

**Э.Г. ЧЕБОТКОВ
Ю.В. ЗУБКОВ**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ
АППАРАТЫ
(Ч. I. Основы теории)**

Конспект лекций

**Самара
Самарский государственный технический университет
2010**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

Э.Г. ЧЕБОТКОВ

Ю.В. ЗУБКОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

(Ч. I. Основы теории)

Конспект лекций

Самара

Самарский государственный технический университет

2010

Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ

УДК 621. 313

Ч 34

Чеботков Э.Г.

Ч 34 Электрические и электронные аппараты (ч. I. Основы теории):

конспект лекций / *Э.Г. Чеботков, Ю.В. Зубков.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 191 с.: ил.

Содержит основы теории и общие сведения об электрических и электронных аппаратах, описание принципа их действия, принципиальные схемы, характеристики и основные соотношения. Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Дисциплина «Электрические и электронные аппараты».

УДК 621. 313

Ч 34

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. *С.Я. Галицков*,
канд. техн. наук, доц. *В.И. Семавин*

© Э.Г. Чеботков, Ю.В. Зубков, 2010

© Самарский государственный
технический университет, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Электрическими аппаратами (ЭА) называются электротехнические устройства для управления потоками энергии и информации, режимами работы, контроля и защиты технических систем и их компонентов.

Электрические аппараты служат для коммутации, сигнализации и защиты электрических сетей и электроприемников, а также управления электротехническими и технологическими установками и находят исключительно широкое применение в различных областях народного хозяйства: в электроэнергетике, в промышленности и транспорте, в аэрокосмических системах и оборонных отраслях, в телекоммуникациях, в коммунальном хозяйстве, в бытовой технике и т.д. При этом в каждой из областей диапазон используемой номенклатуры аппаратов очень широк. Можно определенно сказать, что не существует области, связанной с использованием электрической энергии, где бы не применялись электрические аппараты.

Широкое и разнообразное применение электрических аппаратов в энергетике, автоматизации производственных процессов и во всех отраслях промышленности определяет необходимость освоения инженерно-техническим составом, работающим в этой области, теории аппаратов, вопросов их разработки и применения.

Учебные планы технических университетов содержат курс «Электрические и электронные аппараты» для студентов различных электротехнических специальностей. Учебный план для студентов специальностей 140.601, 140.604, 140.607 предусматривает, кроме теоретического курса, практические занятия и достаточно большой объем самостоятельной работы.

Изучение курса электрических аппаратов базируется на преемственности знаний, полученных при изучении таких предшествующих дисциплин, как курсы высшей математики, физики, теоретической механики, сопротивления материалов, теоретических основ электротехники, основ электроники и др.

Знания, полученные студентами при изучении электрических аппаратов, необходимы для освоения материала по курсам: электромеханика и электрические машины, основы автоматизированного электропривода, электрические аппараты, электрические микромашины и др.

Данный курс лекций предназначен для освоения отдельного раздела электрических и электронных аппаратов – изучения основ теории – и практического применения полученных знаний для эксплуатации, расчетов и конструирования.

Конспект лекций разработан для высших учебных заведений на базе программы курса «Электрические и электронные аппараты» по специальности 140.601 «Электромеханика» и 140.604 «Электропривод и промышленная электроника», утвержденной 27.03.2000 г. в соответствии с ГОС. ОПД.Ф.08.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

ЛЕКЦИЯ №1

ВВЕДЕНИЕ. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ. ЛИТЕРАТУРА И ГОСТЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ, РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Введение. Предмет и задачи. Литература и ГОСТы, определения и классификация. Состояние и перспективы развития.

Электрический аппарат – это электротехническое устройство, которое используется для включения и отключения электрических цепей, контроля, измерения, защиты, управления и регулирования установок, предназначенных для передачи, преобразования, распределения и потребления электроэнергии.

Под электрическими аппаратами понимается широкий круг всевозможных устройств, применяемых в быту, промышленности и энергетике.

В настоящем курсе лекций рассматриваются основы теории, конструкция и эксплуатационные характеристики аппаратов, которые применяются в электрических системах, схемах электроснабжения промышленных предприятий и при автоматизации производственных процессов и электропривода.

Для изучения курса электрических аппаратов можно рекомендовать следующую литературу:

Основная литература

1. Алиев И.И., Абрамов М.Б. Электрические аппараты. Справочник. – М.: Радио софт, 2004.
2. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, CD-ROM, 2005.
3. Родштейн Л.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, CD-ROM, 2005.

4. Розанов Ю.К. и др. Электрические и электронные аппараты. – М.: Информэлектро, 2001.
5. Буткевич Г.В. и др. Задачник по электрическим аппаратам. – М.: Высш. школа, 1977.
6. Буль Б.К. и др. Основы теории электрических аппаратов. Под ред. Г.В. Буткевича: учеб. пособие для электротехн. специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.

Дополнительная литература

7. Гольдберг О.Д. и др. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах, вопросы их проектирования. – М.: Высшая школа, 2001.
8. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов. – М.: Энергия, 1971.

Дается краткая характеристика каждого издания с рекомендациями по использованию.

Классификация электрических аппаратов может быть проведена по ряду признаков: назначению (основной выполняемой функции), области применения, принципу действия, роду тока, исполнению защиты от воздействий окружающей среды, конструктивным особенностям и др. Основной является классификация по назначению, которая предусматривает разделение электрических аппаратов на следующие большие группы.

1. Коммутационные аппараты распределительных устройств, служащие для включения и отключения электрических цепей. К этой группе относятся рубильники, пакетные выключатели, выключатели нагрузки, выключатели высокого напряжения, разъединители, отделители, короткозамкватели, автоматические выключатели, предохранители. Для аппаратов этой группы характерно относительно редкое их включение и отключение. Могут быть и случаи, когда такие аппараты довольно часто включаются и отключаются (например, выключатели высокого напряжения в цепях питания электрических печей).

2. Ограничивающие аппараты, предназначенные для ограничения токов короткого замыкания (реакторы) и перенапряжений (разрядники). Режимы короткого замыкания и перенапряжений являются аварийными, и эти аппараты редко подвергаются наибольшим нагрузкам.

3. Пускорегулирующие аппараты, предназначенные для пуска, регулирования частоты вращения, напряжения и тока электрических машин или каких-либо других потребителей электрической энергии. К этой группе относятся контроллеры, командоконтроллеры, контакторы, пускатели, резисторы и реостаты. Для аппаратов этой группы характерны частые включения и отключения, число которых достигает 3600 в час и более.

4. Аппараты для контроля заданных электрических или неэлектрических параметров. К этой группе относятся реле и датчики. Для реле характерно плавное изменение входной (контролируемой) величины, вызывающее скачкообразное изменение выходного сигнала. Выходной сигнал обычно воздействует на схему автоматики. В датчиках непрерывное изменение входной величины преобразуется в изменение какой-либо электрической величины, являющейся выходной. Это изменение выходной величины может быть как плавным (измерительные датчики), так и скачкообразным (реле-датчики). С помощью датчиков могут контролироваться как электрические, так и неэлектрические величины.

5. Аппараты для измерений. С помощью этих аппаратов цепи первичной коммутации (главного тока) изолируются от цепей измерительных и защитных приборов, а измеряемая величина приобретает стандартное значение, удобное для измерений. К ним относятся трансформаторы тока, напряжения, емкостные делители напряжения.

6. Электрические регуляторы. Предназначены для регулирования заданного параметра по определенному закону. В частности, такие аппараты служат для поддержания на неизменном уровне напряжения, тока, температуры, частоты вращения и других величин.

Разделение аппаратов по областям применения более условно:

– аппараты для электрических систем и электроснабжения, объединенные в группу аппаратов распределительных устройств низкого и высокого напряжения;

– аппараты, применяющиеся в схемах автоматического управления электроприводами и для автоматизации производственных процессов.

По номинальному напряжению электрические аппараты разделяются на две группы: аппараты низкого напряжения (с номинальным напряжением до 1000 В) и высокого напряжения (с номинальным напряжением более 1000 В).

Защитные оболочки электрических аппаратов. Для предотвращения соприкосновения обслуживающего персонала с токоведущими или подвижными частями и исключения попадания в аппараты инородных тел устанавливаются специальные защитные оболочки. **Согласно ГОСТ 14254-80** защитные свойства оболочки обозначаются буквами IP и двумя цифрами. Первая цифра обозначает степень защиты от прикосновения персонала к опасным деталям аппарата, вторая характеризует защиту от попадания внутрь аппарата инородных предметов и жидкостей. Ниже приводятся защитные свойства некоторых исполнений **по ГОСТ 14254-80**.

IP00. Открытое исполнение. Защита персонала от соприкосновения с токоведущими или подвижными частями отсутствует. Инородные тела могут попадать внутрь аппарата.

IP20. Защищенное исполнение. Оболочка таких аппаратов предохраняет от случайного прикосновения к токоведущим или подвижным частям или от проникновения внутрь аппарата посторонних предметов. Оболочка должна препятствовать соприкосновению с деталями аппарата металлического щупа (диаметр 12, длина 80 мм), шарик диаметром 12 мм не должен проникать внутрь аппарата.

IP22. В дополнение к свойствам исполнения IP20 оболочка защищает от вредного воздействия капель жидкости, падающих на стенку оболочки, наклоненную к вертикали под углом в пределах 15° .

IP23. В дополнение к свойствам исполнения IP20 оболочка защищает от дождя, падающего под углом 60° к вертикали.

IP40. Оболочка защищает аппарат от попадания внутрь него мелких предметов диаметром более 1 мм.

IP42. В дополнение к свойствам исполнения IP40 оболочка защищает от воздействия капель жидкости (так же как IP22).

IP44. В дополнение к свойствам исполнения IP40 оболочка защищает от воздействия брызг жидкости, падающих под любым углом.

IP50. Оболочка аппарата защищает от вредного воздействия пыли (допускается попадание внутрь небольшого количества пыли, не нарушающего нормальной работы аппарата).

IP60. Пылезащищенное исполнение. Оболочка полностью препятствует попаданию пыли.

IP65. Пылеводозащищенное исполнение. В дополнение к свойствам исполнения IP60 оболочка защищает от воздействия струи воды, направленной под любым углом к ее поверхности.

IP66. Пылеводонепроницаемое исполнение. В дополнение к свойствам исполнения IP60 оболочка обеспечивает полную защиту от попадания воды внутрь аппарата при воздействии струи под любым углом к поверхности (морское исполнение).

IP67. Герметичное исполнение. В дополнение к свойствам исполнений IP60 оболочка обеспечивает полную герметичность аппарата.

Воздействия механических и климатических факторов на электрические аппараты в условиях эксплуатации регламентируются действующими **стандартами (ГОСТ 15150-69 и 15543-70)**. Под климатическими факторами внешней среды понимаются температура и влажность окружающего аппарат воздуха, давление воздуха (высота над уровнем моря), солнечное излучение, дождь, ветер, пыль (в том числе и снежная), солевой туман, иней, гидростатическое давление воды, действие плесневых грибов, содержание в воздухе коррозионно-активных агентов. Нормальные значения климатических факторов внешней среды, принятые для использования в технике, соответствуют данной географической зоне с учетом места размещения аппарата.

В технической документации на электрический аппарат всегда оговариваются значения климатических факторов, в пределах которых обеспечивается нормальная эксплуатация изделий. Эти значения принято называть номинальными. Различают также рабочие и предельные значения факторов. Значения климатических факторов, при которых обеспечивается сохранение номинальных параметров и гарантированный срок службы аппаратов, называются рабочими. Значения климатических факторов: а) при которых сохраняется работоспособность аппарата при допустимых отклонениях точности и номинальных параметров; б) после прекращения действия которых точность и номинальные параметры аппарата восстанавливаются, принято называть предельными рабочими.

С точки зрения воздействия климатических факторов поверхность земного шара делится на ряд макроклиматических районов. Каждый макроклиматический район характеризуется однородностью географических факторов и количественных показателей климатических факторов на своей территории.

В табл. 1.1 приведены климатические исполнения электрических аппаратов, предназначенных для эксплуатации на суше, озерах и реках морского климата. В зависимости от места размещения в условиях эксплуатации электрические аппараты делятся на категории, указанные в табл. 1.2. Следует отметить, что на работу аппаратов оказывает влияние также атмосферное давление. От плотности атмосферного воздуха зависят прочность внешней электрической изоляции и охлаждение электрических аппаратов. Большинство электрических аппаратов изготавливают для работы на нормальной высоте 1000 м над уровнем моря, при которой аппараты работают с номинальными параметрами. Однако аппараты могут работать на высотах, превышающих нормальную. При этом в соответствующих стандартах или технических условиях указывается уменьшение номинальной нагрузки на каждые 100 или 1000 м высоты, превышающей нормальную. Ана-

логично учитывается уменьшение электрической прочности воздушных промежутков. Электрические аппараты для самолетов и других летательных аппаратов работают при пониженном давлении на высоте значительно выше 1000 м, которое регламентировано в пределах $7,0-1,3 \cdot 10^{-4}$ кПа.

Климатическое исполнение и категория размещения указываются в конце сокращенного обозначения электрических аппаратов. Так, например, обозначение ВЭ-10-1250-20-УЗ означает «выключатель электромагнитный на номинальное напряжение 10 кВ, номинальный ток 1250 А, номинальный ток отключения 20 кА, для умеренного климата (У), и для эксплуатации в закрытых помещениях (категория размещения 3)». Предприятия, разрабатывающие и изготавливающие электрические аппараты, руководствуются стандартами, предусматривающими нормы механических испытаний (на удары, вибрацию, механические нагрузки на выводы аппарата), акустических испытаний, климатических испытаний (теплостойкость, холодостойкость, грибоустойчивость, водонепроницаемость, брызгозащищенность, солнечная радиация и др.).

Требования к электрическим аппаратам весьма разнообразны и зависят от назначения, условий эксплуатации, необходимой надежности и т.д. Однако можно сформулировать требования, которые являются общими для всех электрических аппаратов.

1. При номинальном режиме работы температура токоведущих элементов аппарата не должна превышать значений, рекомендуемых соответствующим ГОСТ или другим нормативным документом.

При коротком замыкании (КЗ) токоведущие элементы аппарата подвергаются значительным термическим и динамическим нагрузкам, вызываемым большим током. Эти нагрузки не должны вызывать остаточных явлений, нарушающих работоспособность аппарата после устранения КЗ.

2. Аппараты, предназначенные для частого включения и отключения, должны иметь высокую износостойкость.

3. Контакты аппаратов, предназначенных для отключений токов КЗ, должны быть рассчитаны на этот режим.

4. Изоляция электрических аппаратов должна выдерживать перенапряжения, которые имеют место в эксплуатации, и обладать определенным запасом, учитывающим ухудшение свойств изоляции с течением времени и вследствие осаждения пыли, грязи и влаги.

5. К каждому аппарату предъявляется ряд специфических требований, обусловленных его назначением. Так, например, выключатель высокого напряжения должен отключать ток КЗ за малое время (0,04-0,06 с). Трансформатор тока должен давать токовую и угловую погрешности, не превышающие определенного значения.

6. В связи с широкой автоматизацией производственных процессов, применением сложных схем автоматики увеличивается число аппаратов, участвующих в работе. Возможность отказа в работе электрических аппаратов требует их резервирования и создания специальной системы поиска неисправностей. В связи с этим электрические аппараты должны обладать высокой надежностью. Выход из строя аппаратов высокого напряжения приводит к большим разрушениям и материальным потерям.

7. Масса, габаритные размеры, стоимость и время, необходимые для установки и обслуживания электрических аппаратов, должны быть минимальными. Отвечающие современным требованиям электрические аппараты за срок службы 25 лет не должны нуждаться в ремонте и сложной ревизии. Конструкция электрических аппаратов должна обеспечивать возможность автоматизации в процессе их изготовления и эксплуатации.

Таблица 1.1

Исполнение для макроклиматических районов	Обозначения		
	буквенное		
	русские	латинские	
С умеренным климатом	У	(N)	0
С умеренным и холодным климатом	УХЛ	(NF)	1
С влажным тропическим климатом	ТВ	(TH)	2
С сухим тропическим климатом	ТС	(TA)	3
С сухим и влажным тропическим климатом	Т	(T)	4
Для всех макроклиматических районов на суше, кроме района с очень холодным климатом (общеклиматическое исполнение)	О	(V)	5

Таблица 1.2

Категории размещения для эксплуатации	Обозначение
На открытом воздухе	1
Под навесом или в помещениях (объемах), где колебания температуры и влажности несущественно отличаются от их колебаний на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха	2
В закрытых помещениях (объемах) с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха и воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе	3
В помещениях (объемах) с искусственно регулируемыми климатическими условиями	4
В помещениях (объемах) с повышенной влажностью (например, в неотапливаемых и невентилируемых подземных помещениях, в том числе шахтах, подвалах, в почве и др.)	5

ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электромагнитными называются устройства, предназначенные для создания в определенном пространстве магнитного поля с помощью обмотки, обтекаемой электрическим током.

В нейтральных электромагнитах постоянного тока рабочий магнитный поток создается с помощью обмотки постоянного тока. Действие таких электромагнитов, в отличие от поляризованных, не зависит от направления тока в обмотке, они наиболее экономичны и благодаря разнообразию конструктивных исполнений их легко приспособлять в различных конструкциях к различным условиям работы. Поэтому они получили наибольшее распространение.

Значительную часть электромагнитов постоянного тока составляют электромагнитные механизмы, использующиеся в качестве привода для осуществления необходимого перемещения.

Примером подобных электромагнитов являются: тяговые электромагниты, предназначенные для совершения механической работы при перемещении их рабочих органов, электромагниты муфт сцепления и торможения и тормозные электромагниты; электромагниты, приводящие в действие контактные устройства в контакторах, пускателях, автоматических выключателях; электромагниты реле, регуляторов и других чувствительных устройств автоматики.

При всем разнообразии электромагнитов отдельные их узлы имеют общее назначение (рис. 1.1): катушка с расположенной на ней намагничивающей обмоткой 1; неподвижная часть магнитопровода из ферромагнитного материала 2; подвижная часть магнитопровода – якорь 3.

Якорь отделяется от остальных частей магнитопровода рабочим и паразитным зазорами и представляет собой часть электромагнита, которая, воспринимая электромагнитное усилие, передает его соответствующим деталям приводимого в действие механизма.

В зависимости от расположения якоря относительно остальных частей электромагнита и характера воздействия на якорь со стороны магнитного потока электромагниты постоянного тока разделяются на следующие типы: *электромагниты с втягивающимся якорем, с*

внешним притягивающимся якорем и с внешним поперечно движущимся якорем.

Одна из типичных конструкций электромагнита с втягивающимся якорем показана на рис. 1.1. Характерной особенностью таких электромагнитов является то, что якорь, или, как его в данном случае можно назвать, подвижный сердечник, располагается целиком или частично внутри катушки с обмоткой. В процессе срабатывания электромагнита якорь, перемещаясь поступательно, погружается в катушку. Втягивание якоря происходит как за счет магнитного потока, проходящего через торцевую поверхность якоря, так и за счет действия магнитных потоков, выходящих из его боковой поверхности.

