

ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

---

Л.А. Плащанский

# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*Издание второе, исправленное*

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области горного дела в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» (квалификация — горный инженер) направления подготовки дипломированных специалистов «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»*

**МОСКВА**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

---

**2 0 0 6**



УДК 621.31:622(075.8)

ББК 31.27:31.28

П 37

*Федеральная целевая программа «Культура России», подпрограмма  
«Поддержка полиграфии и книгоиздания России»*

*Экспертиза проведена*

*Учебно-методическим объединением высших учебных заведений  
Российской Федерации по образованию в области горного дела  
(протокол № 51 от 28.01.04)*

*Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным  
для взрослых. Сан ПиН 1.2.1253-03», утвержденным Главным государственным  
санитарным врачом России 30 марта 2003 г.*

**Рецензенты:**

- кафедра «Теоретическая электротехника и электрификация нефтяной и газовой промышленности» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина (зав. кафедрой проф., д-р техн. наук *М.С. Ершов*);
- действительный член Академии горных наук, проф., д-р техн. наук *А.Т. Ерыгин* (зав. отделом ИПКОП РАН);
- д-р техн. наук, проф. *С.И. Гамазин* [Московский энергетический институт (Технический университет)]

**Плащанский Л.А.**

П 37

Основы электроснабжения горных предприятий: Учебник для вузов.  
— 2-е изд., исправ. — М.: Издательство Московского государственного  
горного университета, 2006. — 499 с.: ил.

ISBN 5-7418-0441-1 (в пер.)

Приведены категории электроприемников с точки зрения надежности и их характеристики, методы определения электрических нагрузок. Рассмотрены переходные процессы, методы выбора напряжения и определения качества электрической энергии. Даны общие сведения о подстанциях, элементах и аппаратах системы электроснабжения. Изложены вопросы защиты электроустановок от аномальных режимов и перенапряжений, а также устройства заземляющей сети, автоматизации и эксплуатации систем электроснабжения. В каждом разделе даны контрольные вопросы и темы рефератов для самостоятельной работы.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» (квалификация — горный инженер) направления подготовки дипломированных специалистов «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Может быть полезен студентам других специальностей, а также аспирантам и инженерно-техническим работникам горной промышленности.

УДК 621.31:622 (075.8)

ББК 31.27:31.28

ISBN 5-7418-0441-1

© Л.А. Плащанский, 2005, 2006

© Издательство МГГУ, 2005, 2006

© Дизайн книги. Издательство МГГУ, 2005, 2006

Учебник «Основы электроснабжения горных предприятий» написан по программе дисциплины «Основы электроснабжения» для специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов (квалификация — горный инженер) с учетом опыта чтения данного курса в Московском государственном горном университете.

Настоящий учебник для вузов развивает положения учебно-методических изданий кафедры электрификации горных предприятий.

В учебном плане курс «Основы электроснабжения» базируется на курсах «Теоретические основы электротехники», «Метрология», «Электрические и электронные аппараты», «Электрические машины», «Электрический привод», «Преобразовательная техника», «Физические основы электроники».

В свою очередь, содержание этой дисциплины служит базой для профилирующих курсов квалификационной специализации по электрификации горного производства (при открытом и подземном способах добычи полезного ископаемого), городского подземного строительства, управлению энергохозяйством горных предприятий.

Учитывая специфику отраслевого характера, горный инженер по указанной специальности должен обладать знаниями, умениями и навыками проектировщика, электромонтажника и наладчика при новом строительстве и техническом перевооружении действующего предприятия, а как специалист-эксплуатационник обеспечивать развитие систем электроснабжения и их безаварийную работу.

Система электроснабжения, используя выработанную и получаемую электроэнергию, эксплуатируя различное электротехническое оборудование, обеспечивает любой технологический процесс достаточной и качественной электроэнергией, способствуя росту производства.

Особые технические решения в области электроснабжения промышленных, а особенно горных предприятий, обнаружили уже в 20—30 годы прошлого столетия, когда в работах Н.В. Копытова и В.С. Либермана были сформулированы основные требования и положения по расчету электрических нагрузок, выбору силовых трансформаторов и их размещению, формированию электрических сетей, выбору напряжения и др. Дальнейшее фундаментальное развитие эти и смежные с ними вопросы нашли в трудах А.А. Ермилова, Г.М. Каялова, Т.А. Константинова, С.А. Ульянова, А.А. Гайца, А.А. Федорова, В.И. Гордеева, В.В. Шевченко, Л.В. Гладилина, М.И. Озерного, В.Н. Винославского, С.А. Волотковского, И.В. Жежеленко.

