

31.28я7
С34

Т
А
И
Р
В
А
Л
А
К
А
Б

Ю.Д. Сибикин
М.Ю. Сибикин
В.А. Яшков

Электроснабжение промышленных предприятий и установок

УЧЕБНОЕ
ПОСОБИЕ



ЛА-393826

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ – БАКАЛАВРИАТ

серия основана в 1996 г.



Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин, В.А. Яшков

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И УСТАНОВОК

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

4-е издание, исправленное

Рекомендовано Межрегиональным учебно-методическим советом профессионального образования в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.00 «Электро- и теплоэнергетика» (квалификация (степень) «бакалавр») (протокол № 8 от 22.06.2020)



Москва

2022

Государственное бюджетное
учреждение культуры
«Оренбургская областная универсальная
научная библиотека им. Н.К. Крупской»

09-393826

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Введение	9
Глава 1. Общие вопросы электроснабжения	12
§ 1.1. Общие сведения об электроснабжении	12
§ 1.2. Типы электрических станций и электроэнергетика мира	14
§ 1.3. Современное состояние электроэнергетики России	17
§ 1.4. Схемы электрических соединений	19
Глава 2. Потребители и приемники электроэнергии	27
§ 2.1. Основные характеристики установок электропривода	27
§ 2.2. Основные характеристики установок электротехнологий	30
§ 2.3. Источники света как приемники электроэнергии	33
§ 2.4. Характеристики установок электроосвещения	36
Глава 3. Показатели качества электроэнергии, надежности и эффективности электроснабжения	39
§ 3.1. Классификация приемников электроэнергии по роду тока, напряжению и частоте	39
§ 3.2. Выбор напряжения электрической сети, питающей промышленное предприятие	41
§ 3.3. Выбор напряжения внутривзаводского распределения электроэнергии	42
§ 3.4. Выбор напряжения электрических осветительных сетей	43
§ 3.5. Показатели качества электроэнергии	45
§ 3.6. Показатели надежности электроснабжения	51
§ 3.7. Вероятностные методы в расчетах надежности электроснабжения	60
§ 3.8. Техничко-экономические расчеты в электроснабжении	68
Глава 4. Основное электрооборудование электрических станций и подстанций	73
§ 4.1. Синхронные генераторы	73
§ 4.2. Шинные конструкции и изоляторы	76
§ 4.3. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы	78
§ 4.4. Выключатели высокого напряжения	89
§ 4.5. Разъединители, отделители, короткозамыкатели и заземлители	96

§ 4.6. Выключатели нагрузки, предохранители, разрядники, реакторы...	101
§ 4.7. Измерительные трансформаторы	106
Глава 5. Электрические нагрузки	112
§ 5.1 Исходные данные и этапы учебного проектирования	112
§ 5.2. Характеристики электрических нагрузок.....	114
§ 5.3. Показатели графиков нагрузки.....	119
§ 5.4. Определение расчетной нагрузки	124
§ 5.5. Определение расхода электроэнергии.....	127
§ 5.6. Характерные места расположения расчетных нагрузок в сетях и рекомендации по последовательности их расчетов.....	129
Глава 6. Электрические сети напряжением выше 1000 В.....	134
§ 6.1. Основные понятия и определения	134
§ 6.2. Конструктивное выполнение электрических сетей	135
§ 6.3. Расчет электрических сетей	141
§ 6.4. Определение потерь электрической мощности и электроэнергии....	146
§ 6.5. Выбор площади сечений проводов и жил кабелей.....	149
Глава 7. Подстанции и распределительные устройства	155
§ 7.1. Назначение и классификация подстанций.....	155
§ 7.2. Схемы и основное электрооборудование главных понижительных подстанций	156
§ 7.3. Подстанции на 6...10/0,4...0,66 кВ.....	165
§ 7.4. Распределительные устройства	168
§ 7.5. Электрические измерения, контроль, управление и сигнализация на подстанциях	175
§ 7.6. Выбор числа и мощности трансформаторов	181
Глава 8. Схемы электроснабжения	185
§ 8.1. Принципы построения схем электроснабжения и картограммы электрических нагрузок	185
§ 8.2. Виды схем электроснабжения.....	187
§ 8.3. Особенности схем электроснабжения объектов нефтяной и металлургической промышленности.....	192
§ 8.4. Технико-экономическая оценка вариантов схем электроснабжения	205
Глава 9. Токи короткого замыкания. Выбор и проверка токоведущих частей, изоляторов и аппаратов	208
§ 9.1. Изменение силы тока в трехфазной цепи при коротком замыкании.....	208
§ 9.2. Расчет силы токов короткого замыкания	210
§ 9.3. Действие токов короткого замыкания и ограничение их силы.....	221
§ 9.4. Выбор и проверка токоведущих частей, изоляторов и аппаратов...	225