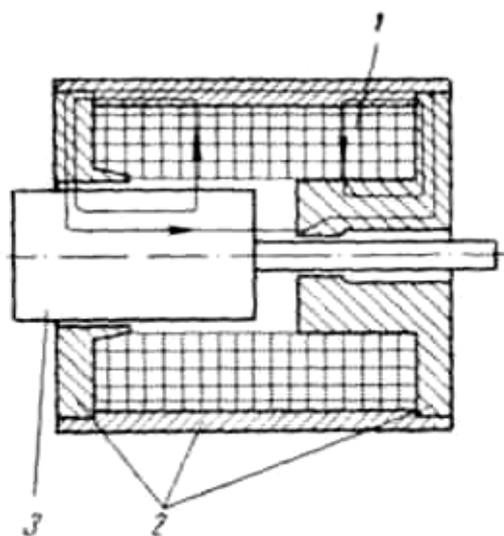


Рис. 1.1. Электромагнит с втягивающимся якорем

На рис. 1.2 изображена одна из разновидностей электромагнитов с внешним притягивающимся якорем. У этих электромагнитов якорь расположен снаружи по отношению к катушке. На него действует главным образом рабочий магнитный поток, проходящий от якоря к торцу шляпки сердечника. В результате этого якорь поворачивается в пределах малого угла или совершает поступательное перемещение в направлении линии индукции рабочего магнитного потока.

Конструкция электромагнита с внешним поперечно движущимся якорем показана на рис. 1.3. Якорь в подобных электромагнитах также располагается снаружи катушки. Рабочий магнитный поток, действующий на якорь, проходит из его боковой поверхности к полюс-

ным наконечникам, имеющим особую форму, определенным способом согласованную с формой боковой поверхности якоря. В результате воздействия со стороны рабочего магнитного потока якорь движется поперек магнитных линий, поворачиваясь на некоторый ограниченный угол.

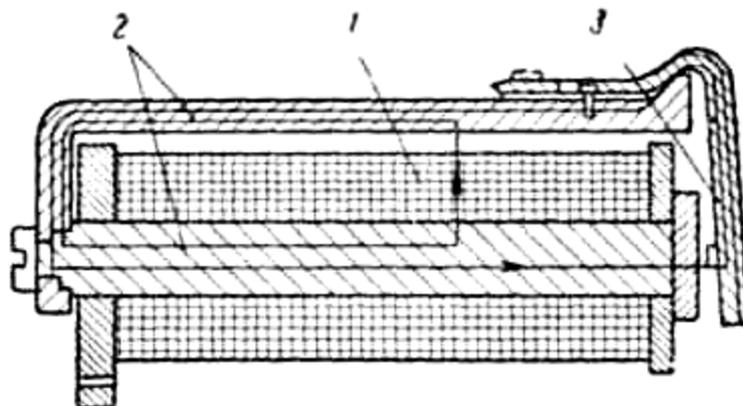


Рис. 1.2. Электромагнит с внешним притягиваемым якорем

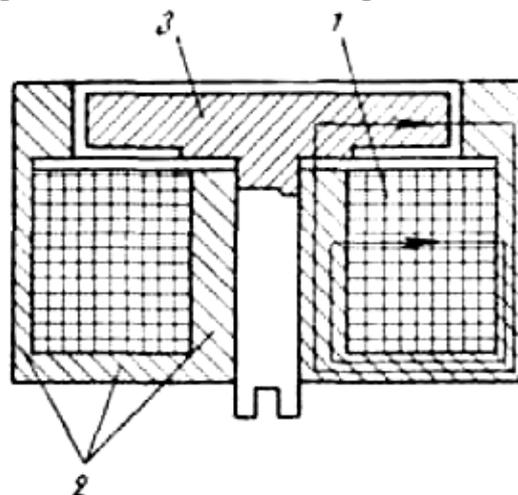


Рис. 1.3. Электромагнит с внешним поперечно-движущимся якорем

В каждой из трех перечисленных групп электромагнитов постоянного тока в свою очередь имеется ряд конструктивных разновидностей, определяемых конструкцией магнитной цепи. Кроме того, в зависимости от способа включения обмотки электромагнита различают электромагниты с обмотками параллельного включения и с обмотками последовательного включения.

В первом случае обмотка выполняется таким образом, что ее включают на полное напряжение источника питания непосредствен-

но или через добавочное сопротивление. Ток в цепи обмотки параллельного включения полностью или в значительной степени определяется ее параметрами.

Обмотка последовательного включения практически не влияет на величину тока той цепи, в которую она включается. Последний определяется параметрами остальных элементов цепи. Благодаря этим особенностям некоторые характеристики электромагнитов параллельного и последовательного включений, в первую очередь их динамические характеристики, оказываются различными.

Наконец, электромагниты могут различаться по скорости их срабатывания.

КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКОВ. НАМАГНИЧИВАНИЕ И МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Строго говоря, все вещества магнитны, поскольку магнитны их атомы. Магнитные свойства веществ обуславливаются, главным образом, движением элементарных носителей зарядов – электронов, которые вращаются как вокруг своей оси (спиновое движение), так и по орбите вокруг ядра (орбитальное движение). Эти движения электронов эквивалентны круговым микротокам, создающим в материале магнитные моменты. Кроме того, могут возникать индуцированные моменты, вызываемые вращением электронов вокруг оси направления воздействующего внешнего поля, что связано с явлением электромагнитной индукции. Объемная плотность магнитных моментов называется *вектором намагниченности* M . Магнитные свойства материалов характеризуются зависимостями индукции B или намагниченности M от напряженности поля H – *материальными уравнениями*. Эти уравнения соотносятся с конкретной точкой пространства и в общем случае имеют вид векторных функций векторных параметров магнитного поля, а также предыстории намагничивания. Такие функции позволяют воспроизводить как изотропные, так и анизотропные и гистерезисные свойства магнитных материалов.

По магнитным свойствам все материалы подразделяются на *парамагнетики*, *диамагнетики*, *ферромагнетики*, *антиферромагнетики* и *ферримагнетики* (ферриты).

Диамагнетики и *парамагнетики* относятся к материалам со слабыми магнитными свойствами.

В диамагнетиках спиновые и орбитальные моменты компенсируют друг друга – при отсутствии внешнего поля эти материалы не имеют собственного суммарного момента. Индуцированные же в них моменты ослабляют внешнее поле, поэтому магнитная проницаемость диамагнитного вещества меньше магнитной постоянной μ_0 .

У атомов парамагнетиков имеются собственные суммарные магнитные моменты, существующие независимо от внешнего магнитного поля. Однако тепловое движение электронов в парамагнетиках препятствует их самопроизвольной (спонтанной) ориентации, и результирующая намагниченность парамагнетика при отсутствии внешнего поля равна нулю. При наложении внешнего поля магнитные моменты ориентируются вдоль него. Происходит усиление поля по сравнению с полем, созданным той же магнитодвижущей силой в пустоте. Поэтому магнитная проницаемость парамагнетиков больше, чем μ_0 .

Значительно более сильный эффект намагничивания наблюдается у *ферромагнетиков*. Ферромагнетизм отмечается у некоторых металлов (железа, кобальта, никеля). Кроме того, ферромагнитными могут быть сплавы из ферромагнитных и из ферромагнитных и неферромагнитных элементов. Известны также ферромагнитные сплавы только из неферромагнитных элементов, например, сплавы марганца с медью и алюминием, марганца с серебром и алюминием.

Между атомами ферромагнитных веществ существуют так называемые обменные силы, противодействующие дезориентирующему тепловому движению электронов. Под действием этих сил магнитные моменты группы атомов ориентируются параллельно друг другу и образуют элементарные объемы – домены, самостоятельно (спонтанно) намагниченные до насыщения. Магнитный момент домена приблизительно в 10^{15} раз больше магнитного момента атома.

Рассмотрим процесс намагничивания образца ферромагнетика (рис. 1.4, *а*). В ненамагниченном состоянии векторы спонтанной намагниченности расположены в нем по всем направлениям равномерно (рис. 1.4, *б*). При наложении внешнего магнитного поля с возрастающей напряженностью векторы спонтанной намагниченности, изначально ориентированные в разных доменах по-разному, постепенно выстраиваются в одном направлении. Этот процесс называется *техническим намагничиванием*. Он характеризуется *кривой начального намагничивания* (см. рис. 1.4, *а*) – зависимостью $B(H)$ или зависимостью $M(H)$ в материале.

При воздействии слабого намагничивающего поля (участок OA) происходят обратимые смещения междоменных границ. Домены, магнитные моменты которых имеют малый угол с направлением внешнего поля, плавно растут в объеме за счет соседних доменов (рис. 1.4, *в*). Кривая начального намагничивания на этом участке, называемом *областью Релея*, имеет небольшой наклон с положительной крутизной. При снятии намагничивающего поля форма доменов восстанавливается. Намагниченность образца опять становится равной нулю.

В более сильных полях (участок AC) движение границ доменов перестает быть плавным. Отдельные участки изменяют свое положение скачкообразно, что приводит к скачкообразному изменению намагниченности образца (*эффект Баркгаузена*). Кривая намагничивания круто идет вверх. В конечной точке этого участка векторы спонтанной намагниченности доменов будут в объеме всего образца ориентированы вдоль одной из его так называемых осей легкого намагничивания, имеющей минимальный угол с направлением поля (рис. 1.4, *г*). Движение границ на этом участке большей частью необратимо. При уменьшении внешнего поля до нуля намагниченность образца не возвращается в исходную точку, а определяется кривой CD, т.е. образец остается намагниченным. Это явление называется *магнитным гистерезисом*.

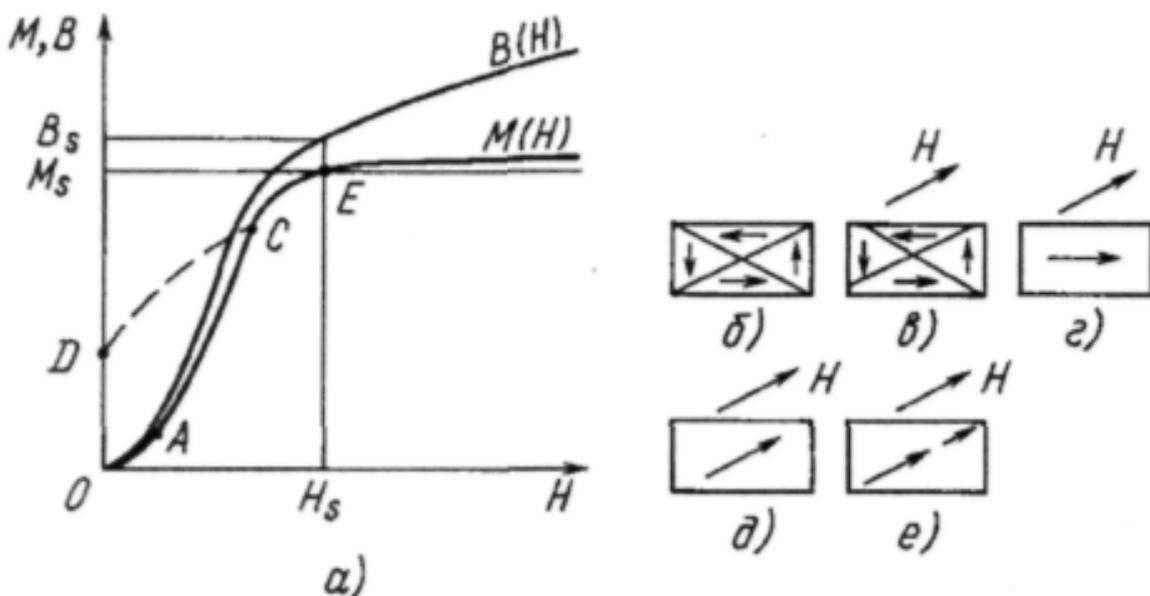


Рис. 1.4. Схема процесса намагничивания:
 а – кривые начального намагничивания; б – размагниченное состояние;
 в – смещение границ доменов; г, д – вращение магнитных моментов;
 е – парапроцесс

При дальнейшем увеличении напряженности (начиная с конца участка АС) преобладает процесс обратимого поворота векторов намагниченности доменов в сторону направления приложенного поля (участок СЕ) до достижения *технического насыщения* материала в конце этого участка (точка Е) когда векторы спонтанной намагниченности совпадают с вектором поля (рис. 1.4, д). Это состояние наступает при *напряженности технического насыщения* H_s , которой на кривой $B(H)$ соответствует *магнитная индукция технического насыщения* B_s , а на кривой $M(H)$ – *намагниченность технического насыщения* M_s .

Дальнейший процесс намагничивания близок к процессам намагничивания парамагнетиков. В этой области возрастает намагниченность самих спонтанных областей за счет переориентации отдельных спиновых магнитных моментов, дезориентированных тепловым движением. Дело в том, что только при абсолютном нуле температуры в области спонтанной намагниченности (в домене) спиновые магнитные моменты (спины) все направлены в одну сторону. При температуре же выше абсолютного нуля есть антипараллельные спины. Поле переориентирует их, и намагниченность растет (рис. 1.4, е), но суще-

ственно в меньшей степени, чем на предыдущих участках кривой начального намагничивания.

С увеличением температуры нарушается параллельность спинов в домене, все больше появляется антипараллельных спинов. Спонтанная намагниченность снижается. Для конкретного ферромагнитного материала существует определенная температура, при которой доменные образования полностью исчезают, т.е. исчезает спонтанная намагниченность. Эта температура носит название «температура точки Кюри». Для железа она равна 790 °С, для никеля – 340 °С, для кобальта – 1150 °С, для пятидесятипроцентного (50% Fe + 50% Ni) пермаллового сплава – 550 °С. Выше температуры точки Кюри ферромагнитные материалы ведут себя как парамагнетики.

При температуре ниже точки Кюри материал приобретает магнитные свойства, причем он становится размагниченым, т.е. приобретает доменную структуру с нулевой результирующей намагниченностью. Поэтому разогрев изделий из ферромагнитных материалов выше температуры точки Кюри используется для их полного размагничивания.

Помимо начальной кривой намагничивания существуют и другие виды, в частности, *основная (или коммутационная) кривая намагничивания*, являющаяся геометрическим местом вершин *частных статических симметричных петель гистерезиса* (рис. 1.5).

Петлями гистерезиса (см. рис. 1.5) называют кривые, отражающие изменения магнитного состояния магнитных материалов под действием циклически изменяющегося внешнего магнитного поля. При испытаниях этих материалов петли гистерезиса строятся для функций $B(H)$ или $M(H)$ внутри материала в зафиксированном направлении. *Статическая петля гистерезиса* (СПГ) определяется при медленном изменении внешнего поля ($dH/dt \approx 0$), т.е. практически при постоянном токе.

Пусть мы намагнитили материал до технического насыщения (H_S, B_S) – точка 1 на рис. 1.5. Последующее снижение напряженности поля H внутри материала до нуля (участок 1-2 на петле гистерезиса) позволяет определить значение *остаточной магнитной индукции* B_2

(точка 2). Дальнейшее увеличение напряженности поля в отрицательном направлении (участок 2-3) до значения H_{CB} (коэрцитивная сила по магнитной индукции) приводит к $B = 0$ (точка 3). Далее материал перемагничивается в отрицательном направлении (участок 3-4) до насыщения при $H = -H_s$. Изменение напряженности поля в положительном направлении замыкает предельный гистерезисный цикл по кривой 4-5-6-1, представляющей собой отражение спинки петли 1-2-3-4 относительно точки 0, – получаем *предельную статическую петлю гистерезиса* (ПСПГ).

Множество состояний материала в пределах площади, охватываемой ПСПГ, может быть достигнуто при изменениях напряженности магнитного поля, приводящих к частным симметричным или частным несимметричным гистерезисным циклам.

Частные несимметричные гистерезисные циклы образуются, если начальная точка отхода не находится на основной кривой намагничивания при симметричном изменении напряженности поля (циклы 5 на рис. 1.5), а также при его несимметричном изменении.

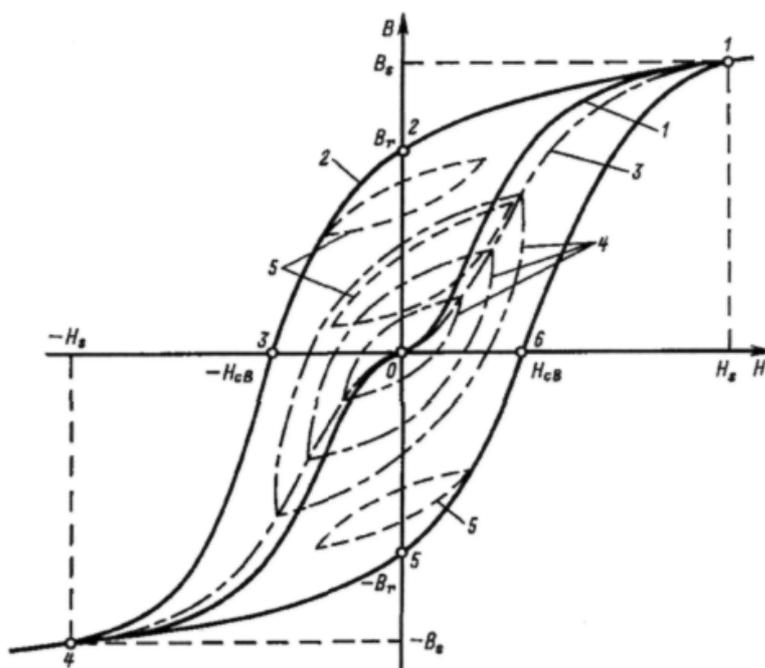


Рис. 1.5. Магнитный гистерезис:

- 1 – кривая начального намагничивания; 2 – предельный гистерезисный цикл;
- 3 – основная кривая намагничивания; 4 – симметричные частные циклы;
- 5 – несимметричные частные циклы

Связь между магнитной индукцией B и напряженностью H магнитного поля по основной кривой намагничивания определяется через абсолютную магнитную проницаемость μ_0 . Для того чтобы охарактеризовать зависимость $B(H)$ в конкретной точке кривой намагничивания при малых изменениях этих величин, используют динамическую (дифференциальную) магнитную проницаемость

$$\mu_{ad} = dB/dH.$$

Качественные зависимости μ_a и μ_{ad} от H приведены на рис. 1.6.

Форма СПГ (см. рис. 1.5) характеризуется наклоном пологих и крутых участков. В ряде электрических аппаратов (магнитные усилители, магнитные логические элементы, аппараты силовой электроники и др.) используются магнитные материалы, СПГ которых при анализе работы этих аппаратов обоснованно представляется идеально прямоугольной (рис. 1.7). Для СПГ такой формы на вертикальных участках $\mu_{ad} = \infty$, а на горизонтальных участках $\mu_{ad} = 0$.