Основное отличие настоящего учебника заключается в необходимости дать будущему специалисту знания по более широкому кругу вопросов электроснабжения, поскольку в своей практической деятельности на горных

предприятиях ему придется решать задачи, связанные с электроприводом, электроснабжением и автоматикой, поэтому содержанием одного из базисных курсов в системе подготовки «горного инженера-электромеханика» является комплексное изучение вопросов, связанных с передачей, преобразованием и распределением электроэнергии между потребителями горных предприятий с различным способом добычи полезного ископаемого.

Особое внимание уделено методам расчетов, на которых базируется выбор электрооборудования, методам защиты электроустановок от перенапряжений, повреждений и аномальных режимов работы и защиты персонала от поражения электрическим током, а также технико-экономической оценке рассматриваемых схемных и конструктивных решений.

Автор благодарен рецензентам за ценные замечания и коллективу кафедры за поддержку в процессе подготовки рукописи.

Не считая книгу свободной от недостатков, автор с признательностью примет замечания и пожелания, касающиеся ее содержания.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
<i>Глава 1</i>	
<b>СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНОВ И ПРЕДПРИЯТИЙ.....</b>	<b>7</b>
1.1. Общие сведения .....	9
1.1.1. Система и ее составные части.....	9
1.1.2. Климатические условия работы и классификация электрооборудования по защите от внешней среды .....	10
1.1.3. Номинальные напряжения и ряды номинальных токов.....	11
1.2. Характеристика потребителей и приемников электроэнергии .....	12
1.3. Категории электроприемников и обеспечение надежности.....	14
1.4. Требования к системе электроснабжения (СЭ).....	15
1.5. Характерные схемы питающих и распределительных сетей.....	17
1.6. Технические условия на присоединение к источнику питания.....	23
Контрольные вопросы.....	24
<i>Глава 2</i>	
<b>ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ.....</b>	<b>25</b>
2.1. Электрические нагрузки. Основные понятия и определения.....	27
2.2. Понятие о графиках электрических нагрузок, их видах и показателях.....	29
2.3. Методы расчета электрических нагрузок .....	36
2.3.1. Понятие о расчетной нагрузке.....	36
2.3.2. Средние нагрузки .....	37
2.3.3. Методы определения расчетных нагрузок .....	40
2.3.4. Пиковые нагрузки.....	44
2.3.5. Потери мощности и энергии.....	45
2.4. Модели учета роста электрических нагрузок .....	47
2.4.1. Проблема электрической энергии и расчет лимитов мощности.....	47
2.4.2. Определение заявленной потребителем активной мощности, участвующей в максимуме нагрузки энергосистемы.....	49
2.4.3. Общие положения по регулированию графиков нагрузки .....	50
2.4.4. Прогнозирование электрических нагрузок и электропотребления.....	53
Контрольные вопросы.....	54
Темы рефератов.....	54
<i>Глава 3</i>	
<b>ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ .....</b>	<b>55</b>
3.1. Общие сведения .....	57
3.2. Короткие замыкания в системах электроснабжения .....	57
3.3. Процесс протекания короткого замыкания .....	58
3.4. Исходные условия для расчета токов короткого замыкания .....	62

3.4.1. Общие сведения .....	62
3.4.2. Расчетные схемы и эквивалентные схемы замещения .....	63
3.5. Методы расчета токов короткого замыкания .....	69
3.5.1. Расчет токов КЗ в именованных единицах .....	69
3.5.2. Расчет токов КЗ в относительных единицах .....	71
3.5.3. Порядок расчета токов КЗ .....	75
3.5.4. Расчет токов КЗ при асимметрии точки короткого замыкания .....	79
3.5.5. Определение аperiodической слагающей тока КЗ .....	81
3.5.6. Расчет токов КЗ с учетом электродвигательной нагрузки .....	82
3.5.7. Ограничения токов КЗ .....	84
3.5.8. Особенности расчета токов КЗ в установках напряжением до 1 кВ .....	88
3.6. Расчет токов несимметричных коротких замыканий .....	91
Контрольные вопросы .....	93
Темы рефератов .....	94

## Глава 4

<b>ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</b> .....	95
4.1. Общие сведения .....	97
4.2. Система критериев и показателей оценки эффективности инвестицион- ных проектов .....	97
4.3. Методика технико-экономических расчетов .....	99
4.4. Капитальные вложения и эксплуатационные издержки .....	100
4.5. Ущерб от нарушения электроснабжения .....	103
Контрольные вопросы .....	104

## Глава 5

<b>ВЫБОР НАПРЯЖЕНИЯ И КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ</b> .....	105
5.1. Обоснование выбора рационального напряжения .....	107
5.2. Основные показатели качества электроэнергии и их нормирование .....	110
5.3. Показатели качества электроэнергии в сетях с нелинейной нагрузкой .....	116
5.4. Расчет показателей качества электроэнергии .....	120
5.5. Улучшение качества напряжения .....	123
5.6. Уменьшение влияния высших гармоник на питающую сеть .....	129
5.7. Примеры выбора средств регулирования напряжения .....	133
Контрольные вопросы .....	138
Темы рефератов .....	138