Глава 10. Релейная защита и автоматика в системах электроснабжения промышленных предприятий.....	230
§ 10.1. Общие вопросы релейной защиты	230
§ 10.2. Классификация реле	231
§ 10.3. Конструкция вторичных реле	233
§ 10.4. Токовая защита.....	235
§ 10.5. Защита силовых трансформаторов и сетей напряжением до 1000 В.....	241
§ 10.6. Автоматика в системах электроснабжения	247
§ 10.7. Самозапуск электродвигателм.....	252
§ 10.8. Диспетчеризация и телемеханизация в системах электроснабжения	255
Глава 11. Распределение электроэнергии при напряжении до 1000 В	257
§ 11.1. Конструктивное выполнение сетей напряжением до 1000 В....	257
§ 11.2. Схемы электрических сетей напряжением до 1000 В.....	261
§ 11.3. Защита электрических сетей и установок напряжением до 1000 В....	264
§ 11.4. Выбор площади сечения проводов и жил кабелей	271
§ 11.5. Расчет сетей электрического освещения.....	275
§ 11.6. Расчет стальных проводов, шинопроводов, токопроводов (троллейных линий)	277
§ 11.7. Оформление чертежей внутрицехового электроснабжения	280
Глава 12. Компенсация реактивной мощности	282
§ 12.1. Основные положения	282
§ 12.2. Компенсирующие устройства	287
§ 12.3. Техничко-экономическое обоснование выбора средств компенсации реактивной мощности	292
§ 12.4. Размещение компенсирующих устройств.....	298
§ 12.5. Регулирование работы компенсирующих устройств.....	299
Глава 13. Элементы техники высоких напряжений в системах электроснабжения	302
§ 13.1. Испытание изоляции	302
§ 13.2. Защита электрооборудования от перенапряжений	304
Глава 14. Защитные меры электробезопасности	308
§ 14.1. Основные сведения и определения	308
§ 14.2. Средства защиты, обеспечивающие безопасность обслуживания электроустановок	318
§ 14.3. Защитное заземление, способы его выполнения	319
§ 14.4. Защитное отключение.....	323
§ 14.5. Конструктивное выполнение и расчет заземляющих устройств	326

Глава 15. Охрана труда и окружающей среды	334
§ 15.1. Общие сведения об охране труда и производственной санитарии	334
§ 15.2. Первая помощь при поражении электрическим током.....	337
§ 15.3. Общие сведения об окружающей среде	342
§ 15.4. Влияние энергетики на биосферу.....	343
§ 15.5. Охрана окружающей среды в россии	345
§ 15.6. Охрана электрических сетей напряжением до 1000 В.....	347
Приложения.....	353
<i>Приложение 1. Примеры изображения принципиальных схем электроустановок напряжением до 1000 В (при курсовом и дипломном проектировании электроснабжения)</i>	<i>353</i>
<i>Приложение 2. Примеры изображения принципиальных однолинейных схем распределительных устройств напряжением выше 1000 В.....</i>	<i>356</i>
<i>Приложение 3. Примеры изображения принципиальных однолинейных схем блочных распределительных подстанций</i>	<i>359</i>
<i>Приложение 4. Примеры изображения планов и компоновок оборудования КТПБ и БРТП</i>	<i>362</i>
Список литературы.....	366

ВВЕДЕНИЕ

Важную роль в развитии отечественной электротехнической промышленности и электроснабжения предприятий сыграли труды выдающихся русских ученых и изобретателей Б.С. Якоби, А.Н. Лодыгина, П.Н. Яблочкова, Ф.А. Пироцкого, Д.А. Лачинова, М.О. Доливо-Добровольского и др.

