

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Учебник
В двух томах

Т о м 1

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ А. Г. ГОДЖЕЛЛО, Ю. К. РОЗАНОВА

Допущено

*Учебно-методическим объединением по образованию в области энергетики
и электротехники в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
«Электротехника, электромеханика и электротехнологии»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2010

УДК 621.3.038(075.8)
ББК 31.264я73
Э454

Рецензенты:

зав. кафедрой электрических и электронных аппаратов Чувашского
Государственного университета им. И. Н. Ульянова, канд. техн. наук *Е. Г. Егоров*;
проф. кафедры Военной академии РВСН им. Петра Великого,
д-р техн. наук *А. А. Гуров*

Э454 **Электрические** и электронные аппараты. В 2 т. Т. 1.
Электромеханические аппараты : учебник для студ.
высш. учеб. заведений / [Е. Г. Акимов и др.] ; под ред.
А. Г. Годжелло, Ю. К. Розанова. — М. : Издательский центр
«Академия», 2010. — 352 с.
ISBN 978-5-7695-6253-2

Рассмотрены основы теории электромеханических аппаратов,
описаны устройства и принципы действия аппаратов автоматики,
управления и защиты, аппаратов высокого напряжения. Приведены
основные конструкции и характеристики аппаратов, режимы их ра-
боты, условия выбора и эксплуатации.

Для студентов учреждений высшего профессионального образо-
вания.

УДК 621.3.038(075.8)
ББК 31.264я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение
любым способом без согласия правообладателя запрещается*

ISBN 978-5-7695-6253-2 (т. 1) © Коллектив авторов, 2010
ISBN 978-5-7695-6254-9 © Образовательно-издательский центр «Академия», 2010
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Глава 1

Тепловые процессы в электрических аппаратах

1.1. Источники теплоты в электрических аппаратах	11
1.2. Способы распространения теплоты в электрических аппаратах	13
1.3. Задачи и стадии тепловых расчетов электрических аппаратов	15
1.4. Теплоотдача конвекцией и излучением с поверхностей электрических аппаратов	17
1.5. Теплопроводность в конструктивных элементах электрических аппаратов	20
1.6. Режимы работы электрических аппаратов	24
1.7. Термическая стойкость электрических аппаратов	28

Глава 2

Контактные явления в электрических аппаратах

2.1. Классификация электрических контактов	33
--	----

2.2. Контактная поверхность и контактное сопротивление	34
2.3. Математическая модель электрических контактов	37
2.4. Влияние переходного сопротивления контактов на нагрев проводников.....	40
2.5. Температура площадки касания электрических контактов.....	42
2.6. Сваривание электрических контактов	45

Глава 3

Электромагнитные явления в электрических аппаратах

3.1. Электромагнитные величины	49
3.2. Электромагнитные свойства материалов.....	56
3.3. Электромагнитное поле в электрических аппаратах	65
3.3.1. Составляющие и источники векторного поля	65
3.3.2. Статическое и стационарное электрическое и магнитное поле	67
3.3.3. Распределение намагниченности в деталях магнитной системы.....	76
3.3.4. Квазистационарное электромагнитное поле	85
3.4. Потокосцепления, индуктивности и электродвижущая сила катушек	88
3.5. Расчет сил в электромагнитном поле.....	92
3.6. Представление процессов с помощью макромоделей	98
3.7. Анализ процессов в электромеханической системе электрического аппарата	121

Глава 4

Электродинамическая стойкость электрических аппаратов

4.1. Расчет электродинамических усилий на основе закона Ампера.....	131
4.2. Расчет электродинамических усилий по энергетическим зависимостям	133
4.3. Электродинамические усилия при переменном токе	135

Глава 5

Основные коммутационные процессы

5.1. Общие закономерности коммутационных процессов	141
5.1.1. Понятие о коммутации.....	141
5.1.2. Идеальный коммутационный аппарат	141
5.1.3. Неидеальный коммутационный аппарат.....	143
5.1.4. Условия успешной коммутации цепи.....	144
5.2. Коммутация токов короткого замыкания.....	146
5.2.1. Токи короткого замыкания и их параметры	146
5.2.2. Коммутационные процессы при включении на короткое замыкание	148
5.2.3. Коммутационные процессы при отключении тока короткого замыкания у выводов выключателя	148
5.2.4. Отключение тока короткого замыкания выключателем с плотной дугогасительной средой	153
5.2.5. Отключение тока короткого замыкания вакуумными выключателями.....	155
5.2.6. Отключение неудаленного короткого замыкания	156
5.3. Коммутация малых индуктивных токов	159
5.3.1. Включение цепи с ненагруженным трансформатором...	159
5.3.2. Отключение малых индуктивных токов. Явления, связанные со срезом тока и повторными зажиганиями дуги.....	160
5.4. Отключение емкостных токов	162