## Глава 6

<b>ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ</b> .....	139
6.1. Общие сведения .....	141
6.2. Устройство электрических сетей .....	145
6.2.1. Воздушные линии (ВЛ) .....	145
6.2.2. Кабельные линии (КЛ) .....	155
6.2.3. Токопроводы и шинопроводы .....	160
6.2.4. Электропроводки .....	162
6.3. Расчет электрических сетей по нагреву .....	163
6.3.1. Общие сведения .....	163

6.3.2. Выбор проводников в нормальных режимах.....	164
6.3.3. Выбор проводников в аварийном режиме .....	168
6.3.4. Согласование сечений проводников с устройствами защиты.....	172
6.4. Расчет проводников по потере напряжения .....	173
6.4.1. Общие сведения .....	173
6.4.2. Выбор сечения проводников в разомкнутых сетях.....	177
6.4.3. Выбор сечений проводников из условия их постоянства вдоль магистральных линий .....	181
6.4.4. Определение сечения проводников по условию минимума расхода цветного металла .....	182
6.4.5. Расчет замкнутых сетей по потере напряжения .....	184
6.5. Расчет проводов и тросов воздушных линий на механическую прочность .....	188
6.5.1. Общие сведения .....	188
6.5.2. Механические нагрузки проводов и тросов .....	191
6.5.3. Расчетные напряжения и стрелы провеса проводов и тросов .....	193
6.6. Экономические сечения проводников.....	200
6.6.1. Общие сведения .....	200
6.6.2. Выбор сечения проводников по экономической плотности тока .....	200
6.6.3. Выбор сечения проводников по экономическим интервалам тока .....	203
6.7. Особенности расчета линий напряжением 110 кВ .....	204
Контрольные вопросы.....	207
Темы рефератов.....	208

## Глава 7

<b>КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ.....</b>	<b>209</b>
7.1. Понятие о реактивной мощности, ее источниках и приемниках .....	211
7.2. Средства компенсации реактивной мощности.....	214
7.3. Способы уменьшения потребления реактивной мощности .....	217
7.4. Выбор мощности и размещение компенсирующих устройств.....	221
7.5. Компенсация реактивной мощности в сетях с нелинейными нагрузками.....	227
Контрольные вопросы.....	231
Темы рефератов.....	232

## Глава 8

<b>ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ПОДСТАНЦИЙ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ .....</b>	<b>233</b>
8.1. Общие сведения .....	235
8.2. Разъединители.....	238
8.3. Выключатели .....	240
8.3.1. Назначение.....	240
8.3.2. Баковые масляные выключатели.....	241
8.3.3. Воздушные выключатели .....	242
8.3.4. Электромеханические выключатели .....	243
8.3.5. Элегазовые выключатели .....	243
8.3.6. Вакуумные выключатели.....	244
8.3.7. Выключатели нагрузки.....	245
8.4. Реакторы.....	245
8.5. Измерительные трансформаторы.....	247
8.5.1. Измерительные трансформаторы тока (ТТ).....	248

8.5.2. Трансформаторы напряжения (ТН) .....	250
8.6. Изоляторы и шины.....	254
8.7. Предохранители .....	256
8.8. Выбор электрических аппаратов .....	258
8.8.1. Общие сведения .....	258
8.8.2. Выбор и проверка разъединителей .....	261
8.8.3. Выбор и проверка выключателей .....	261
8.8.4. Выбор и проверка предохранителей .....	262
8.8.5. Выбор и проверка выключателей нагрузки .....	263
8.8.6. Выбор и проверка изоляторов.....	264
8.8.7. Расчет шин .....	265
8.8.8. Выбор и проверка реакторов.....	268
8.8.9. Выбор и проверка трансформаторов тока (ТТ) .....	270
8.8.10. Выбор и проверка трансформаторов напряжения (ТН) .....	276
8.8.11. Выбор и проверка автоматических выключателей .....	277
Примеры расчета.....	278
Контрольные вопросы.....	281
Темы рефератов.....	282

## **Глава 9**

### **ПОДСТАНЦИИ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА .....**

9.1. Выбор места расположения подстанций, числа и мощности трансформаторов .....	285
9.1.1. Общие сведения .....	285
9.1.2. Выбор типа и числа трансформаторов .....	287
9.1.3. Выбор мощности трансформаторов .....	289
9.1.4. Определение местоположения подстанций и распределительных устройств .....	292
9.2. Выбор схем электроснабжения .....	294
9.3. Схемы электрических соединений подстанций и распределительных устройств напряжением выше 1 кВ .....	298
9.3.1. Коммутация подстанций и установка коммутационной аппаратуры.....	298
9.3.2. Система сборных шин и схемы подстанций .....	300
9.4. Подстанции промышленных предприятий.....	306
9.5. Открытые распределительные устройства напряжением 35—220 кВ.....	310
9.6. Закрытые распределительные устройства .....	312
9.7. Рекомендации по схемам подстанций напряжением 10(6) кВ и распределительным пунктам.....	313
9.8. Распределительные устройства напряжением до 1 кВ.....	315
Контрольные вопросы.....	316
Темы рефератов.....	316