В 1834 г. член Петербургской Академии наук Б.С. Якоби первым в мире изобрел электродвигатель постоянного тока. Большое влияние на развитие электрических станций оказала изобретенная в 1873 г. А.Н. Лодыгиным электрическая лампа накаливания, которая в скором времени стала основным потребителем электроэнергии. Американский ученый и изобретатель Эдисон произвел свои первые опыты по электрическому освещению только в 1879 г., т. е. на шесть лет позднее русского изобретателя А.Н. Лодыгина. Талантливый русский инженер-изобретатель П.Н. Яблочков в 1876 г. получил патент на электрическую свечу, которая также способствовала быстрому развитию электрического освещения. Яблочков изобрел трансформатор и решил задачу питания группы дуговых ламп от одного генератора.

В 1874 г. Ф.А. Пироцкий произвел опыт по передаче электроэнергии на расстояние до 1 км. В 1880 г. он осуществил передачу электроэнергии по рельсам конной железной дороги в Петербурге.

Большое значение для развития электротехники имела научная работа Д.А. Лачинова «Электромеханическая работа» (1880 г.), опубликованная в журнале «Электричество», где он изложил положения (тезисы), являющиеся основой современной теории передачи электроэнергии.

Гениальный русский ученый и инженер М.О. Доливо-Добровольский заложил научные и инженерные основы современных электрических систем, осуществив установку трехфазного переменного тока и показав все его преимущества по сравнению с постоянным током. Первый генератор и приводимый им в движение электродвигатель переменного тока был построен М.О. Доливо-Добровольским в 1888 г. В 1891 г. он, используя водяную турбину мощностью в 300 л. с. и приводимый ею в движение генератор трехфазного тока мощностью в 200 кВт, передал по воздушной линии электроэнергию на расстояние 175 км. С помощью трехфазного трансформатора напряжение, создаваемое генератором в начале ЛЭП, повышалось до 8500 В, а на конце

линии понижалось до 100 В и использовалось для освещения и приведения в движение электродвигателей на выставке во Франкфурте-на-Майне.

Огромной заслугой Доливо-Добровольского является создание не только генераторов трехфазного тока и трансформаторов, но и асинхронных трехфазных двигателей, являющихся и в настоящее время основными электродвигателями, применяемыми в промышленности. Они надежны в работе, просты по конструкции, дешевы в эксплуатации.

Электрификация играет важнейшую роль в развитии всех отраслей промышленности, является стержнем строительства экономики страны. Отсюда следует необходимость опережающих темпов роста производства электроэнергии.

В условиях разрухи, голода, гражданской войны в 1920 г. Всероссийский съезд Советов утвердил Государственный план электрификации России (ГОЭЛРО), который предусматривал в течение 10–15 лет строительство тридцати новых районных электростанций общей мощностью 1750 МВт, с доведением выработки электроэнергии до 8,8 млрд кВт·ч в год. Этот план был выполнен за 10 лет. С 1930 г. крупные городские районные тепловые электростанции (ГРЭС) стали постепенно объединять в энергетические системы и энергообъединения, которые и в настоящее время остаются главными производителями электроэнергии для подавляющего большинства промышленных предприятий страны.

Принципом развития энергосистемы России является производство электроэнергии на крупных электростанциях, объединяемых в Единую энергосистему общей высоковольтной сетью 500...1150 кВ.

До 1960 г. самые крупные генераторы тепловых электростанций (ТЭС) имели мощность 100 МВт. На одной электростанции устанавливали 6...8 генераторов. Поэтому мощность крупных ТЭС составляла 600...800 МВт. После освоения блоков 150...200 МВт мощность крупнейших электростанций повысилась до 1200 МВт. Переход на блоки 300 МВт позволил увеличить мощность некоторых ТЭС до 2400 МВт.