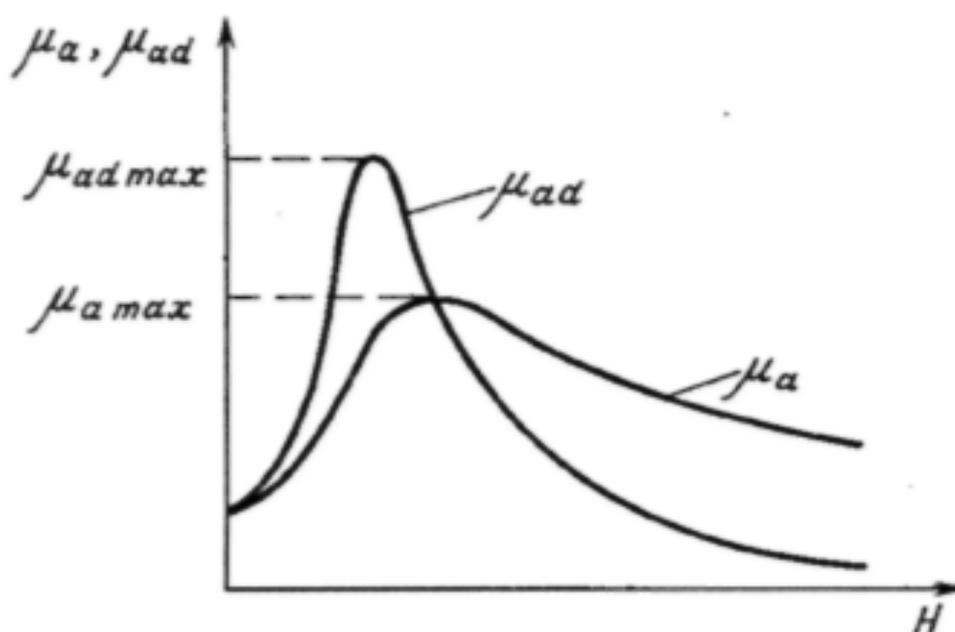


Рис. 1.6. Кривые магнитной проницаемости

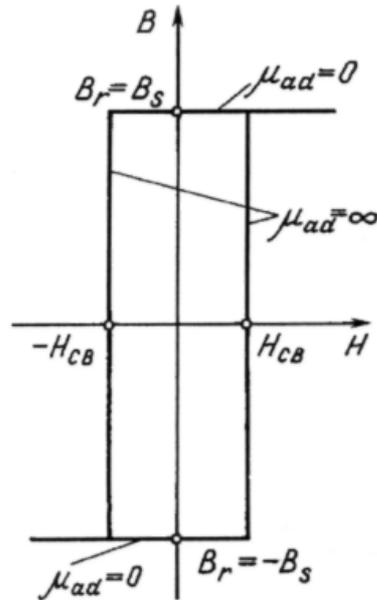


Рис. 1.7. Идеальная прямоугольная кривая намагничивания

Площадь СПГ определяет потери в ферромагнетике при его статическом (медленном) перемагничивании, которые называются *потерями на гистерезис*.

Электромагнитные компоненты многих электрических аппаратов работают на переменном токе. Поэтому описание свойств ферромагнетиков в таких аппаратах посредством СПГ приводит к неправильным результатам, особенно на повышенных частотах. Для этих целей используют *динамические петли гистерезиса* (ДПГ), которые представляют собой зависимости $B(H)$, когда $dH/dt \gg 0$ (рис. 1.8). При этом с повышением частоты перемагничивания ДПГ расширяют свою площадь, т.е. увеличиваются потери в ферромагнетике. Кроме того, крутые участки ДПГ становятся более пологими. Это объясняется запаздыванием ориентации доменов от изменения H (явление магнитной вязкости) и вихревыми токами в ферромагнетике, препятствующими процессу перемагничивания. На характер ДПГ оказывают влияние не только свойства ферромагнетика, но и другие факторы, например, вид перемагничивающего устройства (источник тока или источник напряжения), форма воздействующих токов и напряжений, конструкция магнитопровода и др.

Ферромагнитные материалы разделяют на магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие ферромагнитные материалы обладают малой коэрцитивной силой ($H_{CB} < 0,4$ кА/м).

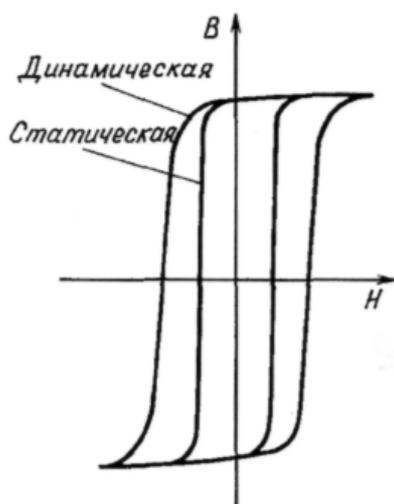


Рис. 1.8. Статическая (СПГ) и динамическая (ДПГ) петли гистерезиса

Эти свойства позволяют использовать магнитомягкие материалы в электрических аппаратах для магнитопроводов и концентраторов магнитных потоков. Основные кривые намагничивания некоторых из таких материалов приведены на рис. 1.9.

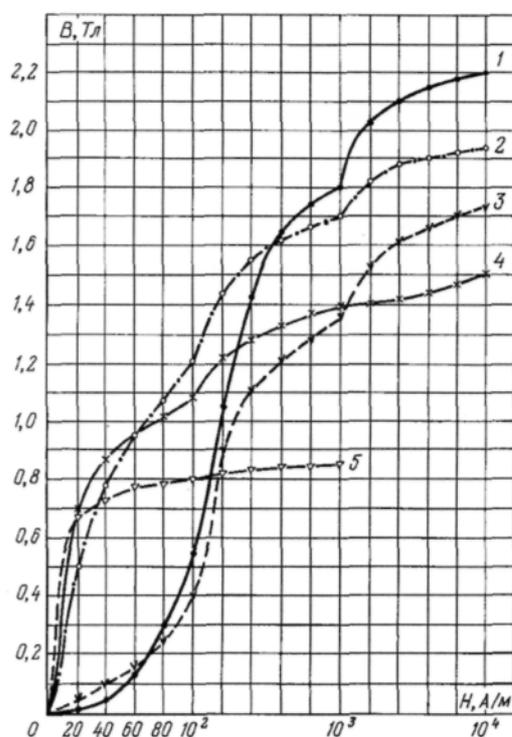


Рис. 1.9. Кривые намагничивания некоторых наиболее используемых магнитомягких материалов:

1 – пермендюр (сплав 50% Fe и 50% Co); 2 – электротехническая сталь 3413;
3 – электротехническая сталь 1211; 4 – пермаллой 50Н; 5 – пермаллой 79НМ

Технически чистое железо содержит менее 0,05% углерода и минимальный процент примесей, в том числе кремния. По многим параметрам к этому материалу близки *низкоуглеродистые электротехнические стали* с μ_r до $(3 \div 6) \cdot 10^3$, $H_{св} = (0,06 \div 0,1)$ кА/м и $B_s \approx 2,1$ Тл. Эти материалы, выпускаемые в виде листов и прутков, применяются при изготовлении маломощных электромагнитов.

Кремнистые электротехнические стали содержат 0,5-5% кремния и поэтому имеют высокое удельное электрическое сопротивление, что снижает потери на вихревые токи. Их максимальная относительная магнитная проницаемость составляет $(6 \div 40) \cdot 10^3$, коэрцитивная сила $H_{св}$ – менее 0,1 кА/м, а индукция технического насыщения доходит до $(1,9 \div 2,1)$ Тл. Кремнистые электротехнические стали выпускаются в виде листов и лент и используются для изготовления шихтованных магнитопроводов быстродействующих электромагнитов постоянного тока и электромагнитов переменного тока, а также для витых сердечников магнитных компонентов силовой электроники. Они применяются при рабочих частотах от 50 Гц до 5 кГц. При более высоких частотах из магнитомягких ферромагнитных материалов используются пермаллои.

Пермаллои – это сплавы железа с никелем, легированные другими элементами (Mo, Cr, Cu, Si и пр). Существует два вида пермаллоев: высоконикелевые с содержанием никеля 70-80% (например, марка 79НМ) и низконикелевые с содержанием никеля 40-50% (например, марка 50Н).

В слабых магнитных полях пермаллои обладают более высокой магнитной проницаемостью, чем электротехнические стали (см. рис. 1.9). Значения максимальной относительной магнитной проницаемости у низконикелевых пермаллоев достигают $125 \cdot 10^3$, а у высоконикелевых – $300 \cdot 10^3$. Для них также характерны низкие значения коэрцитивной силы ($H_{св} \approx 0,002+0,08$ кА/м).

Пермаллои выпускаются в виде лент, листов и прутков. Минимальная толщина ленты достигает 5 мкм.

С точки зрения уменьшения габаритов и массы различных электромагнитных аппаратов большой интерес представляют сплавы железа с кобальтом (сплавы типа *пермендюр*).

Их магнитная индукция технического насыщения достигает 2,4 Тл. Максимальная относительная магнитная проницаемость у большинства этих сплавов составляет $4,5 \cdot 10^3 - 40 \cdot 10^3$, а коэрцитивная сила достаточно низкая (0,02-0,26 кА/м).

Преимущество сплавов железо-кобальт перед технически чистым железом становится ощутимым в области индукций выше 1 Тл. Так, вблизи индукции 1,8 Тл проницаемость кобальтовых сплавов больше, чем у железа, приблизительно в 40 раз. Поэтому эти сплавы применяют, в частности, для полюсных наконечников с высокой индукцией.

Посредством специальных режимов прокатки, отжига и магнитной обработки из сплава 49%Fe, 49%Co и 2%V удалось создать анизотропный материал, имеющий практически прямоугольную СПГ и максимальную относительную магнитную проницаемость до $70 \cdot 10^3$. При индукции 2 Тл проницаемость у него снижается до $33 \cdot 10^3$, однако при высоких индукциях она у этого сплава в 500 раз выше проницаемости железа, применяемого в магнитопроводах электромагнитных реле.

Высокая стоимость железокобальтовых сплавов предопределяет их применение главным образом в специальной аппаратуре.

Аморфные сплавы отличаются от указанных выше магнитомягких материалов отсутствием кристаллической решетки. Аморфное состояние структуры достигается закаливанием расплавленного материала с очень большой скоростью (примерно $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$). Основой таких материалов являются различные сплавы железа с бором и кремнием, легированные различными компонентами, например хромом. Аморфные сплавы отличаются от кристаллических рядом повышенных магнитных и механических свойств, а также высокой антикоррозионной стойкостью. Основное их преимущество – низкое значение удельных потерь на перемагничивание (более чем на порядок меньше у отдельных марок этих сплавов по сравнению с кристаллическими сплавами). Они отличаются большими значениями коэрцитивной силы ($H_{\text{св}} > 40 \text{ кА/м}$) и магнитной энергии, отдаваемой во внешнее пространство выполненными из них и намагниченными изделиями. Эти изделия называются *постоянными магнитами*, которые совместно с об-

мотками, по которым протекает ток, являются первичными источниками магнитного поля. Важнейшей характеристикой таких материалов является участок СПГ, расположенный во втором квадранте (между положительной осью магнитной индукции B , намагниченности M или индукции намагниченности B и отрицательной осью напряженности поля H – см. рис. 1.5). Этот участок СПГ называется *кривой размагничивания*. Кривые размагничивания наиболее используемых в настоящее время магнитотвердых материалов даны на рис. 1.10.

Выбор магнитотвердого материала определяется назначением постоянного магнита, а также технологическими и экономическими соображениями. Кроме того, необходимо учитывать вопросы механической прочности, устойчивости к воздействию размагничивающих полей и окружающей температуры.

В электрических аппаратах используются также материалы, которые по своим свойствам относятся к *антиферромагнетикам*. У них оказывается энергетически выгодным антипараллельное расположение спинов соседних атомов. Созданы антиферромагнетики, обладающие значительным собственным магнитным моментом, приближающимся (в 2-5 раз меньше) к моменту ферромагнетиков. Такие материалы получили название *ферримагнетиков (ферритов)*. В отличие от металлических, хорошо проводящих ферромагнитных материалов, ферриты являются полупроводниками. Поэтому их удельное электрическое сопротивление намного превышает аналогичное сопротивление сталей и сплавов. Высокое значение электрического сопротивления позволяет значительно снизить вихревые токи и вызываемые ими потери мощности.

Ферриты изготавливают путем прессования и термической обработки порошков из окислов железа, цинка, марганца и других материалов. Максимальная относительная магнитная проницаемость у них равна $(2 \div 5) \cdot 10^3$, а индукция технического насыщения $0,35 \div 0,5$ Тл. Ферриты бывают как магнитомягкие (никелевые, марганцевые), так и магнитотвердые (бариевые, стронциевые).

Малые потери мощности от вихревых токов, а также возможность производства изделий из них произвольной формы обусловило

широкое использование магнитомягких ферритов в качестве магнитопроводов. Изделия из магнитомягких, так называемых *терромагнитных ферритов* (с низкими температурами точки Кюри – $10 \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$) нашли применение в пожарных извещателях. Магнитотвердые ферриты (например, феррит стронция, – рис. 1.10), используются для изготовления постоянных магнитов.

Для создания магнитопроводов с малыми значениями магнитной проницаемости, мало зависящей от воздействия постоянных и переменных полей, используются *магнитодиэлектрики*. Эти материалы имеют очень высокое удельное электрическое сопротивление, что практически исключает возникновение в них вихревых токов. Среди таких материалов наибольшее распространение получил альсифер – тройной сплав алюминия, кремния и железа. Низкие значения абсолютной магнитной проницаемости μ_a (от нескольких единиц до сотен) позволяют эффективно использовать эти сплавы в реакторах и фильтрах с практически постоянной индуктивностью в широком диапазоне изменения напряженности магнитного поля.

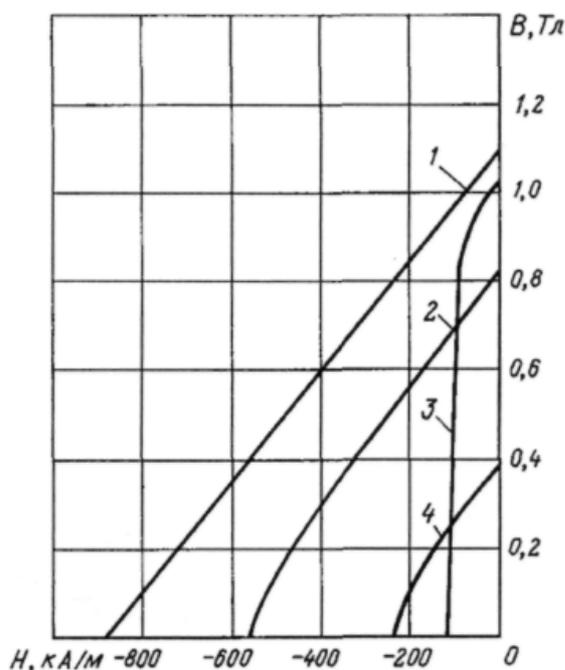


Рис. 1.10. Кривые размагничивания некоторых наиболее используемых магнитотвердых материалов:
 1 – сплав NdFeB; 2 – редкоземельный сплав КС37А;
 3 – сплав альинико ЮНДК35Т5БА; 4 – феррит стронция 28СА

ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

Магнитные цепи находят широкое применение в различного рода электрических аппаратах и электромагнитных устройствах: контакторах, автоматах, приводах выключателей, тормозных, тяговых и подъемных электромагнитах, релейной аппаратуре, датчиках, электромагнитных муфтах, дросселях переменной индуктивности, шаговых искателях, магнитных подвесках и др. Магнитные цепи также являются основным элементом и в ускорителях элементарных частиц, электромагнитных сепараторах, применяемых в металлургии; электромагнитных плитах и приспособлениях, используемых в металлообрабатывающей промышленности, вибраторах и других устройствах, где требуется создание магнитного поля определенной формы.

КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

Огромное разнообразие конструктивных форм магнитных цепей создают определенные трудности в разработке для них методов расчета. Поэтому в основу классификации нами положен характер образования и распределения магнитного потока в магнитопроводе, что позволило значительное число цепей объединить в ряд однородных групп и разработать для некоторых из них общие принципы расчета с учетом особенностей каждой.

Магнитные цепи можно разбить на два основных вида:

- 1) цепи, поток рассеяния которых мал, и при расчете параметров намагничивающей катушки его можно не учитывать;
- 2) цепи, поток рассеяния которых необходимо учитывать.

Магнитные цепи, при расчете которых можно с достаточной для практики точностью не учитывать потоки рассеяния

Если через равномерно распределенную обмотку, расположенную по всей длине ферромагнитного тороида, пропустить ток, то по нему будет проходить только основной поток, а поток рассеяния вследствие полной симметрии будет отсутствовать. В подавляющем большинстве магнитные цепи выполняются несимметричными. При этом магнитопровод может быть замкнутым или иметь

небольшой воздушный зазор, а обмотки обычно располагаются на отдельных участках цепи. В таких цепях появляется поток рассеяния, который будет определяться величиной воздушного зазора, конфигурацией магнитной цепи, степенью насыщенности стали, расположением намагничивающей катушки, наличием электромагнитных экранов (короткозамкнутых витков) и другими факторами.

Степень учета поля рассеяния зависит в каждом отдельном случае от требований, предъявляемых к расчету электрического аппарата. С достаточной для практики точностью потоком рассеяния можно пренебречь в трех случаях: когда магнитопровод замкнут; когда на пути основного потока имеется воздушный зазор сравнительно малой величины, а магнитная цепь насыщена незначительно и когда размагничивающее действие вторичной обмотки сравнительно невелико. Иначе говоря, *пренебрегать потоком рассеяния можно в тех случаях, когда он мал по сравнению с основным потоком.*

Пренебрежение потоком рассеяния значительно облегчает расчет магнитной цепи, однако трудности по определению габаритных размеров при заданных параметрах, учету нелинейности кривой намагничивания и размагничивающего действия электромагнитных экранов полностью сохраняются.

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

Для магнитных цепей электрических аппаратов применяются самые разнообразные магнитомягкие материалы, от правильного выбора которых во многом зависит качество конструкции электрического аппарата в целом. Кроме определенных магнитных свойств, материал должен удовлетворять еще необходимым механическим и электрическим параметрам, и выбор его должен быть экономически оправдан.

Важнейшей характеристикой ферромагнитного материала является связь между индукцией B (Тл) и напряженностью магнитного поля H (А/м) (рис. 1.11):

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H$$

Здесь μ – относительная магнитная проницаемость, показывающая, во сколько раз магнитная проницаемость данной среды больше магнитной проницаемости вакуума;

μ_0 – магнитная постоянная или абсолютная проницаемость вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$;

μ_a – абсолютная магнитная постоянная, Гн/м.