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Глава 6

Электромеханические аппараты автоматики

6.1. Электромеханические реле	165
6.1.1. Основные термины и определения.....	167
6.1.2. Электромагнитные реле.....	171
6.1.3. Поляризованные электромагнитные реле.....	176

6.1.4. Тенденции развития электромагнитных реле. Реле на основе микроэлектромеханических систем.....	180
6.1.5. Индукционные реле.....	184
6.2. Магнитоуправляемые герметизированные контакты и герконовые аппараты	187
6.3. Электромеханические датчики	193
6.3.1. Основные понятия, определения и классификация.....	193
6.3.2. Пассивные датчики.....	196
6.3.3. Активные датчики.....	201
6.4. Коммутационные аппараты автоматики ручного и механического управления	203
6.4.1. Микропереключатели	203
6.4.2. Тумблеры	206
6.4.3. Кнопочные переключатели	208
6.4.4. Поворотные переключатели.....	209

Глава 7

Низковольтная аппаратура распределения и управления

7.1. Тепловые реле и расцепители перегрузки	212
7.2. Плавкие предохранители	217
7.2.1. Определения и элементы предохранителей	217
7.2.2. Классификация предохранителей.....	218
7.2.3. Характеристика и параметры предохранителей.....	221
7.3. Выключатели нагрузки и разъединители низкого напряжения.....	225
7.4. Автоматические выключатели	227
7.4.1. Назначение, функции, устройство и параметры автоматических выключателей	227
7.4.2. Модульные автоматические выключатели	235
7.4.3. Автоматические выключатели в литом корпусе.....	238
7.4.4. Сильноточные воздушные автоматические выключатели.....	239
7.4.5. Координация автоматических выключателей. Селективность и каскадное включение.....	240
7.5. Аппараты, управляемые дифференциальным током	244

7.5.1. Функциональное назначение	244
7.5.2. Токоведущие проводники и заземления в электрических сетях.....	247
7.5.3. Конструкция и принцип действия устройств защитного заземления	248
7.5.4. Дифференциальный трансформатор тока.....	250
7.5.5. Параметры и характеристики устройств защитного отключения.....	252
7.5.6. Аппараты защиты от замыканий на землю	256
7.6. Контакторы и пускатели	257
7.6.1. Основные характеристики контакторов.....	257
7.6.2. Пускатели	261
7.6.3. Конструктивные особенности контакторов.....	264
7.6.4. Динамика срабатывания электромагнитов контакторов	274
7.7. Трансформаторы тока	278
7.7.1. Назначение, классификация и основные параметры ...	278
7.7.2. Электромагнитные трансформаторы тока	279
7.7.3. Оптико-электронные трансформаторы тока.....	285
7.7.4. Воздушные трансформаторы тока	285
7.8. Методика выбора низковольтных электрических аппаратов распределения и управления	287
7.8.1. Методика выбора контакторов и магнитных пускателей для управления и защиты асинхронных двигателей	288
7.8.2. Методика выбора автоматических выключателей для защиты электрических цепей с асинхронными двигателями	291
7.8.3. Особенности выбора средств защиты цепей общего назначения.....	295
7.8.4. Особенности защиты осветительных приборов и силовых полупроводниковых устройств	296

Глава 8

Аппараты высокого напряжения

8.1. Особенности и классификация электрических аппаратов высокого напряжения.....	301
---	-----

8.1.1. Особенности аппаратуры высокого напряжения	301
8.1.2. Классификация АВН	302
8.1.3. Основные параметры АВН.....	304
8.2. Выключатели высокого напряжения.....	305
8.2.1. Элегазовые выключатели.....	306
8.2.2. Вакуумные выключатели	311
8.2.3. Перспективы развития коммутационной аппаратуры высокого напряжения	316
8.3. Измерительные трансформаторы	317
8.3.1. Измерительные трансформаторы тока высокого напря- жения	317
8.3.2. Измерительные трансформаторы напряжения	319
8.4. Защитные и токоограничивающие аппараты высокого напря- жения.....	323
8.4.1. Разрядники и ограничители перенапряжений.....	323
8.4.2. Реакторы	325
8.5. Комплектные распределительные устройства высокого напря- жения.....	327
Список литературы.....	336

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие современной техники невозможно без широкого использования электрических и электронных аппаратов — устройств управления потоками энергии и информации, осуществляющих следующие функции:

- включение и отключение электрических цепей объектов, принимающих участие в получении, преобразовании, передаче, распределении и потреблении электроэнергии;
- контроль и изменение параметров указанных объектов;
- защита объектов от несанкционированных режимов работы;
- управление технологическими процессами;
- регулирование (поддержание на неизменном уровне или изменение по определенному закону) параметров отмеченных выше объектов;
- преобразование неэлектрических величин в электрические;
- создание магнитного поля с определенными параметрами и направлением в заданном объеме.