В настоящее время вводят в эксплуатацию тепловые и атомные электростанции мощностью до 6000 МВт с блоками по 500...800 МВт. Эффективность объединения энергосистем обусловлена экономией суммарной установленной мощности генераторов за счет:

- совмещения максимумов нагрузки энергосистем, сдвинутых во времени в разных географических поясах;
- уменьшения необходимой мощности аварийного и ремонтного резерва в энергообъединении по сравнению с разрозненными системами;

• укрупнения электростанций и улучшения режимов их работы благодаря взаимопомощи объединенных общей сетью энергосистем при отклонениях от плановых балансов выработки и потребления электроэнергии.

Получаемый от объединения энергосистем эффект превышает все затраты на строительство и эксплуатацию межсистемных линий электропередачи.

В настоящее время электроэнергетика России является важнейшей жизнеобеспечивающей отраслью страны. В ее состав входит более 700 электростанций общей мощностью 223 млн. кВт.

В современных условиях главными задачами специалистов, осуществляющих проектирование и эксплуатацию современных систем электроснабжения промышленных предприятий, являются правильное определение электрических нагрузок, рациональная передача и распределение электроэнергии, обеспечение необходимой степени надежности электроснабжения, качества электроэнергии на зажимах электроприемников, электромагнитной совместимости приемников электрической энергии с питающей сетью, экономия электроэнергии и других материальных ресурсов.

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

§ 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ

Электрическую часть всех вновь сооружаемых, реконструируемых, технически перевооружаемых промышленных предприятий выполняют в соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

К промышленным предприятиям относят заводы (в том числе опытные заводы научно-исследовательских институтов), комбинаты, фабрики, шахты, карьеры, производственные и ремонтные базы, типографии, предприятия железнодорожного, водного, воздушного, трубопроводного и городского транспорта, ремонтно-механические заводы «Сельхозтехника» и др.

Действующими электроустановками считают те, которые имеют источники электроэнергии (в том числе химические, гальванические и др.), находящиеся под напряжением полностью или частично, или такие, на которые в любой момент времени может быть подано напряжение включением коммутационной аппаратуры.

Электроснабжение предприятий разделяют на внешнее и внутреннее. При этом под *внешним электроснабжением* понимают комплекс сооружений, обеспечивающих передачу электроэнергии от выбранной точки присоединения к энергосистеме до приемных подстанций предприятия (рис. 1.1).

Внутреннее электроснабжение — это комплекс сетей и подстанций, расположенных, как правило, на территории предприятия и в его цехах.

Проектированию внешнего электроснабжения отдельного предприятия предшествует разработка перспективного плана развития производительных сил данного промышленного района на ближайшие 10–15 лет. На основе этого плана разрабатывается проект развития энергетической системы, включая развитие сетевых устройств. В проекте развития энергосистемы намечаются источники электроэнергии для данного района, их мощность и очередность строительства, определяются места расположения и схемы основных подстанций энергосистемы, от которых намечается осуществлять питание промышленных предприятий, городов и поселков.

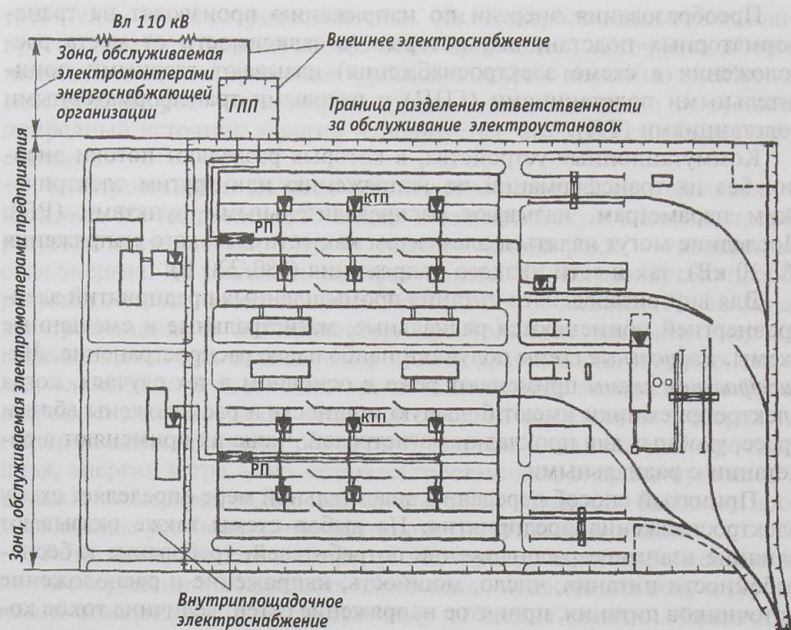


Рис. 1.1. План разводки электрических сетей, размещения трансформаторных подстанций на машиностроительном предприятии и границы зон обслуживания электромонтерами