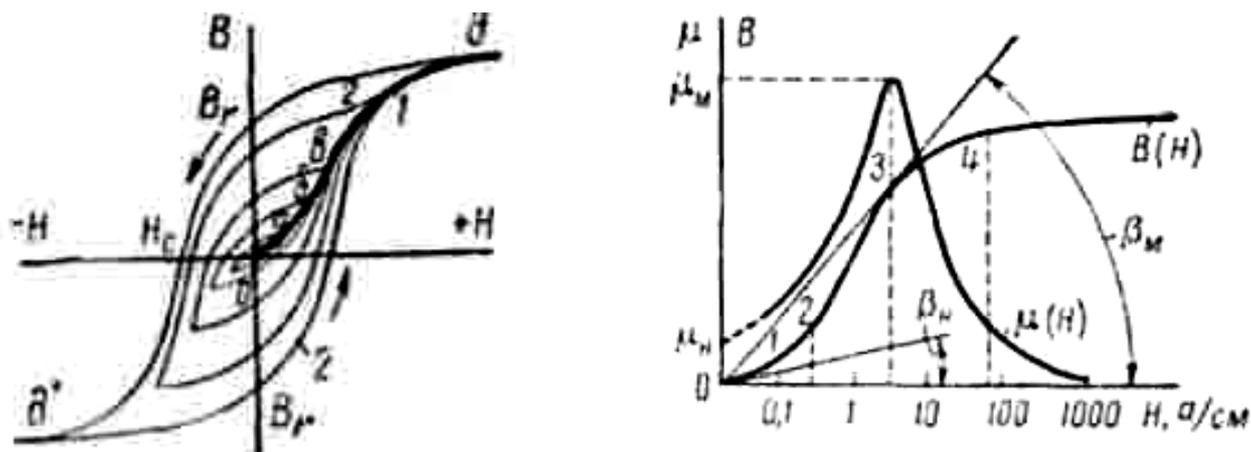


Рис. 1.11. Характеристики магнитных материалов:

a – семейство симметричных петель гистерезиса;

1 – основная кривая намагничивания; *2* – предельная петля гистерезиса;

б – основная кривая намагничивания
и кривая относительной магнитной проницаемости

ЛЕКЦИЯ №2

РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Для магнитных систем электрических аппаратов, когда учитываются потоки рассеяния и полные потоки воздушного зазора, существенным является определение магнитных проводимостей воздушных путей – проводимостей зазора и рассеяния. Причем точность расчета параметров электрического аппарата с воздушным зазором во многом определяется точностью расчета проводимостей воздушных

путей. Магнитное поле вблизи воздушного зазора для плоской магнитной системы трехмерно и имеет очень сложную форму. На рис. 2.1 показано поле между полюсом и плоскостью для различных координат поля выпучивания. Магнитные проводимости этого объемного поля или поля между двумя полюсами можно рассчитать тремя методами. Первый метод, наиболее достоверный, основан на экспериментальном исследовании распределения объемного поля и магнитных напряжений между полюсами конечных размеров a и b (рис. 2.1) при различных воздушных зазорах и формах полюсов. Так как поле не плоскопараллельное, то на боковые удельные проводимости оказывают влияние ширина или диаметр полюса.

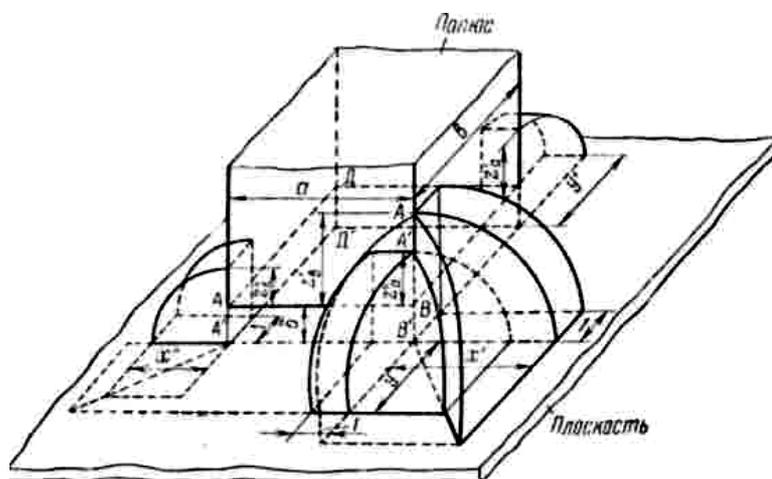


Рис. 2.1. К расчету магнитных проводимостей для расположения «полюс – плоскость»

Второй метод основан на замене сложного объемного поля воздушного зазора (см. рис. 2.1) однородным полем, не имеющим поля выпучивания. Для этой цели, при тех же значениях воздушного зазора и максимальной индукции в нем, реальные размеры полюса заменяются расчетными размерами полюсов. Этот метод позволяет определить полное объемное поле воздушного зазора по двум взаимно перпендикулярным плоско-параллельным полям. Суть третьего метода сводится к тому, что объемное поле вокруг воздушного зазора заменяется суммой отдельных полей, имеющих простые геометрические формы. Применение того или иного метода расчета вызывается

формой магнитной цепи, известными пределами координат поля выпучивания и желаемой точностью расчета. Рассмотрим эти методы.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ ВОЗДУШНЫХ ЗАЗОРОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ШИРИНЫ ГРАНИ ИЛИ ДИАМЕТРА СЕРДЕЧНИКА НА БОКОВУЮ УДЕЛЬНУЮ ПРОВОДИМОСТЬ

Этот метод позволяет, пользуясь простыми уравнениями и графиками, провести расчет проводимостей воздушных зазоров с достаточной для практики точностью в $5 \div 8\%$.

Определение проводимости воздушного зазора прямоугольного полюса по координате Z для случая «полюс – плоскость»

Линии индукции, выходящие из боковых граней, занимают весь объем вокруг полюса и имеют сложную форму (см. рис. 2.1). Поле в результате этого, как уже указывалось, получается не плоскопараллельным. В этом случае вывод аналитической зависимости для магнитной проводимости с боковой грани не представляется возможным. Экспериментальное исследование показывает, что такой характер поля приводит к влиянию ширины полюса на боковую удельную проводимость. При плоскопараллельном поле, когда магнитные линии индукции параллельны, боковая удельная проводимость от ширины полюса не зависит. Для учета указанного влияния ширины полюса получено семейство кривых удельной боковой проводимости для прямоугольных полюсов (рис. 2.2).

Проводимость между боковой гранью полюса B и плоскостью по высоте координаты z соответственно:

$$G_{zb} = \mu_0 \cdot q'_{zb} \cdot b . \quad (2.1)$$

Кривые удельной проводимости поля с ребер торца для прямоугольных и круглых полюсов представлены на рис. 2.3.

Проводимость между одним ребром и плоскостью определяется по выражению

$$G_{pb} = \mu_0 \cdot q_{pb} \cdot b . \quad (2.2)$$

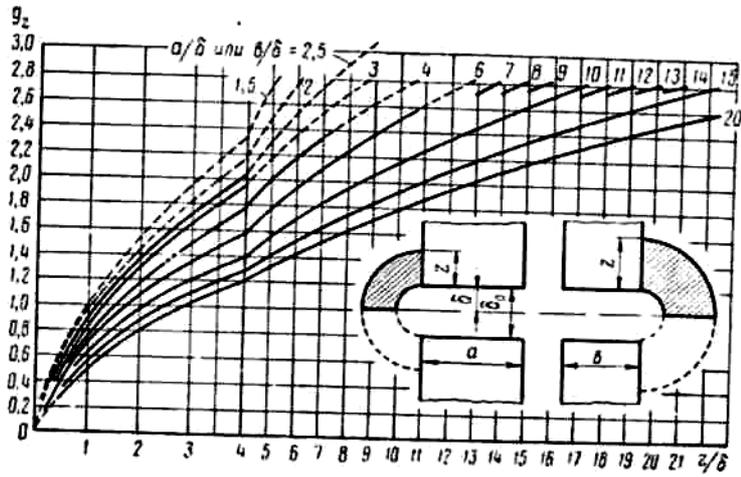


Рис. 2.2. Кривые изменения удельной магнитной проводимости поля с боковой грани

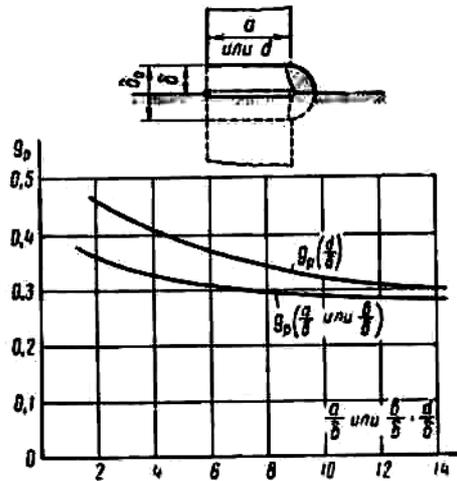


Рис. 2.3. Кривые удельной проводимости поля с ребер торца для прямоугольных и круглых полюсов

Полюса цилиндрической формы

Для электрических аппаратов широко применяются магнитные системы с цилиндрическими полюсами. Опыт показывает, что боковая удельная проводимость между цилиндрическими полюсами зависит от величины диаметра полюса (при постоянном δ). Причем наиболее сильная зависимость этой проводимости получается при значительных δ и малых d , δ .

На основании проведенных опытов получены кривые для удельной проводимости потока с цилиндрической поверхности полюса g_z (рис. 2.4) и удельной проводимости потока с ребра торцевой поверхности q_p (см. рис. 2.3). При заданных значениях δ , d и координате по-

ля выпучивания z расчет магнитных проводимостей достаточно прост, а погрешность расчета также не превышает $5 \div 8\%$.

Определим проводимости воздушного зазора с учетом поля выпучивания для цилиндрических полюсов.

1. Проводимости поля с ребра полюса для расположения «полюс – плоскость» и «полюс – полюс» (см. рис. 2.4):

$$G_{\text{РП.Пл}} = \mu_0 \cdot \pi \cdot q_p \cdot d, \quad G_{\text{РП.П}} = \mu_0 \cdot \pi \cdot d \cdot \left(\frac{q_p}{2} \right), \quad (2.3)$$

где удельная проводимость между ребром торца полюса и плоскостью берется по z/δ из кривой, изображенной на рис. 2.4.

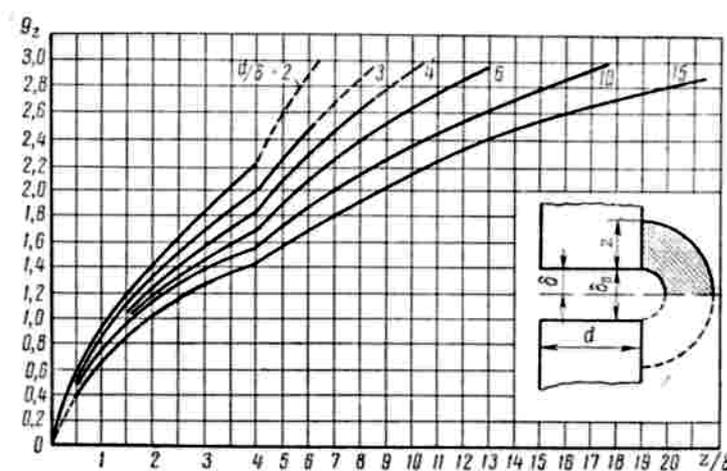


Рис. 2.4. Кривые изменения удельной боковой магнитной проводимости

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ ВОЗДУШНЫХ ЗАЗОРОВ МЕТОДОМ РАСЧЕТНЫХ ПОЛЮСОВ

Расчет по этому методу проводится для плоскопараллельных или плоскомеридианных полей.

Определение расчетных размеров и проводимости воздушного зазора прямоугольного полюса при расположении «полюс – плоскость» по координате z

Для плоскопараллельного поля суммарный поток с правой половины торца полюса и грани v (рис. 2.5) можно определить как

$$\frac{1}{2} \Phi_E = \frac{1}{2} \Phi_T + \Phi_Z = \frac{1}{2} G_T \left(\frac{F_T}{2} \right) = G_{Zb} \left(\frac{F_{Zb}}{2} \right). \quad (2.4)$$

Здесь F_T – магнитное напряжение между торцевыми поверхностями полюсов; F_{zb} – то же между точками A' и B' (рис. 2.5); G_T – полная проводимость воздушного зазора между торцевой поверхностью правой половины полюса и плоскостью.

Тогда

$$G_T = \frac{1}{2}G_{0T} + G_p, \quad G_{0T} \cong \mu_0 \cdot \frac{b \cdot a}{\delta}, \quad G_p = \mu_0 \cdot q_p \cdot b. \quad (2.5)$$

Необходимо отметить, что в случае плоскопараллельного поля удельная проводимость ребра торца от ширины полюса не зависит, а для граней a и b они равны. Магнитная проводимость между правой и боковой гранью и плоскостью

$$G_{zb} = \mu_0 \cdot q'_{zb} \cdot b, \quad (2.6)$$

где q'_{zb} – удельная проводимость между правой боковой гранью b и плоскостью, полученная для плоскопараллельного поля. Чтобы сложное поле между полюсом и плоскостью с максимальной индукцией B_m в зазоре δ заменить эквивалентным однородным полем, необходимо увеличить размер полюса a . Обозначая расчетный размер правой половины полюса через a_p , получим суммарный поток с торца и боковой грани b :

$$\frac{1}{2}\Phi_E = \mu_0 \cdot \frac{b \cdot a_p}{\delta} \cdot \frac{F_T}{2}. \quad (2.7)$$

Приравняв уравнения (2.4) и (2.7) для правой половины полюса, будем иметь

$$a'_p = \frac{1}{2}a + \delta(g_p + g'_{zb}). \quad (2.8)$$

Аналогично для левой половины полюса:

$$a''_p = \frac{1}{2}a + \delta(g_p + g''_{zb}). \quad (2.9)$$

Полный расчетный размер для грани a

$$a_p = a'_p + a''_p = a + \delta(2g_p + g'_p + g''_{zb}). \quad (2.10)$$

Аналогично определяются расчетные размеры для грани в:

$$b_p'' = \frac{1}{2}b + \delta(g_p + g_{zb}'') \quad b_p' = \frac{1}{2}b + \delta(g_p + g_{zb}');$$

$$b_p = b_p' + b_p'' = b + \delta(2g_p + g_p' + g_{zb}''). \quad (2.11)$$

Тогда полная расчетная проводимость воздушного зазора для эквивалентного однородного поля, которое учитывает поле выпучивания, представится следующим образом:

$$G_E = \mu_0 \frac{a_p b_p}{\delta}. \quad (2.12)$$

Таким образом, проводимость воздушного зазора с учетом поля выпучивания определяется довольно просто. Расчет значительно облегчается, если удельные проводимости с боковых граней определять из кривых, построенных по формулам ряда авторов. При определении удельной боковой проводимости авторы исходили из разных условий вывода формул. Это привело к тому, что величина удельной проводимости поля с ребра торца получилась различной, поэтому для случая «полнос – плоскость» по Ротерсу эту величину следует брать равной 0,52.

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ПО МЕТОДУ СУММИРОВАНИЯ ПРОСТЫХ ОБЪЕМНЫХ ФИГУР ПОЛЯ

Расчет проводимостей воздушного зазора методом суммирования простых объемных фигур поля, предложенный Ротерсом, на практике получил достаточно широкое распространение. Однако существенным недостатком этого метода является заранее предписанная конфигурация магнитного поля. В результате при определенных соотношениях размеров полюса и зазора получаются значительные погрешности. Вместе с тем для сугубо приближенных расчетов проводимостей, а также при использовании поправочных коэффициентов, полученных на основе экспериментов, этот метод представляет определенный интерес. Суть метода сводится к тому, что сложное объемное магнитное поле в воздушном зазоре и вблизи его заменяется суммой элементарных объемных полей, описываемых простыми уравнениями.

Приведем расчетные формулы для определения проводимостей простейших фигур при расположении «полюс – плоскость» и «полюс – полюс».

1. Проводимость четверти цилиндра (проводимость между ребром АВ торца полюса и плоскостью, рис. 2.5, а)

$$G_p = \mu_0 \cdot q_p \cdot b \quad q_p = 0.52 \quad (2.13)$$

Проводимость для случая «полюс – полюс» (проводимость полуцилиндра, рис. 2.5, б):

$$G_p = \mu_0 \left(\frac{g_p}{2} \right) b = 0,26 \mu_0 b \quad (2.14)$$

2. Проводимость четверти полого цилиндра (проводимость между боковой гранью полюса и плоскостью, рис. 2.5, в):

$$G_{xb} = \mu_0 g_x b \quad \text{или} \quad G_{zb} = \mu_0 g_{zb} b \quad (2.15)$$

где удельные проводимости g_x и g_{zb} определяются по кривым Ротера соответственно из рис. 2.3 и рис. 2.4.

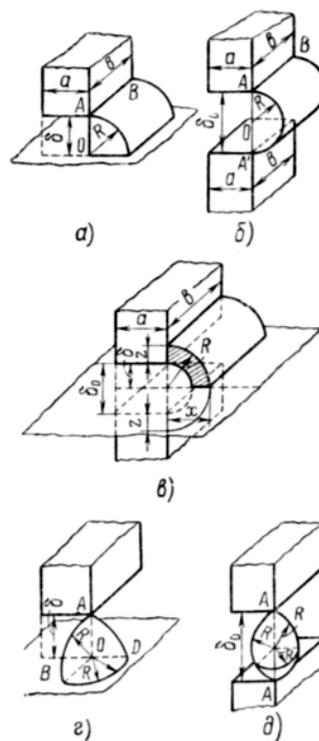


Рис. 2.5. К определению магнитной проводимости поля с ребра, угла и боковой поверхности полюса

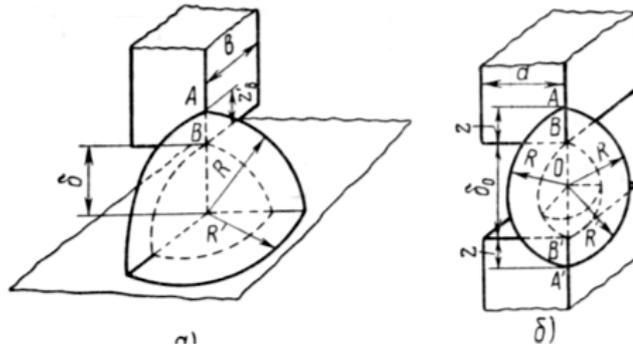


Рис. 2.6. К расчету магнитной проводимости поля с ребра боковых граней

3. Проводимость половины сферического квадранта (проводимость между углом A полюса и плоскостью, рис. 2.5, z):

$$G_{\text{уг}} = \mu_0 g_{\text{уг}} \delta, \quad (2.16)$$

где $g_{\text{уг}} = 0,308$.

4. Проводимость половины квадранта сферической оболочки (проводимость между боковым ребром AB полюса и плоскостью):

$$G_{\text{рб}} = \mu_0 g_{\text{рб}} z, \quad \text{где } g_{\text{рб}} = 0,5.$$

Для случая «полюс – полюс» (проводимость между боковыми ребрами AB и $A'B'$, см. рис. 2.6, b):

$$G_{\text{рб}} = \mu_0 \left(\frac{\delta_{\text{рб}}}{2} \right) z = 0,25 \mu_0 z. \quad (2.17)$$

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ ВОЗДУШНЫХ ПУТЕЙ ГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Для практических целей широко используются магнитные цепи, у которых магнитная проводимость рассеяния на единицу длины сердечника непостоянна. Поле таких цепей неоднородно. Оно сильно зависит от формы магнитопровода, расположения катушки и величины м.д.с., и поэтому точный расчет трехмерных реальных цепей невозможен. Известные в литературе формулы проводимостей получены при упрощении истинной картины поля и, кроме того, определяются только для отдельных участков магнитной цепи. Разработка приближенной, но достаточно простой методики расчета, пригодной для лю-

бых конструктивных форм и удовлетворяющей требованиям точности, является практически важной задачей.

Исследования показали, что эту задачу можно решить приближенно, сочетая графический метод с аналитическим. Графический метод Лемана-Рихтера успешно применяется при расчете поля электрических машин, так как он сравнительно прост и дает вполне удовлетворительные результаты. Однако попытка применить его к расчету магнитных систем электрических аппаратов встретила определенные трудности.

Если в электрических машинах размеры магнитной системы в осевом направлении велики и поле можно считать плоскопараллельным, то в магнитных системах аппаратов все размеры соизмеримы, поэтому поле является трехмерным. Кроме того, поле многих аппаратов также усложняется наличием ряда воздушных зазоров и обмоток возбуждения, Методика расчета, изложенная ниже, учитывает эти особенности и охватывает цепи с распределенной и сосредоточенной м.д.с.