Авторы основное внимание уделили описанию фундаментальных законов, раскрытию общих характеристик большинства разнообразных аппаратов, а также выявлению особенностей каждого из них, не стремясь подробно рассматривать возможные конструкции аппаратов, методы их расчета и проектирования. По мнению авторов, это позволяет получить более глубокие и разносторонние знания.

Независимо от назначения, области применения, принципа действия, конструктивного исполнения, все электрические аппараты можно подразделить на две большие группы:

1) электромеханические, непременно содержащие подвижные элементы, в результате перемещения которых и осуществляется функционирование аппарата;

2) статические (иногда называемые бесконтактными) или силовые электронные, не имеющие подвижных частей и осуществляющие возложенную на них функцию в результате изменения параметров и характеристик входящих в их состав элементов и блоков.

Исходя из этого учебник разделен на два тома: в первом рассматриваются общие аспекты, присущие всем аппаратам, и детально описываются электромеханические аппараты; во втором внимание уделено силовым электронным аппаратам.

При написании первого тома учебника работа между авторами была распределена следующим образом: предисловие и введение — д-р техн. наук, проф. Ю. К. Розанов; гл. 1 и гл. 4 — д-р техн. наук, проф. В. Г. Дегтярь; гл. 2 — канд. техн. наук, проф. А. Г. Годжелло; гл. 3 — д-р техн. наук, проф. П. А. Курбатов; гл. 5 — д-р техн. наук, проф. Г. С. Белкин; гл. 6 — д-р техн. наук, проф. В. Н. Шоффа, канд. техн. наук, доц. Ю. С. Коробков и канд. техн. наук, доц. А. В. Савельев; гл. 7 — канд. техн. наук, доц. Н. А. Ведешенков, канд. техн. наук, проф. А. Г. Годжелло, ст. преподаватель А. В. Калашникова, д-р техн. наук, проф. В. Е. Райнин, канд. техн. наук, доц. Е. П. Попова и канд. техн. наук, доц. Е. Г. Акимов; гл. 8 — д-р техн. наук, проф. Г. С. Белкин, канд. техн. наук, доц. Н. А. Ведешенков, проф. А. П. Бурман и канд. техн. наук, доц. М. А. Жаворонков.

Авторы выражают глубокую признательность всем сотрудникам кафедры электрических и электронных аппаратов Московского энергетического института, принимавшим участие в обсуждении рукописи, а также аспирантам и студентам кафедры.

ВВЕДЕНИЕ

Электрические аппараты (ЭА) — это электротехнические устройства, применяемые при использовании электрической энергии, начиная от ее производства, передачи, распределения и кончая потреблением. Разнообразие видов ЭА и различие традиций мировых электротехнических школ затрудняют их классификацию. Это еще больше усугубляется многозначностью и неопределенностью самого термина «аппарат» (*лат.* «apparatus» — техническое устройство). В России данный термин был распространен с 1879 г. известным электротехником П. Н. Яблочковым на следующие электротехнические устройства того времени: рубильники, переключатели, коммутаторы, реле и регуляторы.

В настоящее время под ЭА понимают электротехнические устройства управления потоками энергии и информации. При этом речь может идти о потоках энергии различного вида: электрической, механической, тепловой и др. Например, потоком механической энергии от двигателя к технологической машине может управлять электромагнитная муфта, а потоками тепловой энергии — система электромагнитных клапанов и заслонок. Подобных случаев использования ЭА можно привести большое количество. Примером использования ЭА для управления информацией является применение реле в телефонии: при создании телеграфного аппарата П. Л. Шиллинг в 1820 г. впервые использовал электромагнитное реле. Простейшая формально-логическая обработка дискретной информации также может быть реализована электромагнитными реле.

Однако наибольшее распространение получили ЭА для управления потоками электрической энергии, для изменения режимов работы, регулирования параметров, контроля и защиты электротехнических систем и их составных частей. Как правило, функции таких ЭА осуществляются посредством коммутации (включения и отключения) электрических цепей с различной частотой, начиная от относительно редких, нерегулярных значений до периодических высокочастотных, например, в импульсных регуляторах напряжения.

Одним из основных признаков классификации ЭА является напряжение. По этому признаку различают аппараты низкого (до 1 000 В) напряжения (АНН) и аппараты высокого (свыше 1 000 В) напряжения (АВН).

Большинство аппаратов низкого напряжения условно можно подразделить на следующие основные виды:

- управления и защиты — автоматические выключатели, контакторы, реле, пускатели электродвигателей, переключатели, рубильники, предохранители, кнопки управления и другие аппараты, управляющие режимом работы оборудования и его защитой;
- автоматического регулирования — стабилизаторы и регуляторы напряжения, тока, мощности и других параметров электрической энергии;
- автоматики — реле, датчики, усилители, преобразователи и другие аппараты, осуществляющие функции контроля, усиления и преобразования электрических сигналов.