Разработка проекта электроснабжения промышленного предприятия начинается с изучения технологического процесса и его особенностей. На первой стадии производится изучение взаимной связи отдельных технологических процессов и агрегатов, возможных последствий перерывов в электроснабжении всего предприятия, а также отдельных агрегатов или цехов. Рассчитываются ожидаемые электрические нагрузки цехов и отдельных крупных технологических агрегатов, определяется ожидаемая расчетная нагрузка предприятия в целом. Для крупных предприятий, строящихся очередями, определяется рост нагрузок по годам.

Электроэнергия на пути от источника питания до электроприемника на современных промышленных предприятиях (независимо от их энергоемкости и характера производства), как правило, трансформируется один или несколько раз (по напряжению и току), а потоки ее, по мере приближения к потребителям, дробятся на более мелкие и разветвленные каналы.

ГЛАВА 3 **ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

§ 3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО РОДУ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЮ И ЧАСТОТЕ

Приемники электрической энергии промышленных предприятий классифицируют на следующие группы:

1. Приемники трехфазного тока напряжением до 1000 В и частотой 50 Гц.
2. Приемники однофазного тока напряжением свыше 1000 В и частотой 50 Гц.
3. Приемники трехфазного тока напряжением выше 1000 В и частотой 50 Гц.
4. Приемники постоянного тока, питаемые от преобразовательных подстанций.
5. Приемники нестандартной промышленной частоты, питаемые от преобразовательных подстанций.

Таблица 3.1

**Номинальные напряжения электрических сетей общего назначения до 1000 В,
источников и приемников электрической энергии, В (ГОСТ 721 — 77)**

Постоянный ток		Переменный ток с частотой 50 Гц			
сети и приемники	источники	однофазный		трехфазный	
		сети и приемники	источники	сети и приемники	источники
12	12	12	12	—	—
24	24	24	24	—	—
36	36	36	36	36	36
48	48	42	42	42	42
60	60	(127)*	(133)	(220/127)	(230/133)
110	115	220	230	380/220	400/230
220	230	380	—	660/380	690/400
440	460	—	—	—	—

* Указанное в скобках напряжение для вновь проектируемых сетей не рекомендуется.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

§ 4.1. СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Синхронные генераторы — основное электрооборудование электростанции. Выбранный тип генератора определяет конструкцию всей электростанции и особенности ее эксплуатации. Тип устанавливаемых генераторов зависит главным образом от частоты вращения турбины.

Частота вращения роторов генераторов паротурбинных электростанций (ТЭС, АЭС) при частоте электрического тока 50 Гц принята равной 3000 мин. Сравнительно редко частота вращения принимается равной 1500 мин. Частота вращения гидротурбин обычно находится в пределах от 60 до 500 мин. Частота вращения ротора генератора n , частота переменного тока f (в Гц) и число пар полюсов ротора p связаны известным соотношением

$$n = 60f/p. \quad (4.1)$$

Следовательно, число пар полюсов ротора генератора паротурбинной электростанции (турбогенератора) при частоте $f = 50$ Гц и частоте вращения ротора $n = 3000$ мин должно быть равно 1. На роторах гидрогенераторов при $n = 60$ и 500 об/мин число пар полюсов должно быть соответственно равным $p = 50$ и 6. Конструкция ротора генератора зависит от числа пар полюсов.

Ротор турбогенератора неявнополюсной конструкции выполняется в виде стального цилиндра с продольными пазами, в которые укладывается обмотка возбуждения из полосовой меди, изолированной миканитом. Обмотка возбуждения закрепляется в пазах клиньями, а вне пазов (на лобовых частях) стальными бандажами или каппами. Из-за воздействия на ротор, вращающийся с такой большой частотой, центробежных сил ограничены размеры ротора: диаметр — не более 1250 мм, длина бочки ротора — не свыше 6,5 м.