Исследования показали, что форма поля при прочих равных условиях зависит от расположения намагничивающей катушки на магнитопроводе и от соотношения l/c .

Построить объемное поле даже для простейшей магнитной цепи не представляется возможным, но с достаточной для практики точностью оно может быть представлено в виде суммы частичных объемных полей, где в пространстве, например между гранями полюсов 1 и 2 в направлении грани v поле принимается плоскопараллельным, а в остальной части пространства объемное поле подсчитывается по приближенным формулам.

Определение магнитной проводимости воздушного зазора при постоянном магнитном напряжении между ферромагнитными поверхностями

Участок любого плоскопараллельного магнитного поля можно характеризовать совокупностью линии напряженности поля и линий равного магнитного потенциала.

При построении картины поля должны выполняться следующие условия:

1. Магнитное сопротивление стали ферромагнитного тела полюсов и сердечников принимается равным нулю, вследствие чего линии индукции нормальны к поверхности ферромагнитных тел, которые в свою очередь являются поверхностями равного магнитного потенциала.

2. На всех участках поля линии напряженности поля (сплошные) и линии равного магнитного потенциала (пунктирные) должны пересекаться под прямыми углами.

3. Средняя длина l_{cp} и средняя ширина b_{cp} единичной трубки берутся приблизительно равными.

В общем случае полная проводимость какого-либо участка магнитного поля может быть определена формулой

$$G = \frac{\Phi}{U} = \frac{m\Delta\Phi}{n\Delta U} = \left(\frac{m}{n}\right)\Delta G = \frac{m}{n}\mu_0 \frac{ab_{cp}}{l_{cp}} = \mu_0 g b, \quad (2.18)$$

где удельная магнитная проводимость участка

$$g = \frac{m}{n} \cdot \frac{ab_{cp}}{l_{cp}} = 1;$$

Φ – магнитный поток рассматриваемого участка поля;

$\Delta\Phi$ – поток в одной трубке;

U – магнитное напряжение, приложенное между рассматриваемой длиной участка;

ΔU – магнитное напряжение, приложенное к единичной трубке;

m – число элементарных трубок потока в рассматриваемом участке;

n – число единичных трубок, последовательно соединенных в элементарной трубке;

ΔG – проводимость единичной трубки на глубине поля v .

ЛЕКЦИЯ №3

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ОБМОТОЧНЫХ ДАННЫХ. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. РАСЧЕТ ОБМОТОК

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНИТНЫХ ЦЕПЯХ АППАРАТОВ

Магнитная цепь аппарата, основные законы. Электромагниты нашли в аппаратостроении широкое применение и как элемент привода аппаратов (контакторы, пускатели, реле, автоматы, выключатели), и как устройство, создающее силы в муфтах, тормозах и подъемных механизмах.

Конфигурация магнитной цепи электромагнита зависит от назначения аппарата и может быть самой разнообразной.

Основные соотношения для магнитной цепи мы рассмотрим на примере клапанной системы, изображенной на рис. 3.1. Подвижная часть магнитной цепи называется якорем 1. Часть магнитной цепи, на которой сидит намагничивающая катушка 2, называется сердечником 3. Вертикальные и параллельные части магнитопровода 3 и 4 часто называют стержнями.

В клапанной системе якорь может иметь как поступательное движение, так и вращательное.

Намагничивающая катушка создает намагничивающую силу (н.с), под действием которой возбуждается магнитный поток. Этот поток замыкается как через зазор δ , так и между другими частями магнитной цепи, имеющими различные магнитные потенциалы.

Воздушный зазор δ , меняющийся при перемещении якоря, называется рабочим зазором. Соответственно поток, проходящий через рабочий зазор, называется рабочим потоком и обозначается обычно Φ_5 . Все остальные потоки в магнитной цепи называются потоками рассеяния $\Phi_{\text{в}}$. Сила, развиваемая якорем электромагнита, как правило, определяется потоком в рабочем зазоре $\Phi_{\text{в}}$.

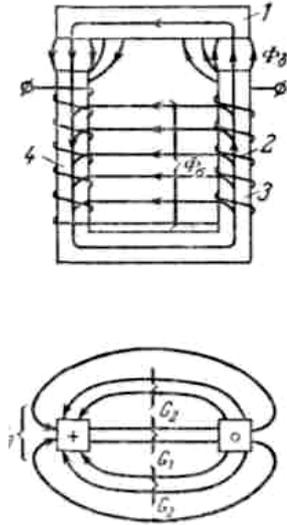


Рис. 3.1. Магнитная цепь клапанной системы

Задачей расчета магнитной цепи является либо определение н. с. катушки, необходимой для создания рабочего потока заданной величины (прямая задача), либо определение рабочего потока по известной н.с. катушки (обратная задача). Эти задачи могут быть решены с помощью двух законов Кирхгофа применительно к магнитной цепи.

Согласно первому закону алгебраическая сумма потоков в узле магнитной цепи равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0. \quad (3.1)$$

Второй закон Кирхгофа можно получить из известного закона полного тока

$$\oint H dl = \sum i \omega = \sum F_j, \quad (3.2)$$

где H – напряженность магнитного поля;

dl – элемент длины, по которому проходит магнитный поток;

$\sum i \omega = \sum F_j$ — сумма н.с., действующих в контуре.

Помня, что $B = \mu \cdot H$, можно написать в виде

$$\oint \frac{B}{\mu} dl = \sum i \cdot w \oint B \cdot S \cdot \frac{dl}{\mu \cdot S} = \sum i \cdot w, \quad (3.3)$$

где S – сечение магнитной цепи; μ – магнитная проницаемость.

Магнитная проницаемость μ характеризует проводимость магнитного материала цепи. Выражение $dl/\mu S$ аналогично сопротивлению элемента электрической цепи dl/x (где x – электрическая проводимость материала проводника). Тогда можно представить в виде

$$\oint \Phi dR_\mu = \sum i w , \quad (3.4)$$

где dR – магнитное сопротивление участка длиной dl .

Падение магнитного потенциала по замкнутому контуру равно сумме намагничивающих сил, действующих в этом контуре. Это и есть второй закон Кирхгофа магнитной цепи.

В системе единиц СИ размерность $\mu = 1\text{Гн}/1\text{м}$, следовательно, магнитное сопротивление получает размерность $\mu=1/1$ Гн – единица, деленная на генри.

В том случае, когда поток в отдельных частях магнитной цепи не меняется, интеграл можно заменить конечной суммой

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j R_{\mu j} = \sum_{j=1}^n F_j . \quad (3.5)$$

Таким образом, сумма падений магнитного напряжения по замкнутому контуру равна сумме намагничивающих сил, связанных с потоками, проходящими через магнитную цепь.

По аналогии с электрической цепью магнитное сопротивление участка конечной длины l можно представить в виде

$$R_\mu = \frac{1}{\mu} \frac{l}{S} = \rho_\mu \frac{l}{S} , \quad (3.6)$$

где ρ – магнитное сопротивление единицы длины магнитной цепи при сечении, также равном единице, м/гн.

Полная аналогия законов Кирхгофа электрической и магнитной цепей позволяет составить для последней электрическую схему замещения.

Для расчета по (3.5) необходимо иметь кривую $\rho(B)$. Если задана не кривая $\rho(B)$, а кривая намагничивания материала $B(H)$, для расчета

удобно использовать (3.2). Если на отдельных участках индукция постоянна, то интеграл в (3.2) можно заменить конечной суммой

$$\sum_{j=1}^n H_j I_j = \sum_{j=1}^n F_j . \quad (3.7)$$

По известной индукции в каждом участке с помощью кривой $B(H)$ находят напряженность H_j на участке, после чего с помощью (3.7) можно отыскать потребную н.с. катушки.

При расчете магнитной цепи часто более удобным является введение величины, обратной магнитному сопротивлению – магнитной проводимости

$$G = \frac{1}{R_\mu} = \frac{\mu S}{l} . \quad (3.8)$$

Уравнение (3.5) при этом принимает вид:

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j \frac{1}{G_j} = \sum_{j=1}^n F_j . \quad (3.9)$$

Для простейшей неразветвленной цепи

$$\Phi = I w G . \quad (3.10)$$

Магнитное сопротивление и проводимость ферромагнитных материалов являются сложной нелинейной функцией индукции. Зависимость относительной магнитной проницаемости $\mu_r = \mu / \mu_0$, а следовательно, и магнитной проводимости от величины индукции для магнитомягкого материала представлена на рис. 1.2. Максимальное значение $\mu_{\text{МАКС}}$ (минимальное магнитное сопротивление) имеет место при средних величинах индукции. В слабых и сильных полях магнитное сопротивление материала резко возрастает. Изменение магнитного сопротивления от величины индукции сильно затрудняет решение как прямой, так и обратной задачи.

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Расчет потоков рассеивания и индуктивности катушки без учета сопротивления стали. Для электромагнитов, у которых катушка располагается на стержне, поток рассеяния связан с катушкой так, что с различными витками сцеплен различный поток рассеяния. Такая система называется системой с распределенной намагничивающей силой.

Рассмотрим закон изменения потока вдоль сердечников и разности магнитных потенциалов между ними в клапанной системе (см. рис. 3.1).

Намагничивающая сила на единицу длины стержня равна Iw/l . Разность магнитных потенциалов между точками, расположенными на расстоянии x от основания, равна

$$U_{\mu x} = \frac{Iw}{l} x. \quad (3.11)$$

Тогда элементарный поток рассеяния с участка dx , расположенного на расстоянии x от основания, можно найти с помощью

$$d\Phi_{\sigma x} = \frac{I \cdot w}{l} \cdot x \cdot q \cdot dx. \quad (3.12)$$

Произведя интегрирование в пределах от 0 до x , получим поток, выходящий из стержня на длине x :

$$\Phi_{\sigma x} = \frac{Iw}{l} \frac{gx^2}{2}. \quad (3.13)$$

Поток, проходящий через сечение сердечника на расстоянии x от основания, равен:

$$\Phi_x = \Phi_{\delta} + \Phi_{at} + \Phi_{\sigma x} = \Phi_{\delta} + \frac{Iw}{2l} dg(l^2 - x^2), \quad (3.14)$$

поток в основании сердечника получим, положив $x = 0$:

$$\Phi_0 = \Phi_z + \frac{Iwgl}{2}. \quad (3.15)$$

Без учета сопротивления магнитопровода

$$\Phi_{\delta} = I \cdot w \cdot G_{\delta} \quad \Phi_0 = \Phi_{\delta} \left(1 + \frac{q \cdot l}{2 \cdot G_{\delta}} \right). \quad (3.16)$$

Разность магнитных потенциалов между стержнями меняется по линейному закону и достигает максимального значения Iw у рабочего воздушного зазора. Магнитный поток согласно (3.14) меняется по закону параболы и достигает максимального значения у основания стержня. Известно, что индуктивность катушки L , от которой в большой степени зависит время срабатывания электромагнита, определяется как отношение потокосцепления к току.

Тогда

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\Psi_{\delta} + \Psi_0}{I} = \frac{\Phi_{\delta} w}{I} + \frac{\Psi_0}{I}, \quad (3.17)$$

но

$$\Psi_0 = \int_0^l \frac{w}{l} x d\Phi_{ax} = \frac{Iw^2}{l^2} g \int_0^l x^2 dx = \frac{Iw^2}{3} gl, \quad (3.18)$$

следовательно,

$$L = w^2 \left(G_{\delta} + \frac{gl}{3} \right). \quad (3.19)$$

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Магнитные цепи на переменном токе обладают следующими особенностями.

1. Ток в катушке электромагнита зависит главным образом от ее индуктивного сопротивления.

2. Магнитное сопротивление цепи зависит от потерь в стали и наличия короткозамкнутых обмоток, расположенных на сердечнике.

3. Магнитопровод обычно выполняется шихтованным (с целью уменьшения потерь на вихревые токи), прямоугольного поперечного сечения.

а) Магнитная система без активных потерь в стали и насыщения. Ради упрощения при расчете магнитной цепи мы сделаем до-

пущения, что напряжение, ток в катушке и потоки меняются по синусоидальному закону.

Рассмотрим вначале простейшую цепь без учета сопротивления стали, потерь в ней и потоков рассеяния. Напряжение сети, приложенное к катушке, уравнивается активным и реактивным падением напряжения

$$U^2 = (IR)^2 + (IX)^2, \quad (3.20)$$

где напряжение U и ток I берутся в действующих значениях.

Воспользовавшись (3.17) и (3.19), получим:

$$Ix = I \cdot \omega \cdot L = I \cdot \omega \cdot \frac{\Psi}{I} = w \cdot \omega \cdot \Phi_{\delta} = \omega \cdot w \cdot I \cdot w \cdot G_{\delta} = I \cdot \omega \cdot w^2 \frac{\mu_0 \cdot S}{2\delta}. \quad (3.21)$$

Для случая шунтовой обмотки, когда катушка подключается на зажимы источника напряжения, активное сопротивление обмотки, как правило, значительно меньше реактивного. Если пренебречь активным падением напряжения, то $U=IX$. Но так как

$$Ix = 4,44 f w \Phi_m, \quad (3.22)$$

получим

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 f w}, \quad (3.23)$$

где Φ_m – амплитудное значение потока.

Таким образом, при сделанных выше допущениях (активное сопротивление обмотки и потери в сердечнике равны нулю) поток, связанный с катушкой, не зависит от рабочего зазора и является величиной постоянной.

При допущении, что $U=IX$, из (3.21) следует:

$$I = \frac{2 \cdot U \cdot \delta}{\omega \cdot w^2 \cdot \mu_0 \cdot S}. \quad (3.24)$$

С ростом зазора индуктивное сопротивление обмотки уменьшается, а ток в обмотке увеличивается в соответствии (3.24); поскольку величина потока согласно (3.23) должна остаться неизменной, то соответственно с ростом зазора δ растет н.с. Iw , т.е. ток. Если учесть активное сопротивление обмотки (при условии, что в заданном диапа-

зоне изменения зазора $R \ll wL$, то с ростом зазора величина тока будет расти, а величина потока будет уменьшаться согласно уравнению

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{U^2 - I^2 R^2}}{4,44 f w} . \quad (3.25)$$

Таким образом, с ростом рабочего зазора величина потока будет падать с зазором, как это имеет место и в цепи постоянного тока. Однако в магнитной цепи переменного тока уменьшение потока является следствием роста падения напряжения на активном сопротивлении обмотки, а в цепи постоянного тока – роста магнитного сопротивления воздушного зазора.

Если учитывать поток рассеяния Φ_σ , то в схеме замещения параллельно сопротивлению R_b , зависящему от величины зазора, необходимо включить неизменное сопротивление R_a . В результате при увеличении зазора ток в обмотке нарастает меньше, чем это следует из (3.24).

При составлении электрической схемы замещения магнитной цепи магнитное сопротивление воздушных промежутков заменяется численно равным ему активным сопротивлением.

В электрических аппаратах, работающих на переменном токе, для изменения фазы магнитного потока применяются короткозамкнутые витки и обмотки. Влияние последних может быть учтено введением в схему замещения реактивного (индуктивного) сопротивления.

Действительно, пусть в клапанной системе (рис. 3.2) потери в магнитопроводе и его магнитное сопротивление равны нулю, а ключ А включен. Магнитный поток, проходя через контур витка w_K , наводит в нем э.д.с. Возникающий в витке ток создает свой магнитный поток. Ради упрощения рассуждений положим, что $X_k = 0$. Для мгновенного значения н.с. обмотки можно написать:

$$i w = \Phi_\delta \frac{1}{G_\delta} \quad i_k = \frac{e_k}{r_k} = - \frac{w_k \frac{d\Phi_\delta}{dt}}{r_k} . \quad (3.26)$$

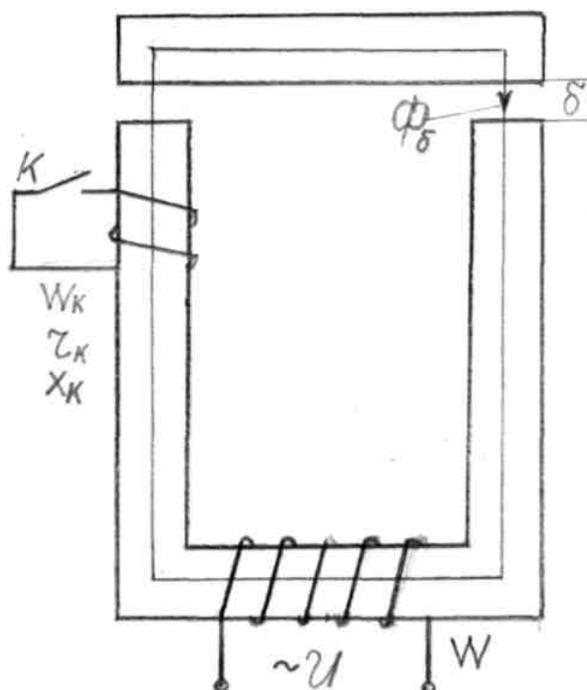


Рис. 3.2. Магнитная цепь с короткозамкнутой обмоткой

Используя полученные соотношения, получим

$$U_\mu = iw = \Phi_\delta R_\mu + \frac{w_K^2}{r_K} \frac{d\Phi_\delta}{dt}, \quad iw = \Phi_\delta \frac{1}{G_\delta} + \frac{w_K^2}{r_K} \frac{d\Phi_\delta}{dt}. \quad (3.27)$$

Для электрической цепи, состоящей из последовательно включенного сопротивления и индуктивности, падение напряжения может быть выражено следующим образом:

$$U = IR + L \frac{di}{dt}. \quad (3.28)$$

Проводя аналогию между магнитной и электрической цепью, введем понятие реактивного магнитного сопротивления.

Мгновенному значению тока i соответствует мгновенное значение потока Φ ; активному сопротивлению цепи R – активное – магнитное сопротивление R_μ , индуктивности L – величина w^2/r_K . Для электрической цепи переменного тока в комплексной форме можно записать:

$$U = IR + Ijx, \quad (3.29)$$

где $x = \omega L$.

Аналогично для магнитной цепи

$$U_{\mu} = \Phi R_{\mu} + \Phi j x_{\mu} , \quad (3.30)$$

где $x_{\mu} = \omega \frac{w_K^2}{r_K}$.

Таким образом, короткозамкнутая обмотка с чисто активным сопротивлением в схеме замещения представляется реактивным магнитным сопротивлением. Если $r_K = \infty$ (т.е. обмотка разомкнута), то $X_{\mu} = 0$. Если $r_K = 0$, то $X_{\mu} = \infty$ и магнитный поток через такую обмотку пройти не может. Если обмотка имеет и активное r_K , и индуктивное X_K сопротивление, то согласно

$$x_{\mu K} = r_K \frac{\omega w_K^2}{r_K^2 + x_K^2}$$

можно записать:

$$R_{\mu K} = x_K \frac{\omega w_K^2}{r_K^2 + x_K^2} . \quad (3.31)$$

б) Магнитная цепь с потерями в стали. При протекании потока по магнитопроводу в нем создаются активные потери за счет вихревых токов и гистерезиса. Эти потери в схеме замещения магнитной цепи могут быть представлены потерями в фиктивной короткозамкнутой обмотке, имеющей только активное сопротивление. Параметры этой обмотки находятся из условия равенства потерь в стали и потерь в этой короткозамкнутой обмотке.