## **Глава 10**

### **ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК .....**

10.1. Общие сведения .....	319
10.2. Требования, предъявляемые к релейной защите .....	321
10.3. Элементы защиты. Источники оперативного тока в целях релейной защиты.....	323
10.3.1. Элементы защиты.....	323

10.3.2. Источники оперативного тока в цепях релейной защиты .....	324
10.4. Защита от внешних коротких замыканий в электроустановках на- пряжением выше 1 кВ .....	332
10.4.1. Общие сведения .....	332
10.4.2. Схемы максимальной токовой защиты .....	333
10.4.3. Выбор параметров максимальной токовой защиты .....	336
10.4.4. Токовая отсечка.....	340
10.4.5. Токовая направленная защита.....	343
10.5. Защита от многофазных замыканий в электроустановках напряже- нием выше 1 кВ.....	344
10.5.1. Общие сведения .....	344
10.5.2. Принцип действия продольной дифференциальной защиты .....	345
10.5.3. Поперечная дифференциальная защита .....	347
10.5.4. Защита силовых трансформаторов .....	351
10.5.5. Защита шин напряжением 6—35 кВ.....	357
10.5.6. Защита линий 6—35 кВ с односторонним питанием.....	360
10.5.7. Защита асинхронных и синхронных электродвигателей напря- жением выше 1 кВ .....	362
10.5.8. Защита конденсаторных установок напряжением 6 (10) кВ.....	364
10.5.9. Защита фильтров высших гармоник (ФВГ) 10—35 кВ .....	366
10.5.10. Защита трансформаторов полупроводниковых transforma- торных агрегатов 6—35 кВ.....	368
10.6. Защита от однофазных замыканий в электроустановках напряжени- ем выше 1 кВ.....	369
10.6.1. Общие сведения .....	369
10.6.2. Максимальная токовая защита нулевой последовательности в сетях с большими токами замыкания на землю.....	371
10.6.3. Защита от замыканий на землю в сетях с малыми токами замы- кания на землю.....	373
10.6.4. Защита электроустановок от однофазных замыканий на землю .....	374
10.7. Прочие виды защит .....	377
10.7.1. Дистанционная защита линий .....	377
10.7.2. Высокочастотная защита .....	377
10.7.3. Газовая защита .....	378
10.7.4. Защита от перегрузки .....	378
10.7.5. Защита синхронных двигателей от асинхронного режима.....	381
10.7.6. Защита от потери питания и понижения напряжения.....	381
10.7.7. Самозапуск электродвигателей .....	382
Контрольные вопросы .....	383
Темы рефератов .....	384

## Глава 11

<b>ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....</b>	<b>385</b>
11.1. Общие сведения .....	387
11.2. Защита электроустановок от прямых ударов молнии.....	389
11.3. Защита от волн атмосферных перенапряжений .....	395
11.4. Защита от внутренних перенапряжений .....	397
11.5. Схемы защиты от перенапряжений .....	399
11.6. Молниезащита зданий и сооружений.....	402

11.7. Расчет зоны защиты молниеводов .....	405
Контрольные вопросы .....	407

## **Глава 12**

<b>ЗАЗЕМЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА</b> .....	409
12.1. Общие требования и определения .....	411
12.2. Рабочее и защитное заземление .....	417
12.3. Защитное зануление .....	420
12.4. Конструкции заземляющих устройств .....	425
12.5. Расчет устройств зануления и заземления .....	431
12.6. Технические защитные меры .....	436
Контрольные вопросы .....	440
Темы рефератов .....	440

## **Глава 13**

<b>АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</b> .....	441
13.1. Общие сведения .....	443
13.2. Автоматическое повторное включение .....	443
13.3. Автоматическое включение резервного питания .....	447
13.4. Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок .....	452
13.5. Автоматическая разгрузка по частоте .....	458
13.6. Телемеханизация в системах электроснабжения .....	461
Контрольные вопросы .....	465
Темы рефератов .....	466

## **Глава 14**

<b>ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</b> .....	467
14.1. Общие сведения .....	469
14.2. Тарифы на электроэнергию .....	470
14.3. Учет и контроль электропотребления .....	475
14.4. Измерение электрических величин .....	480
14.5. Испытания заземляющих устройств .....	483
14.6. Определение мест повреждения кабельных линий .....	486
Контрольные вопросы .....	489
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	490
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ .....	492