Ротор гидрогенератора имеет несколько пар выступающих полюсов, т. е. явнополюсную конструкцию. Синхронные двигатели и компенсаторы с частотой вращения ниже 1500 об/мин тоже имеют явнополюсный ротор. Обмотка возбуждения явнополюсных синхрон-

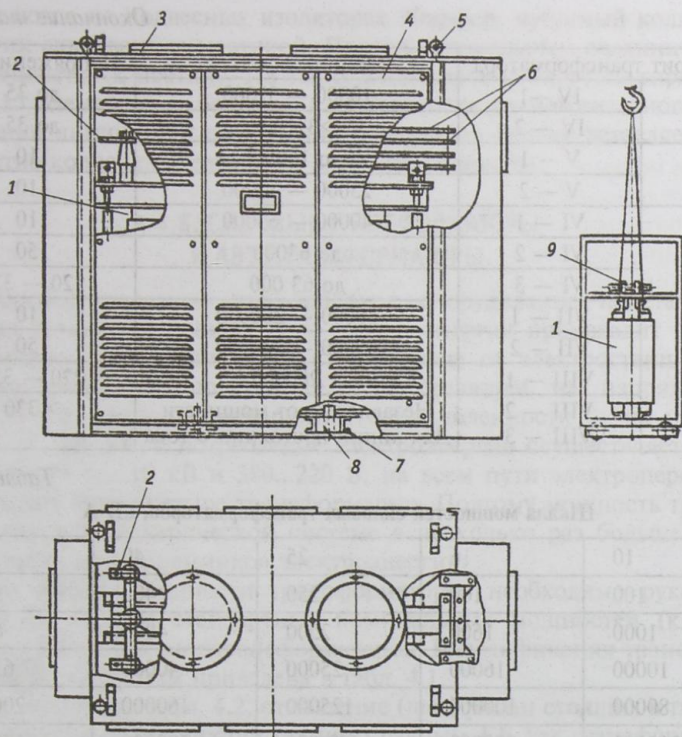


Рис 4.7. Силовой трансформатор ТС:

- 1 — активная часть; 2 — ввод ВН; 3 — крышка люка; 4 — кожух;
 5 — кольцо для подъема трансформатора; 6 — шины НН; 7 — тележка;
 8 — каток; 9 — планка для подъема активной части

ходных изоляторов (вводов) 7...9 электрические цепи обмоток ВН выведены наружу. Над крышкой расположен расширитель 12, сообщающийся трубопроводом с баком. В разрез соединительного трубопровода установлено газовое реле 11. Непосредственно из бака наружу через крышку выведена выхлопная труба 10, нормально закрытая мембраной. Труба предназначена для аварийных выбросов газов и масла наружу. На крышке смонтирована рукоятка 4 переключателя напряжения. Переключатель напряжения 16 расположен под крышкой и соединен с рукояткой валом, проходящим сквозь крышку в сальниковом уплотнении. Контакты переключателя можно электрически соединить с теми или иными регулировочными отводами 18