Следует отметить, что АНН иногда классифицируют по величине коммутируемого тока: слаботочные (до 10 А) и сильноточные (свыше 10 А). При этом нижние пределы коммутируемых современными ЭА токов достигают 10 А, а напряжений — 10 В.

Аппараты высокого напряжения работают в сетях с напряжением до 1 150 кВ переменного тока и 750 кВ постоянного тока и также существенно различаются по своим функциям. К АВН обычно относят следующие основные виды аппаратов:

- выключатели высокого напряжения, обеспечивающие включение и отключение электрических цепей в различных режимах работы, включая аварийные, например, короткое замыкание (КЗ);
- токоограничивающие реакторы для ограничения токов КЗ и шунтирующие реакторы для ограничения перенапряжений и реактивной мощности;
- ограничители перенапряжений на основе разрядников и элементов с нелинейной вольт-амперной характеристикой, например, оксидо-цинковые ограничители перенапряжений (ОПН);
- разъединители и отделители для отключения цепи без тока при ремонте электрооборудования;
- измерительные трансформаторы для высоковольтных цепей.

Электрические аппараты как низкого, так и высокого напряжения обычно являются конструктивно законченными техническими устройствами, реализующими определенные функции и рассчитанными на разные условия эксплуатации.

В основе большинства электромеханических ЭА лежит контактная система с различными типами приводов: ручным, электромагнитным, механическим и др. Процессы, протекающие в ЭА,

определяются различными и многообразными физическими явлениями, которые изучаются в электродинамике и других фундаментальных науках. В процессе усовершенствования ЭА существенно изменяли свои функциональные возможности и принцип действия.

Создание и развитие ЭА неразрывно связано с историей электротехники. Первые образцы новых видов ЭА появились в конце XIX в. Большой вклад в их разработку внесли отечественные электротехники. Так, например, В. Н. Чиколевым были созданы первые сигнальные электромагнитные реле и автоматические выключатели с дистанционным управлением, автоматический регулятор напряжения для возбуждения генератора и предохранители. Другим ярким примером служат работы М. О. Доливо-Добровольского. Он разработал и впервые применил пусковой реостат к асинхронным двигателям, минимально-максимальное токовое реле, автотрансформатор для регулирования, автоматический выключатель с пружинными контактами, дугогасительное устройство, деионную решетку с электромагнитами для затягивания дуги в щель камеры. Период, ознаменовавшийся началом промышленного выпуска названных устройств, можно считать стартовым для широкого использования электрических аппаратов.

Одним из основных видов ЭА является выключатель электрических цепей высокого напряжения, используемый в системах электропередач. Совершенствование этого вида ЭА непосредственно зависело от развития теории электрической дуги и способов ее эффективного гашения. В начале XX в. появились первые выключатели, в которых гашение дуги происходило под воздействием продуктов термического разложения минерального масла, в котором располагались неподвижные части контактов ЭА. Первые масляные выключатели были созданы на напряжение от 6 до 110 кВ. В период с 1910-го по 1914 гг. М. О. Доливо-Добровольским было предложено гашение дуги в узких щелях дугогасительных камер, в которых длинная дуга попадала под воздействие магнитного дутья, т.е. под воздействие электромагнитных сил в контактной системе ЭА. В развитие теории дуги, установления ее электронной природы большой вклад внес русский ученый В. Ф. Миткевич. В последующее время методы гашения дуги постоянно совершенствовались учеными — электротехниками многих стран мира, среди которых можно назвать таких отечественных ученых, как А. Я. Буйлов, Г. Т. Третьяк, Г. В. Буткевич, О. Б. Брон, Г. А. Кукеков, А. М. Залесский, И. С. Таев и др. Одним из направлений дальнейшего совершенствования масляных выключателей являлось применение многоразрывных дугогасительных систем. К недостаткам, ограничивающим развитие масляных выключателей, относятся такие факторы, как пожароопасность, относительно

большие габаритные размеры, повышенные эксплуатационные расходы и др.

Практически одновременно с масляными выключателями начали разрабатываться и воздушные. Принцип действия воздушных выключателей основан на гашении дуги сжатым воздухом. Был разработан ряд модификаций воздушных выключателей с дугогасительными устройствами на основе нескольких разрывов дуги. Также создавались конструкции на основе втягивания дуги в деионные решетки за счет магнитного поля, без применения сжатого воздуха. Одним из недостатков воздушных выключателей, используемых в населенных пунктах, является сильный шум при выбросе в атмосферу отработавшего воздуха.