При синусоидальном изменении потока

$$E_{K.3} = 4,44 f w_{K.3} \Phi_m = \frac{\omega w_{K.3}}{\sqrt{2}} \Phi_m , \quad (3.32)$$

откуда

$$w_{K.3} = \frac{E_{K.3} \sqrt{2}}{\omega \Phi_m} .$$

Из условия равенства потерь можно записать:

$$P_{\text{СТ}} = \frac{E_{\text{КЗ}}^2}{r_{\text{КЗ}}}, \quad r_{\text{КЗ}} = \frac{E_{\text{КЗ}}^2}{P_{\text{СТ}}}. \quad (3.33)$$

Воспользовавшись полученными соотношениями, можно получить:

$$X_{\mu\text{СТ}} = \frac{\omega w_{\text{КЗ}}^2}{r_{\text{КЗ}}} = \frac{P_{\text{СТ}}}{\omega \Phi_m^2}. \quad (3.34)$$

Таким образом, зная активные потери в стали и магнитный поток в сечении, можно определить $X_{\mu\text{СТ}}$, учитывающее в схеме замещения потери на вихревые токи и гистерезис.

Кроме реактивного магнитного сопротивления, сталь обладает также активным магнитным сопротивлением $R_{\mu\text{СТ}}$.

Аналогично электрической цепи можно ввести понятие удельного активного магнитного сопротивления

$$R_{\mu} = \rho_R \frac{l}{S},$$

где ρ_R – удельное активное магнитное сопротивление стали;

$$X = \frac{2P}{\omega \Phi_m^2} = \frac{2P_0 \gamma l S}{\omega B_m^2 S^2} = \rho_x \frac{l}{S}, \quad (3.35)$$

где P_0 – потери на единицу массы сердечника; γ – плотность; l и S – длина и сечение сердечника; ρ_x – удельное реактивное магнитное сопротивление стали;

$$Z_{\mu} = \rho_z \frac{l}{S}, \quad (3.36)$$

где ρ_z – полное удельное магнитное сопротивление стали.

Зависимость ρ_R , ρ_x и ρ_z от индукции для стали Э-12 представлена на рис. 3.3. Так как

$$Z_{\mu} = \sqrt{R_{\mu}^2 + X_{\mu}^2}, \quad \text{то } \rho_z = \sqrt{\rho_R^2 + \rho_x^2}. \quad (3.37)$$

Если задан поток и известны размеры участка, то сначала находят индукцию, а затем по кривым, аналогичным рис. 3.3, определяют ρ_R ,

ρ_x и ρ_z . Воспользовавшись (3.35), (3.36) и (3.37) можно вычислить магнитные сопротивления.

Однако чаще дается кривая намагничивания на переменном токе, связывающая максимальное значение индукции B_m с действующим значением напряженности H с учетом активных потерь.

$$\rho_z = \frac{\sqrt{2}H}{B_m}, Z_\mu = \frac{U_\mu}{\Phi_m} = \frac{Hl\sqrt{2}}{B_m S} = \rho_z \frac{l}{S}, R_\mu = \sqrt{Z_\mu^2 + X_\mu^2}, B_m = \frac{\Phi_m}{S}. \quad (3.38)$$

Расчет магнитной цепи переменного тока ведется с помощью двух уравнений Кирхгофа в комплексной форме методом последовательных приближений.

Если задано напряжение на обмотке, ее активное сопротивление и размеры магнитной цепи, то сначала находят поток без учета сопротивления стали и активного сопротивления обмотки, а затем строят схемы замещения, уточняя каждый раз значения магнитных сопротивлений, потоков и н.с. Расчет производится до тех пор, пока потоки в рабочем зазоре двух соседних приближений будут отличаться друг от друга не более чем на 10%.

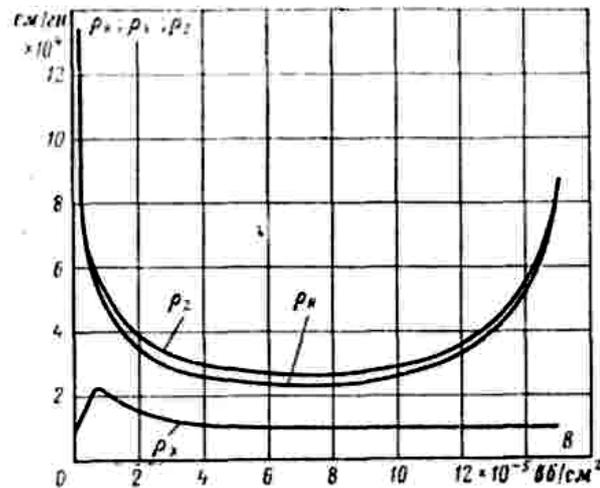


Рис. 3.3. Удельные сопротивления стали

ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

В результате расчета магнитной цепи определяется поток в катушке и ее н.с. Обмотка должна быть рассчитана таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить требуемую н.с., а с другой – чтобы

максимальная температура обмотки не превышала допустимой для используемого класса изоляции.

В зависимости от способа включения различают параллельные (шунтовые) и последовательные (сериесные) обмотки. В первом случае напряжение, приложенное к обмотке, постоянно по своему действующему значению.

Во втором – сопротивление обмотки электромагнита во много раз меньше сопротивления остальной части цепи.

а) **Расчет обмотки электромагнита постоянного тока.** Эскиз обмотки представлен на рис. 3.4. Заданы напряжение U и н.с. I_w . Требуется рассчитать и спроектировать катушку. Сечение провода q находим исходя из требуемой н.с.

$$I_w = \frac{U}{R} w = \frac{Uq w}{\rho l_{cp} w} = \frac{Uq}{\rho l_{cp}}, \quad (3.39)$$

или

$$q = \frac{I_w \rho l_{cp}}{U},$$

где ρ – удельное сопротивление; l_{cp} – средняя длина витка; R – сопротивление обмотки, равное $\rho \frac{l_{cp} w}{q}$.

Из уравнения следует, что при неизменной средней длине витка и заданном ρ н.с. определяется произведением Uq . Если при неизменном напряжении и средней длине витка требуется увеличить н.с., то необходимо взять провод большего сечения. При этом обмотка будет иметь меньшее число витков.

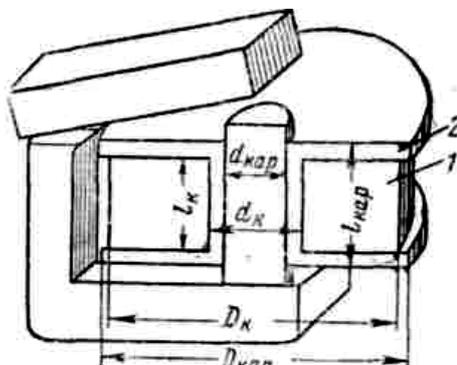


Рис. 3.4. Электромагнит с обмоткой

После определения сечения провода с помощью таблиц сортаментов находится ближайший стандартный диаметр провода.

Если выполнить обмотку проводом данного диаметра, то н. с. обмотки не будет зависеть от способа укладки провода. При «дикой» (нерядовой) обмотке число витков при том же окне уменьшится по сравнению с рядовой, величина тока пропорционально увеличится, а н.с. катушки останется без изменения.

Мощность, потребляемая катушкой, при дикой обмотке увеличится, поскольку уменьшится коэффициент заполнения f_m .

При изменении питающего напряжения и сохранении размера окна обмотки должно иметь место равенство $U_1 q_1 = U_2 q_2$ так как ρ и l_{cp} остаются неизменными. При этом н.с. обмотки останется без изменения. Поскольку при переходе с одного напряжения на другое изменяется диаметр провода (а следовательно, и толщина изоляции), коэффициент заполнения обмотки f_m также меняется. Можно получить:

$$P_1 f_1 = P_2 f_2 .$$

Если $U_1 < U_2$, то при переходе с напряжения U_1 на U_2 диаметр провода уменьшится. При меньшем диаметре провода из-за возросшей относительной толщины изоляции коэффициент заполнения уменьшится. Следовательно, *при переходе на более высокое напряжение мощность, потребляемая катушкой, увеличивается.*

Для ориентировочной оценки нагрева катушки можно пользоваться следующими рекомендациями. Опытным путем установлено, что в катушке на изоляционном каркасе, выполненной проводом ПЭЛ, максимальная температура не превысит 105°C , если на каждый ватт выделяемой мощности будет приходиться определенная боковая поверхность ($\sigma_0 = S_{бок} / P$ – удельная охлаждающая боковая поверхность). Величина этой поверхности зависит от геометрии катушки:

$$\begin{aligned}
\text{при } \frac{L}{D} < 1: \quad \sigma_0 &\geq 8 \text{ см}^2/\text{вт}; \\
\text{при } \frac{L}{D} = 1: \quad \sigma_0 &\geq 10 \text{ см}^2/\text{вт}; \\
\text{при } \frac{L}{D} > 1: \quad \sigma_0 &\geq 12 \text{ см}^2/\text{вт},
\end{aligned}
\tag{3.40}$$

где L – длина катушки; D – внешний диаметр.

Если после расчета окажется, что $\sigma < \sigma_0$, то это значит, что температура обмотки будет выше допустимой.

Можно получить:

$$I_w = \sqrt{\frac{P Q_K f_M}{l_{cp} \rho}} . \tag{3.41}$$

Если при требуемой н.с. мощность P получается больше, чем $S_{\text{бок}} / \sigma_0$, то необходимо либо уменьшить н.с. обмотки, либо увеличить площадь обмоточного окна Q_K .

После приближенной оценки теплового режима катушки необходимо определить максимальную температуру внутри нее.

Для последовательной обмотки исходными величинами для расчета являются н.с. (I_w) и ток цепи I_H . Число витков обмотки находится из выражения

$$w = \frac{(I_w)}{I_H} . \tag{3.42}$$

Сечение провода можно выбрать исходя из рекомендуемой плотности тока, равной $2 \div 4$ а/мм² – для продолжительного режима работы, $5 \div 12$ а/мм² – для повторно-кратковременного режима работы, $13 \div 30$ а/мм² – для кратковременного режима работы. Эти величины можно увеличить примерно в 2 раза при сроке службы до 500 ч.

Окно, занимаемое рядовой обмоткой, определяется числом витков и диаметром провода по изоляции.

б) Расчет обмотки электромагнитов переменного тока. Исходными данными для расчета параллельной катушки являются ампли-

туда н.с., амплитуда потока и напряжение. Напряжение сети уравнивается активным и реактивным падением напряжения

$$U^2 = (IR)^2 + (4,44 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_m)^2. \quad (3.43)$$

Поскольку величины тока и сопротивления могут быть рассчитаны только после определения числа витков, то представленное выражение не позволяет сразу найти все параметры катушки. Задача решается методом последовательных приближений.

Так как активное падение напряжения значительно меньше неактивного, то в начале расчета можно положить $IR = 0$.

Тогда число витков обмотки равно: $w = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_m}$.

Так как при расчете w мы пренебрегаем активным падением напряжения, действительное число витков должно быть несколько меньше. Обычно берут

$$w = (0,7 \div 0,8) \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_m}, \quad (3.44)$$

$$I = \frac{I_m w}{\sqrt{2} w}.$$

Сечение провода обмотки определяют, задавшись плотностью тока. Выбрав стандартный диаметр и способ укладки, находим коэффициент заполнения f_m и площадь Q_k окна катушки:

$$Q_k = \eta \frac{\pi d^2}{4 f_m}. \quad (3.45)$$

После этого определяем среднюю длину витка l_{cp} и активное сопротивление обмотки

$$R = \rho \frac{l_{cp} w}{q}. \quad (3.46)$$

Теперь производим проверку выбранных параметров: если напряжение сети в квадрате U^2 отличается от суммы $(IR)^2$ и $(4,44 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_m)^2$ более чем на 10%, то необходимо варьировать число витков до тех пор, пока не получим удовлетворительного совпадения.

После расчета активного сопротивления производится проверка катушки на нагрев. Расчет ведется так же, как и для катушек постоянного тока. Характерной особенностью здесь является нагрев магнитопровода за счет потерь от вихревых токов и гистерезиса. Отвод тепла, выделяемого в самой катушке через сердечник, затруднен. Поэтому точка с максимальной температурой лежит на внутреннем радиусе катушки. Из-за плохого охлаждения катушки через сердечник в катушке стремятся развить поверхность торцов, через которые может отдаваться значительная часть тепла.

Если полное сопротивление обмотки электромагнита при любом рабочем зазоре значительно меньше полного сопротивления цепи (последовательная обмотка), то величина тока в обмотке электромагнита не зависит от положения якоря. Расчет таких обмоток ведется так же, как и последовательных обмоток постоянного тока. Закон изменения потока в рабочем зазоре такого электромагнита аналогичен закону в электромагните постоянного тока, поскольку электромагнит работает при постоянной н.с. катушки.

$$\Delta U = \sqrt{(IR)^2 + (4,44w\Phi_m)^2} . \quad (3.47)$$

Если электромагнит с параллельной катушкой питается от источника с другим напряжением и сила тяги должна остаться той же, то обмоточные данные должны быть соответственно изменены. Величина н.с. и угол сдвига между током и напряжением при этом также считаются неизменными. Должны быть соблюдены следующие соотношения:

$$\text{а) } \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}; \quad \text{б) } U_1 q_1 = U_2 q_2; \quad \text{в) } Q_1 f_1 = Q_2 f_2 . \quad (3.48)$$

Полная мощность обмоток при переходе с одного напряжения на другое при соблюдении указанных условий не изменяется, так как

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 . \quad (3.49)$$

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При заданном потоке падение магнитного потенциала уменьшается с уменьшением магнитного сопротивления. Так как сопротивление обратно пропорционально магнитной проницаемости материала, при данном потоке магнитная проницаемость должна быть возможно выше. Это позволяет уменьшить н.с. катушки и мощность, необходимую для срабатывания электромагнита; уменьшаются размеры катушки, обмоточного окна и всего электромагнита. Уменьшение н.с. катушки при прочих неизменных параметрах уменьшает температуру обмотки.

Вторым важным параметром материала является индукция насыщения. Сила, развиваемая электромагнитом, пропорциональна квадрату индукции. Поэтому чем больше величина допустимой индукции, тем больше величина развиваемой силы при тех же размерах.

После того как катушка электромагнита обесточивается, в системе остается остаточный поток, который определяется коэрцитивной силой материала и проводимостью рабочего зазора. Остаточный поток может привести к залипанию якоря. Во избежание этого явления требуется, чтобы материал обладал низкой коэрцитивной силой (малой шириной петли гистерезиса).

Существенными требованиями являются низкая стоимость материала и его технологичность.

В электромагнитах переменного тока для компенсации активных потерь в стали приходится затрачивать дополнительную энергию. Это приводит к увеличению намагничивающего тока в катушке аппарата. В связи с этим материалы, используемые для электромагнитов переменного тока, должны иметь малые потери на вихревые токи и гистерезис. Сердечники для таких электромагнитов делаются шихтованными, причем чем выше частота тока, тем меньше должна быть толщина листа. Пластины магнитопровода изготавливаются из листовой стали штамповкой. Для быстродействующих электромагнитов постоянного тока также применяются шихтованные сердечники, так как при этом уменьшаются вихревые токи, дающие замедление нарастания потока.

Наряду с указанными свойствами магнитные характеристики материалов должны быть стабильны (не меняться от температуры, времени, механических ударов).

МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Постоянные магниты – это тела, выполненные из специальных сплавов или изготовленные путем спекания частиц различных материалов, которые, будучи намагничеными, способны за счет запасенной магнитной энергии служить источником магнитного поля.

Важнейшей характеристикой материала постоянного магнита является кривая размагничивания, представляющая собой часть предельной петли гистерезиса $B = f(H)$ этого материала, расположенная во втором квадранте осей B и H .

Существуют и другие разновидности кривой размагничивания: $B_M = f(H)$, где $B_M = \mu_0 M$ – индукция намагниченности M материала, и $M = f(H)$.

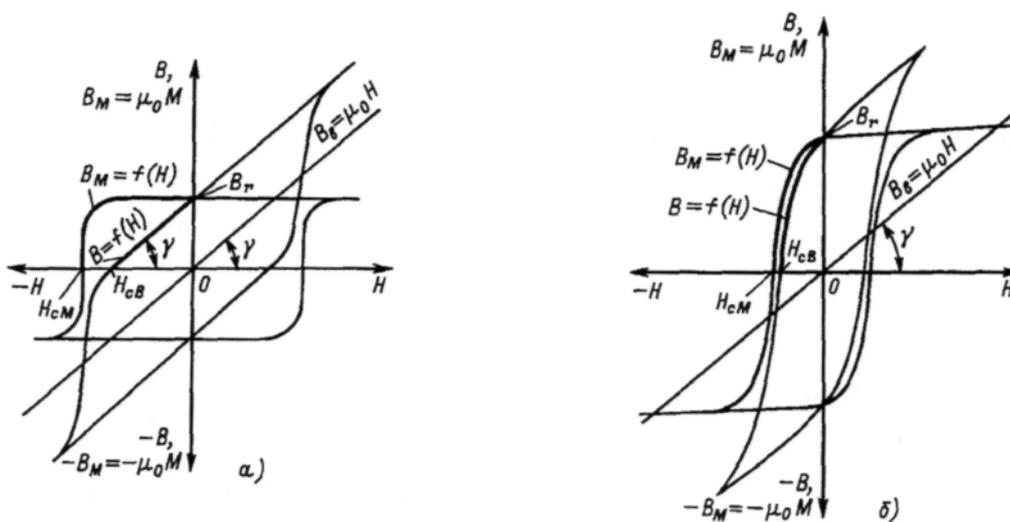


Рис. 3.5. Предельные петли гистерезиса и кривые размагничивания $B_M = f(H)$ и $B = f(H)$ для закритического (а) и докритического (б) материалов

Существующие магнитотвердые материалы подразделяются на две группы: *закритические* и *докритические*.

У материалов первой группы «колени» левой, ниспадающей части петли гистерезиса лежит в третьем квадранте, а ее участок в пре-

делах второго квадранта прямолинейен (рис. 3.5, а). У материалов второй группы «колени» этой части петли гистерезиса находятся во втором квадранте, и ее участок в пределах второго квадранта имеет вид гиперболы (рис. 3.5, б).

Примерами закритических материалов служат магнитотвердые ферриты марок 6БИ240, 15БА300; материал марки К.С37 на основе интерметаллического соединения «самарий-кобальт»; сплавы «неодим-железо-бор». В группу докритических материалов входят сплавы типа альнико и монокристаллы из аналогичных материалов. Например, сплавы марки ЮН14ДК24, ЮНДК35Т5АА, ЮНДК40Т8.

Некоторые марки магнитотвердых ферритов относятся к *критическим* материалам (промежуточным между закритическими и докритическими), у которых «колени» кривой размагничивания $B=f(H)$ находится на границе второго и третьего квадрантов (марки 18БА220, 22БА220). Материал марки КСП37 на основе соединения самарий-кобальт можно отнести также к критическим.

ЛЕКЦИЯ №4

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА. РАСЧЕТ СИЛЫ ТЯГИ, ФОРМУЛА МАКСВЕЛЛА. СИЛА ТЯГИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. МАГНИТНЫЙ ДЕМПФЕР

СИЛА ТЯГИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

а) Энергетический баланс электромагнита постоянного тока.

