, 2004.
21. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. — М.: ОМЕГА-Л, 2006.
22. Правила устройства электроустановок. — Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2006.
23. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования: Учебное пособие для вузов / И.П. Крючков, Б.Н. Неклепаев, В.А. Старшинов и др.; под ред. И.П. Крючкова

- и В.А. Старшинова. — М.: Издательский центр «Академия», 2008.
24. Рожкова Л.Д., Карнеева Л.К., Чиркова Т.В. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для студентов среднего профессионального образования. — М.: Издательский центр «Академия», 2008.
25. Соловьев А.Л., Шабад М.А. Релейная защита городских электрических сетей 6 и 10 кВ. — Санкт-Петербург: Издательство ПОЛИТЕХНИКА, 2007.
26. Таранов М.А., Хорольский В.Я. Эксплуатация систем электроснабжения: Учебник для вузов. — Ростов-на-Дону: Терра Принт, 2007.
27. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов / И.М. Богатенков, Г.М. Иманов, В.Е. Кизеветтер и др.; под ред. Г.С. Кучинского. — Санкт-Петербург: Издательство ПЭИПК, 1998.
28. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов / В.Ф. Важов, Д.В. Жун, Ю.И. Кузнецов и др.; — Томск: Издательство ТПУ, 2006.
29. Техника высоких напряжений: Курс лекций. — Томск: Издательство ТПУ, 2005.
30. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташов, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
31. Хорольский В.Я., Таранов М.А., Петров Д.В. Технико-экономические расчеты распределительных электрических сетей: Учебное пособие для вузов. — Ставрополь: АГРУС, 2010.
32. Электрические системы. Электрические сети: Учебник для вузов / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др.; под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. — М.: Высшая школа, 1998.
33. Электрическая часть станций и подстанций: Учебник для вузов / А. А. Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Наяш-

кова, М.Н. Околович: под ред. А.А. Васильева. — М.: Энергоатомиздат, 1990.

34. Юндин М.А. Защита электропотребителей от перенапряжений в сети 0,38 кВ. — Черноград: ФГОУ АЧГАА, 2009.

## Оглавление

Предисловие .....	3
1. ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ .....	5
1.1. Понятие об электроэнергетических системах .....	5
1.2. Типы электростанций и особенности их технологических режимов .....	7
1.3. Компоновка электрических станций .....	26
1.4. Схемы электрических станций .....	29
1.5. Электрооборудование электростанций .....	34
1.5.1. Синхронные генераторы .....	34
1.5.2. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы .....	48
1.5.3. Электрические аппараты .....	61
1.6. Собственные нужды электростанций .....	91
2. РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК .....	94
2.1. Область применения и требования, предъявляемые к распределительным устройствам .....	94
2.2. Открытые и закрытые распределительные устройства .....	99
2.2.1. Основные элементы распределительных устройств .....	99
2.2.2. Открытые распределительные устройства .....	102
2.2.3. Закрытые распределительные устройства .....	109
2.2.4. Комплектные трансформаторные подстанции .....	111
2.3. Схемы распределительных устройств .....	115
2.4. Заземляющие устройства .....	119
2.4.1. Назначение, конструкция и требования к заземляющим устройствам .....	119
2.4.2. Расчет заземляющих устройств .....	125
3. ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ .....	132
3.1. Классификация и требования к электрическим сетям .....	132
3.2. Передача электрической энергии на постоянном токе .....	136
3.3. Конструктивное выполнение воздушных и кабельных линий электропередач .....	137
3.4. Конфигурация распределительных электрических сетей .....	148
3.5. Выбор параметров и конструктивных решений электрических сетей .....	153
3.5.1. Выбор напряжения сети .....	153
3.5.2. Режим нейтрали в электрических сетях переменного тока .....	155
3.5.3. Выбор способов выполнения электрических сетей .....	159

3.5.4. Выбор проводов и кабелей по нагреву.....	160
3.5.5. Расчет сети на потери напряжения и мощности.....	161
4. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК.....	168
4.1. Характеристика процессов электропотребления.....	168
4.2. Графики электрических нагрузок.....	171
4.3. Вероятностно-статистические модели определения расчетных нагрузок.....	179
4.4. Расчет электрических нагрузок при проектировании.....	184
4.5. Статические характеристики электрических нагрузок.....	188
4.6. Задание нагрузок при расчетах режимов электрических сетей и систем.....	192
5. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ.....	196
5.1. Схемы замещения линий электропередачи, трансформаторов и автотрансформаторов.....	196
5.1.1. Схемы замещения линий электропередачи.....	196
5.1.2. Схемы замещения трансформаторов и автотрансформаторов.....	198
5.1.3. Использование схем замещения.....	204
5.2. Расчет и анализ режимов работы простейших схем электрических сетей.....	208
6. ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ КАК ЭЛЕМЕНТ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ.....	213
6.1. Режимы работы электроэнергетических систем и управление ими.....	213
6.2. Работа электростанций в энергосистеме.....	216
6.3. Оптимальное распределение нагрузки между агрегатами электростанций.....	218
6.4. Планирование и организация ремонтов оборудования электроэнергетической системы.....	220
7. БАЛАНС АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЕЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ, КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	224
7.1. Баланс активной мощности в энергосистеме и его связь с частотой.....	224
7.2. Регулирование частоты агрегата электростанции.....	227
7.3. Регулирование частоты в электроэнергетической системе.....	229
7.4. Баланс реактивной мощности в энергосистеме и его связь с напряжением.....	233
7.5. Источники реактивной мощности.....	238
7.6. Компенсирующие устройства.....	239
7.7. Регулирование напряжения в электрических сетях.....	246
7.7.1. Цели и задачи регулирования напряжения.....	246
7.7.2. Регулирование напряжения на электростанциях.....	248