Стремление к уменьшению габаритных размеров выключателя и повышению удельных показателей коммутации привело к использованию элегаза (шестифтористой серы) вместо воздуха. Применение элегаза позволило сохранить преимущества воздушного выключателя по сравнению с масляным с точки зрения пожарной опасности. Отечественные элегазовые аппараты были созданы в конце 1970-х гг., а в середине 1980-х гг. был изготовлен первый в мире образец комплектного распределительного устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ) на напряжение 1150 кВ. В соответствии с экологическими требованиями элегазовые выключатели имеют замкнутый цикл функционирования без выброса отработанных газов в атмосферу.

В области выключателей среднего напряжения 3—35 кВ эффективно направление, связанное с использованием вакуума, имеющего высокую электрическую прочность. Это позволяет создать экологически чистые выключатели с большим сроком службы и отличающиеся компактностью и малыми эксплуатационными расходами.

Необходимым электрическим аппаратом для эксплуатации электрических цепей высокого напряжения является разъединитель. Первые разработки этого ЭА появились в начале XX в. Совершенствование его конструкции шло в основном по пути улучшения механических и электрических характеристик изоляторов. Так, например, переход от фарфоровых изоляторов к полимерным позволил существенно повысить рабочее напряжение разъединителей.

Среди оборудования, защищающего электрические системы от различного рода перенапряжений, важную роль выполняют разрядники и шунтирующие реакторы. Первые разрядники осуществляли защиту от перенапряжений посредством искрового пробоя воздушного промежутка. В 1930-х гг. стали широко использовать трубчатые разрядники многократного действия. В настоящее время в качестве разрядников в основном используются нелинейные резисторы на основе оксида цинка.

Совершенствование шунтирующих реакторов шло по пути повышения их быстродействия за счет управления процессом подмагничивания посредством включения дополнительных обмоток тиристорами.

Основным аппаратом для включения, отключения и защиты оборудования от КЗ и перегрузки является автоматический электромагнитный выключатель (автомат). Практическое применение автоматов расширялось одновременно с развитием массового потребления электроэнергии в промышленности и коммунальном хозяйстве. Развитие автоматов шло главным образом по пути совершенствования механизмов расцепителей, обеспечивающих защиту от токов КЗ и перегрузки. Одновременно улучшались его дугогасительные свойства и конструкция. Автомат является основным выключателем, обеспечивающим селективность отключения короткозамкнутой цепи от остальной системы электроснабжения. Селективное отключение определяется, как правило, времятоковыми характеристиками защиты автомата.

В настоящее время для повышения эффективности защиты используется микропроцессорная техника. Кроме того, многие типы автоматов включают в себя защиту от замыкания фаз на землю. Микропроцессорная техника в некоторых автоматах применяется также для контроля гармонического состава тока, протекающего через автомат.

Для автоматизации электропривода и в некоторых других случаях широко используются устройства автоматического многократного включения и выключения — контакторы. Первые контакторы начали применяться примерно в тот же временной период, что и автомат. Основной тенденцией развития контакторов с начала их создания и до настоящего времени является повышение электрической и механической износостойчивости, что в конечном итоге повышает число их коммутаций, а следовательно, и ресурс работы. Развитие принципов конструирования автоматов и контакторов осуществлялось во многом благодаря деятельности представителя СССР в Международной электротехнической комиссии Р. С. Кузнецова. Создание мощной низковольтной аппаратуры было бы невозможно без теоретического анализа тепловых и контактных явлений, который был развит классическими трудами Г. Т. Третьяка и Н. Е. Лысова.

В классе ЭА автоматики и защиты наиболее распространенным видом являются реле. Первые реле появились в конце XIX в. и нашли широкое применение в системах телефонной и телеграфной связи, а в 1930-х гг. — для обеспечения релейной защиты в системах электроснабжения. Для этих целей были созданы различные конструкции реле максимального тока, минимального напряжения, дифференциальное реле обратной мощности и др.

В 1930-х гг. была разработана конструкция индукционного реле, на основе которой созданы защитные реле с регулируемой выдержкой времени, зависящей от значения контролируемого тока. Для повышения быстродействия реле была выполнена конструкция на основе контактных упругих консолей из ферромагнитного материала. Эта конструкция получила развитие в реле с герметичными контактами, названных герконами. В настоящее время реле являются одним из основных устройств автоматики электротехнических систем. Многие типы реле имеют дополнительные электронные компоненты логики и микропроцессорной техники, расширяющие их функции. Совершенствование многих видов реле связано с работами отечественных ученых: Р. А. Аронова, Н. Е. Лысова, Б. К. Буля, А. Ф. Сотскова, И. И. Пеккера, А. Г. Никитенко, А. Г. Сливинской, А. В. Гордона, М. А. Любчика, Ф. А. Ступеля и др.

ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Глава 1

Тепловые процессы в электрических аппаратах

1.1. Источники теплоты в электрических аппаратах

При протекании электрического тока I по проводнику в нем выделяется теплота мощностью

$$P = I^2 R, \quad (1.1)$$

где R — активное электрическое сопротивление проводника.

Для однородного проводника длиной l с равномерной по поперечному сечению S плотностью постоянного тока

$$R = \frac{\rho l}{S}. \quad (1.2)$$

Удельное электрическое сопротивление ρ материала проводника зависит от температуры ϑ и в большинстве случаев (до температуры 150—200 °С) вычисляется как

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\vartheta), \quad (1.3)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при температуре 0 °С; α — температурный коэффициент сопротивления.

Как известно из курса теоретических основ электротехники, *поверхностным эффектом* называется явление неравномерного распределения плотности переменного тока по поперечному сечению одиночного проводника, а *эффектом близости* — явление неравномерного распределения плотности переменного тока, обусловленное влиянием друг на друга близко расположенных проводников с токами.

Неравномерность распределения плотности тока при поверхностном эффекте приводит к возникновению дополнительных по сравнению с постоянным током потерь мощности, которые учитываются коэффициентом поверхностного эффекта $k_{\pi} \geq 1$.

Было установлено, что коэффициент поверхностного эффекта для немагнитных проводников зависит от формы и геометрических размеров проводника, а также от соотношения $\sqrt{f/R_{100}}$, где f — частота переменного тока; R_{100} — активное электрическое сопротивление постоянному току проводника длиной $l = 100$ м.

Коэффициент близости k_6 так же, как и коэффициент поверхностного эффекта, зависит от выражения $\sqrt{f/R_{100}}$, геометрических размеров, формы проводников и расстояния между ними. В отличие от коэффициента поверхностного эффекта, коэффициент близости может быть больше, меньше или равным единице. (Значения коэффициентов k_{π} и k_6 для наиболее типичных случаев приведены в справочной литературе [5].)

Таким образом, в общем случае выражение (1.1) приобретает вид

$$P_{\sim} = k_{\pi} k_6 P_{\pm} = k_{\pi} k_6 I^2 R_{\pm}, \quad (1.4)$$

где $P_{\sim}$, $P_{\pm}$ — потери мощности при переменном и постоянном токе соответственно; $R_{\pm}$ — активное сопротивление постоянному току.

В проводниках из ферромагнитных материалов явления поверхностного эффекта и эффекта близости проявляются значительно сильнее, а коэффициенты k_{π} и k_6 в этих случаях существенно больше, чем в проводниках из немагнитных материалов при прочих равных условиях. Профессором Н. Е. Лысовым была предложена эмпирическая формула для вычисления потерь мощности при протекании переменного тока по проводникам из ферромагнитного материала [5]

$$P_{\sim} = (2,9 \dots 3,25) 10^{-4} \left(\frac{I}{\Pi} \right)^{5/3} S_{\text{охл}} \sqrt{f}, \quad (1.5)$$

где $S_{\text{охл}}$, Π — площадь поверхности охлаждения и периметр поперечного сечения проводника соответственно.

В ферромагнитных нетоковедущих частях электрического аппарата, находящихся в переменном магнитном поле, также имеют место источники теплоты, которые обусловлены вихревыми токами, потерями на перемагничивание и гистерезис, возникающими тогда, когда переменный во времени магнитный поток пронизывает ферромагнитные части аппарата.

В сплошном замкнутом магнитопроводе расчет потерь мощности можно производить по формуле (1.5), в которую вместо тока I необходимо подставить значение магнитодвижущей силы (МДС)

IN , где N — число витков катушки, а вместо периметра Π — длина средней магнитной силовой линии $l_{\text{ср}}$. Этой же формулой можно пользоваться и при определении потерь мощности для случая, когда токопровод находится внутри кольца из ферромагнитного материала.

Если магнитопровод выполнен шихтованным из листовой электротехнической стали, то потери мощности в нем определяются на основании приведенных в справочной литературе зависимостей удельных потерь от амплитудного значения индукции, частоты тока, толщины листа и сорта стали [5].

Ферромагнитные части аппарата могут нагреваться в переменном магнитном поле, даже если они не образуют замкнутую систему для магнитного потока [23].

Выше были рассмотрены основные, наиболее общие для всех электрических аппаратов источники теплоты. Имеется еще ряд источников теплоты, которые в одних аппаратах играют существенную роль, а в других эта роль настолько мала, что данными источниками можно пренебречь.