Рассмотрим процесс возникновения магнитного поля в простейшем клапанном электромагните (рис. 4.1, а). После включения цепи напряжение источника уравнивается активным падением напряжения и э.д.с. самоиндукции:

$$u = ir + \frac{d\psi}{dt} \quad (4.1)$$

Умножив обе части уравнения на idt , получим:

$$uidt = i^2 rdt + id\psi \quad (4.2)$$

Произведя интегрирование, получим:

$$\int_0^t uidt = \int_0^t i^2 r dt + \int_0^\psi id\psi, \quad (4.3)$$

где ψ – потокосцепление к моменту времени t .

Левая часть равенства представляет энергию, которая затрачена источником тока. Первый член правой части есть потери энергии в активном сопротивлении цепи, второй – энергия, затраченная на создание магнитного поля. До тех пор, пока сила, развиваемая электромагнитом, меньше силы пружины, якорь электромагнита неподвижен, и потокосцепление нарастает при неизменном значении рабочего зазора δ_1 . Зависимость $\psi = f(i)$ при этом зазоре представлена кривой 1 (рис. 4.1, б).

Допустим, что при достижении значения потокосцепления ψ_1 сила электромагнита стала больше силы пружины и якорь переместился в положение, при котором рабочий зазор стал равен δ_2 . Так как при меньшем зазоре проводимость рабочего зазора возрастает, потокосцепление увеличится до значения ψ_2 . Величина тока при этом увеличится до значения i_2 . Если изобразить зависимость $\psi = f(i)$ при зазоре δ_2 , то получим кривую 2 (см. рис. 4.1, б). До начала трогания якоря энергия магнитного поля, запасенная в цепи:

$$A_1 = \int_0^{\psi_1} id\psi = m_i m_\psi S_{0ab}, \quad (4.4)$$

где m_i – масштаб по оси тока, А/мм; m_ψ – масштаб по оси потокосцепления в · сек / мм, S_{0ab} – площадь криволинейного треугольника Oab , мм².

При движении якоря потокосцепление изменится от ψ_1 до ψ_2 . Энергия магнитного поля при этом возросла на величину A_2 :

$$A_2 = \int_{\psi_1}^{\psi_2} id\psi = m_i m_\psi S_{abcd}, \quad (4.5)$$

где S_{abcd} – площадь криволинейной трапеции.

При переходе от зазора δ_1 к зазору δ_2 якорь электромагнита совершил механическую работу A_3 .

Энергия, накопленная в магнитном поле, к концу хода равна A_4 :

$$A_4 = \int_0^{\psi_2} i d\psi = m_i m_\psi S_{0cd} . \quad (4.6)$$

На основании закона сохранения энергии можно написать:

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4 . \quad (4.7)$$

Механическая работа, совершенная якорем электромагнита, определяется из

$$A_3 = A_1 + A_2 - A_4 . \quad (4.8)$$

Согласно рис. 4.1 эта энергия равна:

$$A_3 = m_i m_\psi (S_{0ab} + S_{abcd} - S_{0cd}) = m_i m_\psi S_{0ad} . \quad (4.9)$$

б) Расчет силы тяги электромагнита постоянного тока. Средняя сила на ходе якоря от δ_1 до δ_2 равна:

$$F_{cp} = \frac{A_3}{\Delta x} = -\frac{A_3}{\Delta\delta} = -\frac{A_3}{\delta_2 - \delta_1} , \quad (4.10)$$

где Δx – перемещение якоря, а $\Delta\delta$ – уменьшение зазора.

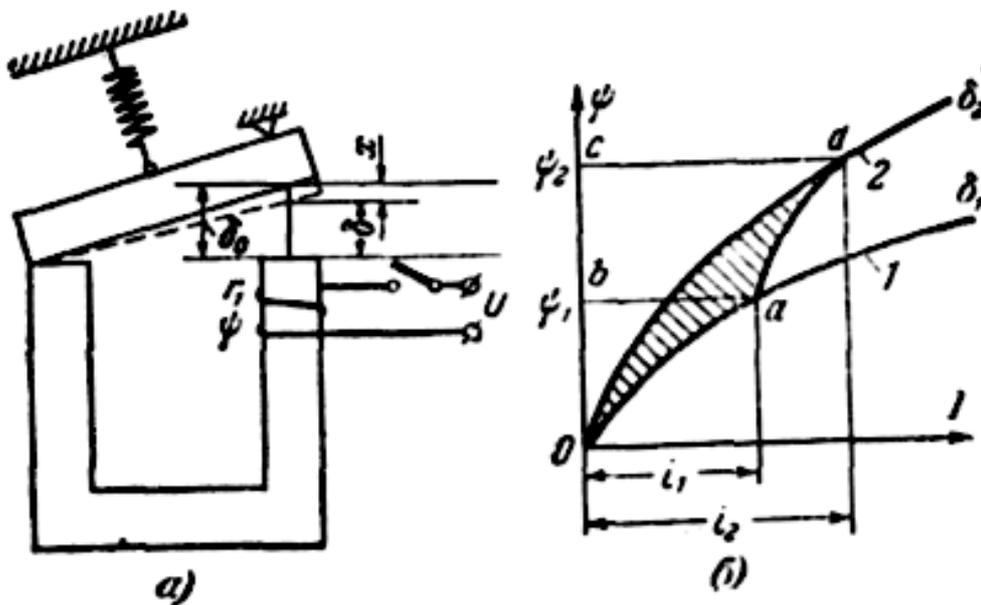


Рис. 4.1. К определению силы тяги электромагнита

Следует учитывать, что $x = \delta_0 - \delta$ (см. рис. 4.1, а). Тогда $dx = -d\delta$.

Для расчета силы, развиваемой электромагнитом, необходимо

определить механическую работу A_3 , совершаемую электромагнитом при небольшом перемещении якоря, после чего разделить эту работу на изменение зазора, что в пределе дает

$$F = -\frac{dA_3}{d\delta} \quad (4.11)$$

Сила F действует в сторону уменьшения зазора.

Очевидно, что для каждого элементарного перемещения якоря можно определить свое A_3 и найти среднюю силу, развиваемую на данном участке хода якоря.

Зависимость тяговой силы электромагнита от величины рабочего зазора при неизменном значении тока в его обмотке называется статической характеристикой электромагнита. Величина силы может быть найдена с помощью рис. 4.2:

$$F_1 = -\frac{m_i m_\psi S_{0ab}}{\delta_2 - \delta_1} \quad (4.12)$$

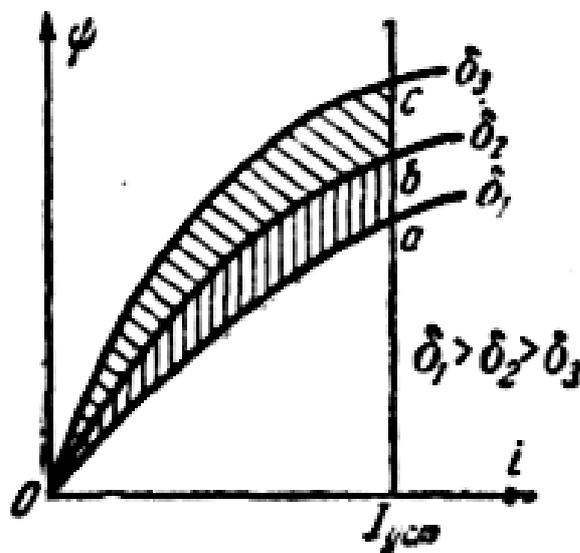


Рис. 4.2. К определению силы тяги

Эта сила развивается электромагнитом при среднем зазоре

$$\delta_{1cp} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \quad (4.13)$$

Аналогично определяется сила

$$F_2 = -\frac{m_i m_\psi S_{0bc}}{\delta_2 - \delta_1} \quad (4.14)$$

которая развивается при среднем зазоре

$$\delta_{2cp} = \frac{\delta_2 + \delta_3}{2}. \quad (4.15)$$

На готовом электромагните статическая характеристика может быть легко снята. Для этого в воздушный зазор электромагнита ставится немагнитная прокладка, после чего к электромагниту подводится напряжение. С помощью динамометра постепенно увеличивается противодействующая сила до тех пор, пока якорь не оторвется от сердечника. Эта сила в момент отрыва будет равна статическому усилию при зазоре, равном толщине прокладки. После этого меняют толщину прокладки и опыт повторяют при новом значении зазора.

Величина силы, развиваемой электромагнитом, может быть рассчитана с помощью формулы Максвелла. Если поле в рабочем зазоре равномерно и полюсы не насыщены, то формула Максвелла для силы в одном зазоре имеет следующий вид:

$$F = \frac{1}{2\mu_0} B^2 S. \quad (4.16)$$

в) Аналитический расчет силы для ненасыщенных электромагнитов. Исходя из закона сохранения энергии можно показать, что энергия, полученная магнитным полем при элементарном перемещении якоря, равна механической работе, произведенной якорем, и изменению запаса электромагнитной энергии:

$$id\psi = Fdx + dW_m, \quad (4.17)$$

где $id\psi$ – элементарная энергия, полученная полем при перемещении якоря; $F \cdot dx$ – элементарная работа, произведенная якорем; dW_m – приращение магнитной энергии. Из уравнения легко получить

$$F = i \frac{d\psi}{dx} - \frac{dW_m}{dx}. \quad (4.18)$$

Учитывая, что $dx = -d\delta$, $W_m = \frac{1}{2}i\psi$ (для линейной магнитной цепи), получаем

$$F = -i \frac{d\psi}{d\delta} + \frac{1}{2}i \frac{d\psi}{d\delta} + \frac{1}{2}\psi \frac{di}{d\delta} = -\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{d\delta} + \frac{1}{2}\psi \frac{di}{d\delta}. \quad (4.19)$$

Для статической тяговой характеристики $di/d\delta = 0$, так как ток в цепи не меняется. Тогда

$$F = -\frac{1}{2} i \frac{d\psi}{d\delta}. \quad (4.20)$$

Для клапанного электромагнита потокосцепление зависит от рабочего потока и потока рассеяния:

$$\psi = \psi_{\delta} + \psi_{\sigma}. \quad (4.21)$$

Поскольку цепь линейна (пренебрегаем насыщением стали), то потокосцепление ψ_{δ} , обусловленное рабочим потоком Φ_{δ} :

$$\psi_{\delta} = \Phi_{\delta} w = I w^2 G_{\delta}. \quad (4.22)$$

В свою очередь потокосцепление ψ_{σ} , обусловленное потоком рассеяния:

$$\psi_{\sigma} = \Phi_{\sigma} w = I w^2 \frac{gl}{2}. \quad (4.23)$$

Подставив ψ_{δ} и ψ_{σ} , получим

$$F = -\frac{1}{2} (I w)^2 \left[\frac{dG_{\delta}}{d\delta} + \frac{1}{2} \frac{d(gl)}{d\delta} \right]. \quad (4.24)$$

Поскольку проводимость рассеяния от зазора δ не зависит, то $d(gl)/d\delta = 0$, и сила, развиваемая электромагнитом:

$$F = -\frac{1}{2} (I w)^2 \frac{dG_{\delta}}{d\delta}. \quad (4.25)$$

Если известна аналитическая зависимость $G_{\delta} = f(\delta)$, то $dG_{\delta}/d\delta$ находится дифференцированием. В уравнение (4.25) подставляется интересующее нас значение зазора δ . Если G_{δ} определяется в результате графического построения поля, то вначале производится расчет G_{δ} для ряда положений якоря, после чего графически строится зависимость $G_{\delta} = f(\delta)$ и производится графическое дифференцирование.

При достаточно малом зазоре для системы (см. рис. 3.1)

$$G_{\delta} = \frac{\mu_0 S}{2\delta}. \quad (4.26)$$

Тогда величина силы F :

$$F = \frac{1}{4} (Iw)^2 \frac{\mu_0 S}{\delta^2}. \quad (4.27)$$

Согласно выражению сила, развиваемая электромагнитом, пропорциональна квадрату н.с. катушки, площади полюса и обратно пропорциональна квадрату величины зазора. Зависимость $F = f(\delta)$ при неизменной н.с. катушки представлена на рис. 4.3 (кривая 1). По мере уменьшения δ величина силы резко возрастает, причем при $\delta = 0$ сила принимает бесконечное значение. В действительности при $\delta = 0$ величина потока в системе определяется магнитным сопротивлением цепи, которое резко возрастает по мере насыщения материала магнитопровода, и сила имеет конечное значение. Кривая 2 на рис. 4.3 изображает зависимость $F = f(\delta)$, снятую экспериментально. Сравнение этих кривых показывает, что при больших зазорах, когда поток в системе мал и падением магнитного потенциала в сердечнике можно пренебречь, расчетная и экспериментальная кривые почти полностью совпадают. При малых зазорах сила, развиваемая электромагнитом, имеет конечное значение.

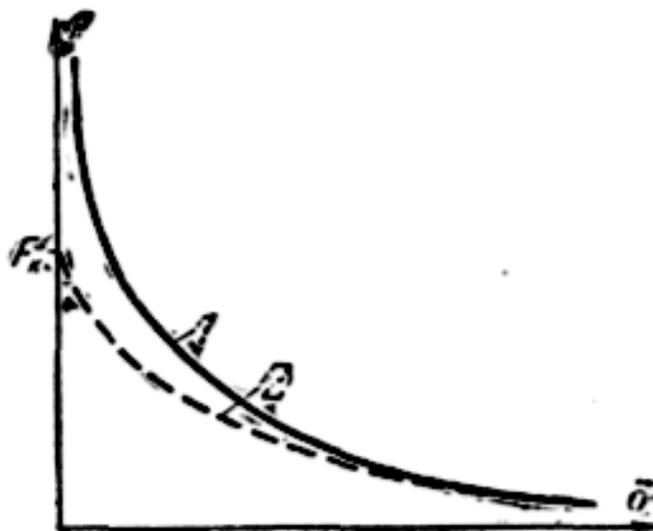


Рис. 4.3. Тяговая характеристика

Многочисленные исследования показали, что для расчета силы в насыщенных электромагнитах можно пользоваться формулой (4.25),

но только вместо I_w берется $(I_w)_\delta$ – падение магнитного потенциала в рабочем зазоре:

$$F = -\frac{1}{2}(I_w)_\delta^2 \frac{dG_\delta}{d\delta}. \quad (4.28)$$

Величину $(I_w)_\delta$ находят в результате расчета магнитных цепей.

Поскольку формула Максвелла учитывает реальную индукцию между полюсами, то она также может быть использована при условии, что поле в зазоре равномерно и вектор индукции перпендикулярен к поверхности полюса.

г) Сила тяги электромагнита переменного тока. Рассмотрим задачу применительно к клапанному электромагниту с двумя рабочими зазорами, сделав следующие допущения: магнитное сопротивление стали, активное сопротивление обмотки и потери в стали равны нулю; напряжение, ток и поток меняются по синусоидальному закону.

В этом случае поток, а следовательно, потокосцепление не зависят от величины зазора $(d\psi/d\delta) = 0$.

Тогда мгновенное значение силы

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \psi \frac{di}{d\delta}; \\ i &= I_m \sin \omega t; \\ \Phi &= \Phi_m \sin \omega t; \\ \psi &= \psi_m \sin \omega t. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Подставив, получим:

$$F = \frac{1}{2} \psi_m \frac{dI_m}{d\delta} \sin^2 \omega t. \quad (4.30)$$

Поскольку ψ_m и $dI/d\delta$ при данном зазоре δ не зависят от времени, можно записать:

$$\left. \begin{aligned} F &= F_m \sin^2 \omega t \\ F_m &= \frac{1}{2} \psi_m \frac{dI_m}{d\delta} \end{aligned} \right\}. \quad (4.31)$$

Производная $dI_m/d\delta$ может быть найдена графическим дифференцированием зависимости $I_m(\delta)$, которая получается из расчета маг-

нитной цепи. Величина $\psi_m = w\Phi_m$ определяется приложенным напряжением.

Мгновенное значение силы при наличии двух рабочих зазоров может быть найдено по формуле Максвелла (4.16). Для амплитуды силы получим

$$F_m = \frac{B_m^2}{\mu_0} S.$$

Поскольку при изменении зазора амплитуда потока и индукции не изменяются, амплитуда силы от зазора не зависит. Однако если учесть активное сопротивление обмотки, то, как было показано, с ростом зазора поток в системе уменьшается, что приводит к уменьшению амплитуды силы.

Рассмотрим теперь изменение силы во времени. Согласно (4.31) сила меняется во времени по следующему закону:

$$\begin{aligned} F &= F_m \sin^2 \omega t; \\ \sin^2 \omega t &= \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}; \\ F &= \frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{2} \cos 2\omega t. \end{aligned} \quad (4.32)$$

Мгновенное значение силы пульсирует с двойной частотой по отношению к частоте тока. Среднее значение силы равно половине амплитудного значения:

$$F_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T F dt = \frac{F_m}{2}. \quad (4.33)$$

Для притяжения якоря необходимо, чтобы среднее значение силы было больше противодействующего усилия.

Изменение силы во времени отрицательно сказывается на работе электромагнита. В определенные моменты времени сила противодействующей пружины становится больше силы электромагнита, при этом происходит отрыв якоря от сердечника. По мере нарастания силы электромагнита снова происходит притяжение якоря. В результате якорь электромагнита будет непрерывно вибрировать, создавая шум

и ненормальные условия работы механизма или контактов. **В связи с этим принимаются меры для устранения вибрации.**

В однофазных электромагнитах наибольшее распространение получило использование короткозамкнутого витка. Эскиз полюса такого электромагнита представлен на рис. 4.4. Наконечник полюса расщеплен, и на большую его часть насажен короткозамкнутый виток, выполненный из меди или алюминия. Для получения более ясной картины примем, что сопротивление стали равно нулю и существует только один рабочий зазор.

Благодаря наличию короткозамкнутого витка поток Φ_2 отстает по фазе относительно Φ_1 на угол ψ . Каждый из потоков под своей частью полюса создает свою силу F_1 и F_2 .

В верхней части полюса развивается сила F_1 :

$$F_1 = F_{m1} \sin^2 \omega t = F_{cp1} - F_{cp1} \cos 2\omega t \quad (4.34)$$

В нижней части полюса развивается сила F_2 :

$$F_2 = F_{m2} \sin^2(\omega t - \psi) = F_{cp2} - F_{cp2} \cos(2\omega t - 2\psi) \quad (4.35)$$

Результирующая сила, действующая на якорь, равна сумме сил F_1 и F_2 .

Если изобразить соответствующими векторами магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , то амплитуда переменной составляющей может быть найдена из векторной диаграммы

$$F_{\bar{m}} = \sqrt{F_{cp1}^2 + F_{cp2}^2 + 2F_{cp1}F_{cp2} \cos 2\psi} \quad (4.36)$$

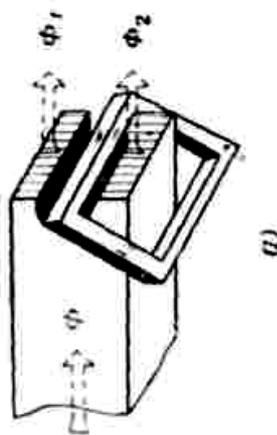


Рис. 4.4. Полюсный наконечник с короткозамкнутым витком

Обычно электромагнит проектируется таким образом, чтобы минимальная сила $F_{\text{МИН}}$, развиваемая электромагнитом, была больше противодействующей силы:

$$F_{\text{МИН}} = F_{\text{ср}} - F_m > F_{\text{прот}}. \quad (4.37)$$

Очевидно, что чем меньше $F_m \approx$, тем меньше будет пульсация силы F . Из уравнения следует, что $F_{\tilde{m}}$ равно нулю при $F_{\text{ср}1} = F_{\text{ср}2}$ и $\psi = 90^\circ$. При таком соотношении величин в момент перехода через нуль силы F_1 сила F_2 достигает максимального значения. В любой точке сумма $F_1 + F_2$ равна постоянной величине. Поскольку короткозамкнутый виток уменьшает поток под нижней частью полюса, то с целью выравнивания $F_{\text{ср}1}$ и $F_{\text{ср}2}$ этот виток охватывает большую часть полюса (обычно $2/3$).