7.7.3. Регулирование напряжения на подстанциях.....	251
7.7.4. Регулирование напряжения в распределительных электрических сетях.....	256
7.8. Потери электроэнергии в электрических сетях.....	262
7.8.1. Определение величины потерь.....	262
7.8.2. Мероприятия по снижению потерь электроэнергии.....	269
8. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	278
8.1. Цели и задачи автоматизации управления.....	278
8.2. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных генераторов.....	280
8.3. Автоматическое регулирование частоты вращения и активной мощности синхронных генераторов.....	283
8.4. Автоматическая частотная разгрузка электроэнергетической системы.....	289
8.5. Автоматическое повторное включение.....	292
8.6. Автоматическое включение резерва.....	298
8.7. Автоматическое включение синхронных генераторов на параллельную работу.....	300
8.8. Автоматика предотвращения нарушения устойчивости и ликвидации асинхронного режима.....	310
8.8.1. Автоматика предотвращения нарушения устойчивости.....	310
8.8.2. Автоматика ликвидации асинхронного режима.....	314
8.9. Системы телемеханики.....	318
9. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА.....	324
9.1. Короткие замыкания в электроустановках.....	324
9.2. Назначение устройств релейной защиты и основные требования к ним.....	330
9.3. Принципы выполнения релейных защит.....	335
9.4. Устройства релейной защиты с относительной селективностью.....	347
9.5. Защиты с абсолютной селективностью.....	356
9.6. Защита генераторов.....	363
9.6.1. Повреждения и ненормальные режимы генераторов.....	363
9.6.2. Релейная защита генераторов.....	366
9.7. Защита трансформаторов.....	374
9.7.1. Повреждения и ненормальные режимы трансформаторов.....	374
9.7.2. Краткая характеристика защит трансформатора.....	376
9.8. Защита электродвигателей.....	383
9.9. Защита воздушных и кабельных линий электропередачи и шин.....	388



10. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ .....	400
10.1. Основные элементы, общность и различие систем электроснабжения .....	400
10.2. Общие методы синтеза систем электроснабжения .....	409
10.3. Электрические сети систем электроснабжения .....	419
10.3.1. Источники питания и пункты приема электрической энергии.....	419
10.3.2. Номинальные напряжения электроустановок .....	422
10.3.3. Принципы построения электрических сетей .....	424
10.3.4. Основные типы схем электрических сетей .....	426
10.3.5. Конструктивное выполнение электрических сетей систем электроснабжения.....	433
10.3.6. Режим нейтрали в электрических сетях напряжением до 1000 вольт.....	437
11. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	443
11.1. Нормирование показателей качества электроэнергии.....	443
11.2. Влияние показателей качества электроэнергии на работу электроприемников .....	455
11.3. Методы и средства обеспечения нормированных показателей качества электроэнергии .....	462
11.4. Надежность систем электроснабжения.....	466
11.4.1. Основные понятия и определения теории надежности.....	466
11.4.2. Возможные методические подходы к оценке надежности систем электроснабжения.....	471
11.4.3. Задачи оценки надежности систем электроснабжения .....	474
11.4.4. Показатели надежности систем электроснабжения.....	480
11.4.5. Расчет показателей надежности электрических сетей .....	483
11.4.6. Методы и средства повышения надежности электроснабжения потребителей .....	492
12. ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ .....	501
12.1. Диэлектрики, используемые в качестве изоляции .....	501
12.2. Пробой диэлектриков .....	508
12.3. Воздействие различных факторов на изоляцию электроустановок.....	518
12.4. Внешняя и внутренняя изоляция электроустановок.....	528
12.4.1. Изоляторы воздушных линий электропередачи и подстанций.....	528
12.4.2. Изоляция трансформаторов и конденсаторов .....	537
12.4.3. Изоляция силовых кабелей .....	541

12.4.4. Изоляция электрических машин высокого напряжения .....	545
12.5. Испытание изоляции повышенным напряжением.....	546
12.6. Элегазовая изоляция .....	555
13. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ .....	559
13.1. Общая характеристика и классификация перенапряжений .....	559
13.2. Молния как источник грозовых перенапряжений .....	561
13.3. Характеристика импульсных напряжений, как возмущающего фактора .....	566
13.4. Перенапряжения переходного процесса при коммутациях .....	570
13.5. Оценка влияния импульсных напряжений на работу электроприемников .....	573
13.6. Аппараты и устройства защиты от перенапряжений .....	580
13.7. Основные принципы грозозащиты линий электропередачи и подстанций.....	590
13.8. Экологические аспекты энергетики .....	593
Литература.....	599

В.Я. Хорольский, М.А. Таранов, В.Н. Шемякин

## Электроэнергетика

*Учебное пособие*

Подписано в печать 23.08.2010.

Формат 60×84 1/16. Гарнитура «Таймс».

Усл. печ. л. 36,48. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Тираж 500 экз. Заказ № 72

Отпечатано в типографии ООО «Терра».  
344102, г. Ростов-на-Дону, пр. Королева 7/19.  
тел. (863)226-65-16, тел./факс 299-65-39;  
e-mail: kiselev@terraddon.ru