Так, в электромеханических аппаратах, предназначенных для коммутации электрических цепей, мощным источником теплоты является электрическая дуга. В других аппаратах потери на трение или удар составляют довольно большую долю от общих потерь мощности. Электрические аппараты, имеющие движущиеся жидкости или газы, должны быть рассчитаны с учетом гидравлических потерь, а изоляция высоковольтных и высокочастотных аппаратов — с учетом диэлектрических потерь.

1.2. Способы распространения теплоты в электрических аппаратах

Различают три способа распространения теплоты в пространстве: теплопроводность, тепловое излучение и конвекция.

Теплопроводность — распространение тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц или тел, имеющих разную температуру.

В соответствии с законом Фурье количество теплоты d^2Q , проходящее через элементарную площадку изотермической поверхности dS за промежуток времени dt , определяется как

$$d^2Q = -\lambda \frac{d\vartheta}{dn} dS dt, \quad (1.6)$$

где λ — теплопроводность; $\frac{d\vartheta}{dn}$ — производная от температуры по направлению нормали к площадке dS .

Для большинства веществ в определенном диапазоне температуры теплопроводность зависит от температуры линейно, т. е.

$$\lambda = \lambda_0 [1 + \beta(\vartheta - \vartheta_0)],$$

где λ_0 — теплопроводность при температуре $\vartheta = \vartheta_0$; β — температурный коэффициент теплопроводности.

Тепловое излучение — процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн. Совокупность процессов взаимного излучения, поглощения, отражения и пропускания энергии в системе различных тел называют теплообменом излучением.

В общем случае плотность собственного излучения подчиняется закону Стефана — Больцмана:

$$p = 5,67\varepsilon \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (1.7)$$

где p — плотность теплового потока; ε — коэффициент излучения тела ($0 \leq \varepsilon \leq 1$); T — температура поверхности тела, измеряемая в градусах Кельвина.

Конвекция — распространение теплоты при перемещении объемов жидкостей или газов в пространстве из областей с одной температурой в области с другой температурой.

Различают вынужденную и естественную конвекцию. При вынужденной конвекции жидкость или газ движутся за счет внешних сил (например, под действием насоса, вентилятора и т. п.). При естественной конвекции движение происходит за счет выталкивающих сил (Архимеда), возникающих из-за различных плотностей холодных и горячих объемов жидкости или газа.

Поскольку конвекция обусловлена движением жидкости или газа и при конвекции неизбежно соприкосновение частиц с различной температурой, что сопровождается теплопроводностью, при аналитическом описании процесса конвекции в систему уравнений войдут уравнение теплопроводности с учетом массообмена (уравнение энергий), уравнение движения жидкости (уравнение Навье — Стокса), уравнение неразрывности жидкости или газа, а также условия однозначности (начальные и граничные условия).

Решение системы дифференциальных уравнений часто вызывает большие трудности. Поэтому при инженерных расчетах используют формулу Ньютона, в соответствии с которой тепловой поток (количество теплоты в единицу времени) от поверхности твердого тела к окружающей среде (жидкости или газу) или, наоборот, от окружающей среды к поверхности тела пропорционален площади охлаждающей поверхности тела $S_{\text{охл}}$ (поверхности со-

прикосновения твердого тела со средой) и разности температуры поверхности ϑ и среды $\vartheta_{\text{окр}}$, т. е.

$$P = k_t S_{\text{охл}} (\vartheta - \vartheta_{\text{окр}}), \quad (1.8)$$

где k_t — коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением.

1.3. Задачи и стадии тепловых расчетов электрических аппаратов

Источники теплоты в электрических аппаратах при их работе образуют температурное поле

$$\vartheta = \vartheta_0(x, y, z, t). \quad (1.9)$$

Максимальное значение температуры при этом не должно превышать допустимого значения, которое зависит от многих факторов и устанавливается стандартами.

Кроме допустимой температуры, стандартами установлена температура окружающей среды. Для большинства электрических аппаратов при расчете длительных режимов работы температура окружающей среды (воздуха) принимается равной 35 °С [23].

Задачей теплового расчета в общем случае является определение мощности источников теплоты и расчет параметров температурного поля, причем максимальная температура не должна быть выше допустимой.

На предварительной стадии теплового расчета необходимо выявить источники теплоты в электрическом аппарате, выдать рекомендации по уменьшению их мощности и оценить возможность уменьшения максимальной температуры до допустимого значения при условии наименьшего расхода материалов на электрический аппарат.