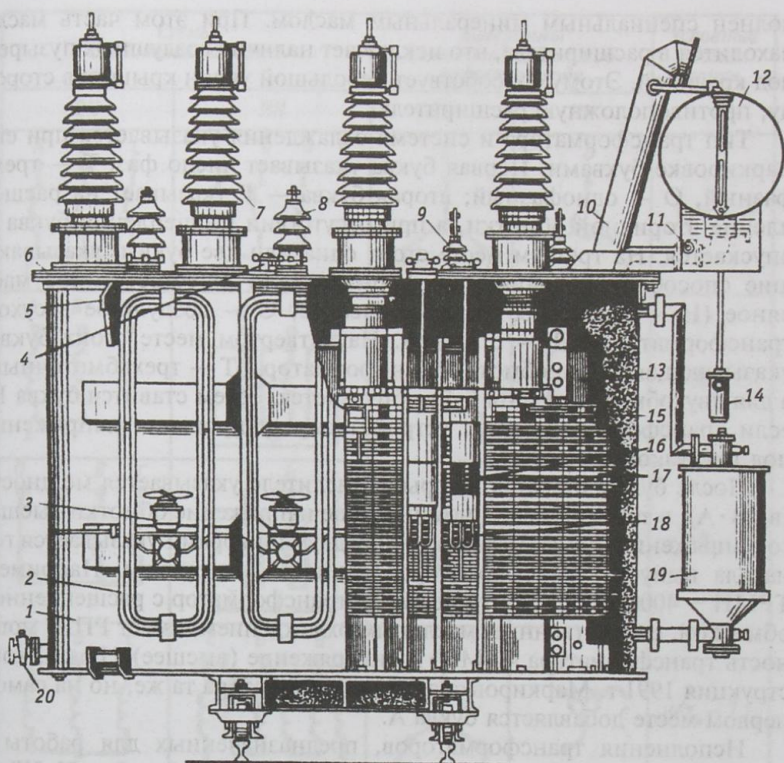


Рис. 4.8. Трансформатор типа ТДТГ-16000/110:

1 — бак; 2 — трубчатый радиатор; 3 — электровентилятор; 4 — привод переключателя напряжения; 5 — ребро жесткости; 6 — крышка; 7 — 9 — проходные изоляторы; 10 — выпускная труба; 11 — газовое реле; 12 — расширитель; 13 — ярмо магнитопровода; 14 — осушитель воздуха; 15 — отвод обмотки ВН; 16 — переключатель напряжения; 17 — обмотка ВН; 18 — регулировочные отводы; 19 — термосифонный фильтр; 20 — сливной кран

обмоток высшего напряжения 17. Крышка сквозными подъемными шпильками соединена с магнитопроводом, установленным на дно бака. Наружная резьбовая часть подъемных шпилек предназначена для накручивания съемных грузовых колец (рымов).

При работе трансформатор нагревается, так как в проводниках обмоток и в стали магнитопровода происходят потери энергии. Для интенсивного удаления избытка теплоты внутренний объем бака за-

ГЛАВА 6

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1000 В

§ 6.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Электрической сетью называют совокупность подстанций и линий электропередач различных напряжений, предназначенных для передачи и распределения электроэнергии.

Линии электропередачи (ЛЭП) — электроустановки, предназначенные для передачи электрической энергии.

По выполнению электрические линии подразделяют на воздушные, кабельные, токопроводы и шинопроводы.

По назначению электрические сети делят на сети внешнего и внутреннего электроснабжения.

Электрические сети промышленных предприятий напряжением выше 1000 В имеют следующие номинальные напряжения: 6, 10, 20, 35, 110 и 220 кВ.

По назначению различают сети питающие, распределительные, местные и районные. *Питающие сети* — передающие электроэнергию сети от энергосистемы предприятиям и основные сети энергосистемы, т. е. сети напряжением 220 кВ и выше. *Распределительные сети* — это сети напряжением до 10 кВ (иногда 20 и 35 кВ), к которым непосредственно присоединяются электроприемники. Распределительными также называют сети более высокого напряжения (110...220 кВ), если они питают большое число приемных подстанций глубокого ввода (ПГВ), расположенных на территории предприятия. *Местные электрические сети* — сети, обслуживающие небольшие районы с относительно малой плотностью нагрузки, напряжением до 35 кВ включительно. *Районные электрические сети* — сети, охватывающие большие районы и связывающие электрические станции системы между собой и с центрами нагрузок, напряжением 110 кВ и выше.

К электрическим сетям предъявляются требования надежности, экономичности, безопасности и удобства в эксплуатации, возможности индустриализации строительных и монтажных работ.

Конец ознакомительного фрагмента

Уважаемый читатель!

**Размещение полного текста данного
произведения невозможно в связи с ограничениями
по IV части ГР РФ.**

**Эту книгу вы можете почитать в Оренбургской
областной универсальной научной библиотеке
им. Н. К. Крупской по адресу: г. Оренбург,
ул. Советская, 20; тел. для справок: (3532) 60-61-28**