Для уменьшения мощности источников теплоты в электрических аппаратах принимаются следующие меры:

- применяют проводниковые материалы с малым удельным сопротивлением;
- при резко выраженном поверхностном эффекте используют трубчатые проводники, чем достигается более равномерное распределение плотности тока по поперечному сечению проводника;
- при наличии составных шин их располагают таким образом, чтобы поверхностный эффект и эффект близости оказывали возможно меньшее влияние на мощность источников теплоты;
- если применяют пакет параллельно расположенных шин, то крайние шины пакета снабжают ферромагнитными бандажами, которые снижают коэффициент близости;

- в нетоковедущих частях, находящихся вблизи проводников с переменными токами, используют неферромагнитные материалы (немагнитный чугун, латунь, бронза и т. п.);
- в нетоковедущих ферромагнитных деталях на пути магнитного потока выполняют прорезы, причем полученный таким образом воздушный промежуток часто заполняют немагнитным материалом (заваривают неферромагнитным электродом);
- на пути магнитного потока в ферромагнитных деталях устанавливают короткозамкнутые витки.

Перечисленные меры далеко не полностью охватывают все возможные способы уменьшения мощности источников теплоты. В каждом конкретном случае с этой целью необходимо проводить дополнительные специальные исследования.

После выработки технических решений по снижению мощности источников теплоты следует выявить пути уменьшения максимальной температуры в электрическом аппарате. Из формулы Ньютона (1.8) видно, что при постоянных значениях мощности P и температуры окружающей среды $\vartheta_{\text{окр}}$ температуру поверхности тела ϑ можно уменьшить за счет увеличения коэффициента теплоотдачи k_t или площади $S_{\text{охл}}$ охлаждающей поверхности. Такой способ уменьшения температуры называется интенсификацией охлаждения.

Увеличение коэффициента теплоотдачи осуществляется следующими способами: окраской нагреваемых частей аппарата краской, имеющей больший коэффициент излучения ε , чем неокрашенная поверхность, применением вынужденной конвекции, а также с помощью использования жидкостного охлаждения и т. п.

При вынужденной конвекции коэффициент теплоотдачи может быть повышен на порядок по сравнению с коэффициентом теплоотдачи при естественной конвекции.

Жидкостное охлаждение при естественной конвекции также существенно увеличивает коэффициент теплоотдачи.

Улучшение охлаждения путем увеличения площади охлаждающей поверхности достигается увеличением геометрических размеров аппарата или применением радиаторов охлаждения, т. е. искусственным увеличением площади охлаждающей поверхности.

На стадии уточненного теплового расчета электрических аппаратов следует решить следующие задачи:

- определить допустимую нагрузку $P_{\text{доп}}$, зная допустимую температуру, геометрические размеры аппарата и способ его охлаждения; это *первая прямая задача*, и решается она довольно просто, поскольку можно однозначно определить коэффициент теплоотдачи и, используя формулу Ньютона, легко найти $P_{\text{доп}}$, а следовательно, и $I_{\text{доп}}$;
- определить требуемую площадь охлаждающей поверхности, зная способ охлаждения, допустимую температуру и нагрузку;

это *первая обратная задача*, в которой коэффициент теплоотдачи находится подбором, так как он зависит от геометрических размеров аппарата;

- определить способ и параметры охлаждения по известным значениям нагрузки, допустимой температуры и заданным размерам аппарата; это *вторая прямая задача*;

- определить параметры температурного поля в аппарате (выяснить максимальную температуру всех частей), зная нагрузку, способ охлаждения и размеры аппарата; это *вторая обратная задача*, которая решается подбором, поскольку и коэффициент теплоотдачи, и мощность источников теплоты зависят от температуры.

1.4. Теплоотдача конвекцией и излучением с поверхностей электрических аппаратов

В формуле Ньютона (1.8) для конвективного теплообмена коэффициент теплоотдачи k_T в общем случае отражает два вида теплоотдачи с поверхности тела в окружающую среду, а именно: теплоотдачу конвекцией и теплоотдачу излучением, т. е.

$$k_T = k_{T,к} + k_{T,и}, \quad (1.10)$$

где $k_{T,к}$, $k_{T,и}$ — коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением соответственно.

При низкой температуре, незначительно превышающей комнатную, тепловое излучение с поверхностей электрических аппаратов невелико. Однако при температуре 50—100 °С тепловое излучение, как правило, соизмеримо с теплоотдачей естественной конвекцией в воздухе.

В расчетах теплоотдачи излучением следует учитывать не только собственное излучение тел, определяемое по закону Стефана — Больцмана (см. формулу (1.7)), но и взаимное расположение этих тел.

Если выпуклое тело находится внутри вогнутого тела и имеет температуру T_1 , коэффициент излучения тела ϵ_1 и площадь поверхности охлаждения $S_{\text{охл1}}$, а второе тело соответственно T_2 , ϵ_2 и $S_{\text{охл2}}$, и при этом $T_1 > T_2$, $S_{\text{охл1}} < S_{\text{охл2}}$, то согласно [26] результирующий удельный поток теплового излучения с поверхности первого тела определяется в виде

$$p_{12} = \frac{5,67 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{S_{\text{охл1}}}{S_{\text{охл2}}} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}. \quad (1.11)$$