Угол сдвига фаз ψ зависит от магнитного сопротивления зазора $R_{\delta 2}$ и параметров короткозамкнутого витка:

$$\text{tg}\psi = \frac{\omega}{r_k R_{\mu\delta 2}}. \quad (4.38)$$

Откуда следует, что чем больше рабочий зазор, а следовательно, и $R_{\mu\delta 2}$, тем меньше будет угол ψ . В связи с этим короткозамкнутый виток оказывает положительный эффект только при малых зазорах. При больших зазорах $R_{\mu\delta 2} \gg \frac{\omega}{r_k}$ и угол $\psi \rightarrow 0$. Следовательно, никакого сдвига фаз между потоком Φ_1 и Φ_2 не будет. Индуктивное сопротивление витка X_k также уменьшает угол ψ , поскольку при этом уменьшается $X_{\text{мк}}$. Обычно $\psi = 50 \div 60^\circ$.

При наличии трехфазного источника питания для уменьшения вибрации можно использовать естественный сдвиг потоков в этой системе.

Если принять, что в магнитном отношении все три фазы магнита симметричны и насыщение отсутствует, то величина силы, развиваемой под каждым полюсом:

$$\begin{aligned} F_A &= F_m \sin^2 \omega t; \\ F_B &= F_m \sin^2 \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right); \\ F_C &= F_m \sin^2 \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right). \end{aligned} \quad (4.39)$$

Результирующая сила, действующая на якорь, равна сумме этих сил:

$$F = \frac{3}{2} F_m. \quad (4.40)$$

Таким образом, в трехфазном электромагните результирующая сила, действующая на якорь, во времени не меняется. Однако и в этом электромагните вибрация якоря полностью не устраняется. При прохождении потока в каждой фазе через нуль сила, развиваемая этой фазой, также равна нулю. В результате точка приложения электромагнитной силы перемещается. Поскольку точка приложения противодействующей силы неизменна, то возникает перекачивание якоря, т.е. вибрация.

ЛЕКЦИЯ №5

ТЯГОВЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ, ВРЕМЯ ТРОГАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ. УСКОРЕНИЕ И ЗАМЕДЛЕНИЕ СРАБАТЫВАНИЯ

Сравнение статических тяговых характеристик электромагнитов постоянного и переменного тока. Для электромагнитов постоянного и переменного тока величина силы может быть рассчитана по формуле Максвелла:

$$F = \frac{B^2}{\mu_0} S; \quad F_m = \frac{B_m^2}{\mu_0} S. \quad (5.1)$$

Если площади полюсов у электромагнитов одинаковы и одинаковы максимальные значения индукции в рабочих зазорах, то максимальное значение силы в электромагните переменного тока будет равно силе, развиваемой электромагнитом постоянного тока. Поскольку среднее значение силы при переменном токе F_{cp} равно $F_m/2$, то средняя сила, развиваемая электромагнитом переменного тока, в два раза меньше силы, развиваемой электромагнитом постоянного тока.

Таким образом, при той же затрате стали электромагнит постоянного тока развивает в два раза большее усилие, чем электромагнит

переменного тока.

Теперь сравним характеристики $F = f(\delta)$ для электромагнитов постоянного и переменного тока клапанного типа. Как было показано, с ростом зазора величина силы меняется обратно пропорционально квадрату зазора. В связи с этим либо клапанный электромагнит постоянного тока имеет малый рабочий ход якоря, чтобы развить большую силу, либо катушка должна иметь большую н.с., чтобы создать необходимый поток при большом сопротивлении воздушного зазора.

В электромагните переменного тока средняя сила в два раза меньше, чем у электромагнита постоянного тока при том же значении индукции. Однако с ростом зазора, с одной стороны, растет магнитное сопротивление рабочего зазора, с другой – растет ток в обмотке, так что поток в рабочем зазоре падает только за счет активного падения напряжения в обмотке. Таким образом, электромагнит переменного тока как бы имеет автоматическую форсировку. При большом зазоре создается большая н.с. обмотки, которая обеспечивает необходимую величину потока в рабочем зазоре. В связи с этим электромагниты переменного тока могут работать при относительно больших ходах якоря.

ДИНАМИКА И ВРЕМЯ СРАБАТЫВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

а) Время срабатывания. До сих пор мы рассматривали только статические характеристики электромагнитов, когда в их обмотке проходит неизменный ток, причем якорь либо неподвижен, либо движется, но ток в обмотке не меняется по своему действующему значению, поскольку электромагнит имеет последовательную обмотку. В таком режиме работают тормозные и удерживающие электромагниты. В большинстве электромагнитов процесс имеет динамический характер. В этом случае после включения обмотки электромагнита происходит нарастание потока в магнитной цепи до тех пор, пока сила, развиваемая электромагнитом, не станет равна противодействующей силе. По достижении указанного равенства якорь начинает

двигаться. При этом ток и поток меняются по весьма сложному закону, определяемому параметрами электромагнита и противодействующей силой. После того как якорь придет в свое конечное положение, ток и поток в электромагните будут продолжать изменяться до тех пор, пока не достигнут установившегося значения.

Рассмотрим более подробно все эти три стадии для электромагнита постоянного тока с параллельной обмоткой. Первая стадия – с момента подачи напряжения до начала трогания якоря. Начиная с момента включения обмотки и до момента начала движения якоря напряжение источника уравнивается активным падением напряжения и противо-э.д.с. в катушке:

$$U = iR + \frac{d\psi}{dt}. \quad (5.2)$$

Так как в начальном положении якоря рабочий зазор имеет относительно большое значение, магнитная цепь может считаться ненасыщенной, а индуктивность обмотки – постоянной величиной. Поскольку потокосцепление

$$\psi = Li \quad \text{и} \quad L = \text{const}, \quad (5.3)$$

уравнение можно преобразовать:

$$U = iR + L \frac{di}{dt}. \quad (5.4)$$

Решение этого уравнения относительно тока, как известно, имеет следующий вид:

$$i = I_y (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (5.5)$$

где $I_y = U/R$ – установившееся значение тока;

$T = L/R$ – постоянная времени цепи.

Величина тока, при котором начинается движение якоря, называется током трогания $i_{\text{ТР}}$, а время нарастания тока от нуля до $i_{\text{ТР}}$ – временем трогания $t_{\text{ТР}}$.

Для момента трогания можно записать следующее уравнение:

$$i_{\text{тр}} = I_y (1 - e^{-\frac{t_{\text{тр}}}{T}}). \quad (5.6)$$

Решив его относительно времени трогания, получим:

$$i_{\text{тр}} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - \frac{i_{\text{тр}}}{I_y}}. \quad (5.7)$$

Таким образом, во-первых, время трогания пропорционально постоянной времени T , и, во-вторых, по мере приближения $t_{\text{тр}}$ к I_y время трогания начинает быстро расти. Как только начинается движение якоря, зазор уменьшается и индуктивность увеличивается, поскольку $L = w^2 G_\delta$. Так как при движении якоря индуктивность изменяется, то уравнение напряжений примет вид:

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}. \quad (5.8)$$

При движении якоря $\frac{dL}{dt} > 0$, поэтому величина тока i и di/dt начинают уменьшаться, поскольку сумма всех падений напряжения равна неизменному значению напряжения источника U . Зависимость тока от времени показана на рис. 5.1. Чем больше скорость движения якоря, тем больше спад тока. В точке b якорь достиг своего крайнего положения и уменьшение тока прекратилось. После остановки якоря ток будет увеличиваться до тех пор, пока не достигнет установившегося значения $I_y = U/R$ причем постоянная времени T_1 будет больше, чем T , поскольку конечный зазор δ_k меньше, чем начальный зазор δ_n . Так как в притянутом положении якоря рабочий зазор мал, то возможно насыщение магнитной системы, и закон нарастания тока будет отличаться от экспоненциального, что необходимо учитывать при расчете времени установления потока.

Имеется целый ряд методов расчета процессов в электромагните при движении якоря. Как показано на рис. 5.1, в динамике начало движения имеет место при токе $i_{\text{тр}} < I_y$. При движении якоря ток вначале еще немного нарастает, а затем падает до величины, меньшей тока трогания. Таким образом, в процессе движения якоря, когда зазор меняется от начального до конечного значения, величина тока в

обмотке значительно меньше установившегося значения. Поскольку при движении якоря во всех точках его пути ток в обмотке меньше установившегося значения, то и сила, развиваемая электромагнитом, в динамике значительно меньше, чем в статике при $I = const$. С этим необходимо считаться при согласовании силы тяги электромагнита и противодействующих сил.

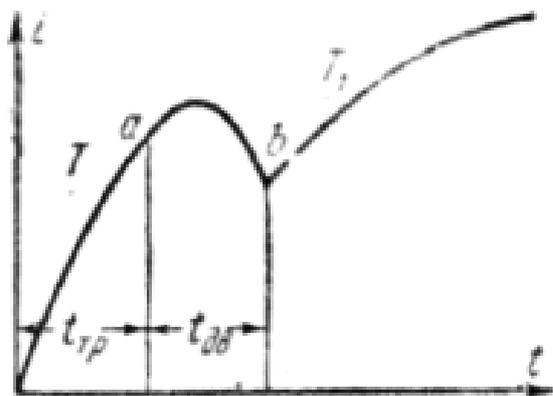


Рис. 5.1. Зависимость тока от времени

Для ориентировочного определения времени движения можно воспользоваться статической характеристикой. На рис. 5.2 изображены статическая тяговая характеристика электромагнита $F_{эм}$ и характеристика противодействующей силы. Разность сил $F_{эм} - F_{против}$, идет на сообщение ускорения подвижным частям:

$$F_{эм} - F_{против} = m \frac{d^2 x}{dt^2} = mv \frac{dv}{dx}, \quad (5.9)$$

где m – масса подвижных частей, приведенная к рабочему зазору;
 x – перемещение якоря; v – скорость движения якоря.

После интегрирования получим

$$\int_0^x (F_{эм} - F_{против}) dx = \frac{mv^2}{2}. \quad (5.10)$$

Интеграл удобно рассчитывается графоаналитически. Скорость в точке хода δ :

$$v = \sqrt{2 \frac{m_F m_\delta S_{abcd}}{m}}, \quad (5.11)$$

где m_F – масштаб по оси силы; m_δ – масштаб по оси перемещения;

S_{abcd} – площадь, пропорциональная работе движущей силы.

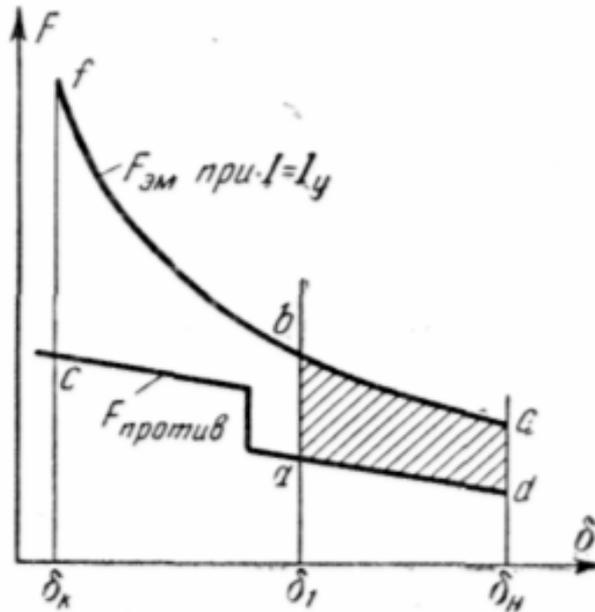


Рис. 5.2. Статическая тяговая характеристика электромагнита и характеристика противодействующей силы

Зная скорость в любой точке хода, можно рассчитать время движения на всех участках и суммированием определить полное время движения.

Иногда во время движения ток мало меняется и составляет некоторую долю от установившегося. В таких случаях рекомендуется строить статическую характеристику при $i = \alpha I_{уст}$.

б) Ускорение и замедление срабатывания и отпускания электромагнита постоянного тока. Полное время срабатывания состоит из времени трогания и времени движения:

$$t_{cp} = t_{mp} + t_{дв} \quad (5.12)$$

В большинстве случаев основную часть времени срабатывания составляет время трогания. Поэтому при ускорении и замедлении срабатывания воздействуют прежде всего на $t_{тр}$, согласно

$$t_{тр} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - \frac{i_{тр}}{I_{\delta}}} \quad (5.13)$$

Допустим, что ток трогания не меняется (неизменна сила противодействующей пружины). Рассмотрим влияние активного сопротив-

ления цепи при неизменной величине индуктивности и питающего напряжения. После включения электромагнита ток в обмотке изменяется, и скорость нарастания тока:

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{U}{L} e^{-\frac{t}{T}}; \\ \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} &= \frac{U}{L}. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Таким образом, скорость нарастания тока в момент включения не зависит от активного сопротивления цепи и определяется только питающим напряжением и индуктивностью цепи. Изменение тока во времени для двух значений активного сопротивления цепи показано на рис. 5.3. Поскольку $R_1 > R_2$, можно записать: $I_{y1} < I_{y2}$. Обе кривые в начале координат имеют общую касательную, так как $\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0}$ не зависит от активного сопротивления. Постоянная времени для первого случая — $T_1 = L/R_1$, для второго — $T_2 = L/R_2$; так как $R_1 > R_2$, $T_1 < T_2$. При уменьшении сопротивления R увеличивается установившийся ток и

величина $\ln \frac{1}{1 - \frac{i_{\text{ТР}}}{I_y}}$ уменьшается.

Можно показать, что логарифм уменьшается быстрее, чем растет постоянная времени T . Таким образом, $t_{\text{мп1}} > t_{\text{мп2}}$ несмотря на то, что $T_1 < T_2$. Чем меньше активное сопротивление цепи, тем быстрее будет срабатывать электромагнит.

При уменьшении активного сопротивления обмотки растет мощность P , потребляемая ею:

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

Для ограничения температуры нагрева необходимо развивать у катушки поверхность охлаждения, т.е. ее размеры. Увеличение размеров обмотки потребует увеличения размеров магнитопровода.

Для ограничения размеров электромагнита в настоящее время широко применяется форсировка по схеме рис. 5.4. В отключенном положении сопротивление $R_{\text{доб}}$ шунтировано размыкающим контак-

том, связанным с якорем электромагнита.

После замыкания контакта K малое сопротивление обмотки R способствует быстрому нарастанию тока до тока трогания. После начала движения якоря контакт размыкается и в цепь вводится сопротивление $R_{доб}$, благодаря чему ограничивается мощность P , выделяемая в обмотке:

$$P = \left(\frac{U}{R + R_{доб}} \right)^2 R. \quad (5.15)$$

Иногда для ускорения срабатывания сопротивление $R_{доб}$ шунтируют конденсатором. В первый момент времени конденсатор уменьшает падение напряжения на этом сопротивлении, благодаря чему обеспечивается форсировка электромагнита. В установившемся режиме величина тока в цепи ограничивается сопротивлением $R_{доб}$. Величину емкости конденсатора рекомендуется брать равной:

$$C = \frac{L \cdot 10^6}{RR_{доб}} [\text{мкФ}], \quad (5.16)$$

где L – индуктивность обмотки, Гн; R – ее активное сопротивление, Ом; $R_{доб}$ – добавочное сопротивление, Ом.

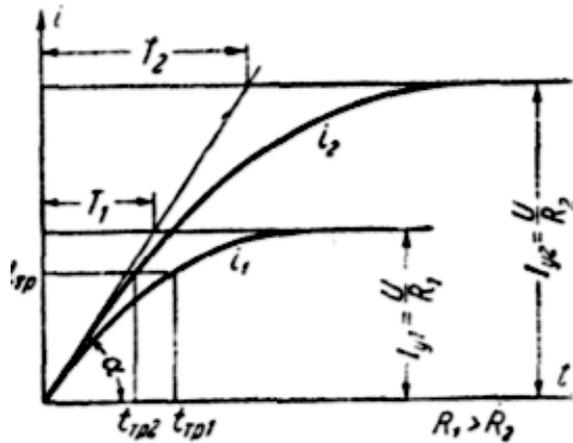


Рис. 5.3. Изменение тока во времени для двух значений активного сопротивления

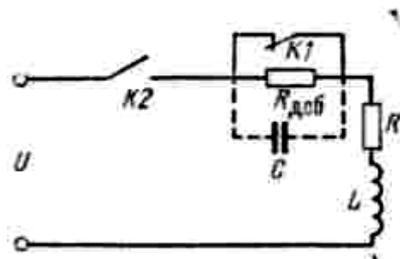


Рис. 5.4. Схема форсировки электромагнита

Теперь рассмотрим влияние питающего напряжения на время трогания. При уменьшении питающего напряжения уменьшается ве-

личина установившегося тока, что ведет к увеличению $\ln \frac{1}{1 - \frac{i_{тр}}{I_y}}$.

При $i_{тр} = I_y$ время трогания $i_{тр} = \infty$.

С ростом напряжения время трогания уменьшается в соответ-

ствии с уменьшением $\ln \frac{1}{1 - \frac{i_{тр}}{I_y}}$.

Иногда возникает необходимость ускорить срабатывание уже готового электромагнита. Увеличение питающего напряжения без изменения активного сопротивления цепи ведет к ускорению срабатывания, но катушка электромагнита может сгореть, если при номинальном значении питающего напряжения температура обмотки равна предельно допустимой. В этих случаях рекомендуется при повышении питающего напряжения в цепь включать добавочное сопротивление, чтобы величина установившегося тока оставалась неизменной и равной I_y . При этом ускорение срабатывания происходит за счет уменьшения посто-

янной времени. Величина $\ln \frac{1}{1 - \frac{i_{тр}}{I_y}}$ остается неизменной.

На рис. 5.4 показано изменение токов в обмотке электромагнита при неизменном установившемся токе. Кривые показывают, что в данном случае чем больше постоянная времени, тем больше время трогания.

В заключение отметим, что при прочих равных условиях увеличение натяжения противодействующей пружины ведет к росту $i_{тр}$, при этом $t_{тр}$ также увеличивается.

Время отпущения электромагнита состоит из времени спадания потока до потока отпущения, при котором сила электромагнита становится равной противодействующей силе и времени движения при отпущении.

В большинстве случаев время спада потока при отсутствии короткозамкнутых обмоток значительно меньше, чем время движения

якоря при отпадании.

Поэтому в основном считаются со временем движения. Для упрощения расчетов можно принять, что якорь и подвижные части двигаются равноускоренно под действием силы, равной средней силе пружины. Тогда время отпущения можно найти с помощью формулы

$$t_{\text{дв.отп}} = \sqrt{\frac{2mx}{F_{\text{cp}}}}, \quad (5.17)$$

где m – приведенная к центру полюса масса якоря и подвижных частей; x – перемещение якоря; F_{cp} – приведенное к центру полюса среднее значение силы отключающей пружины на пути x .

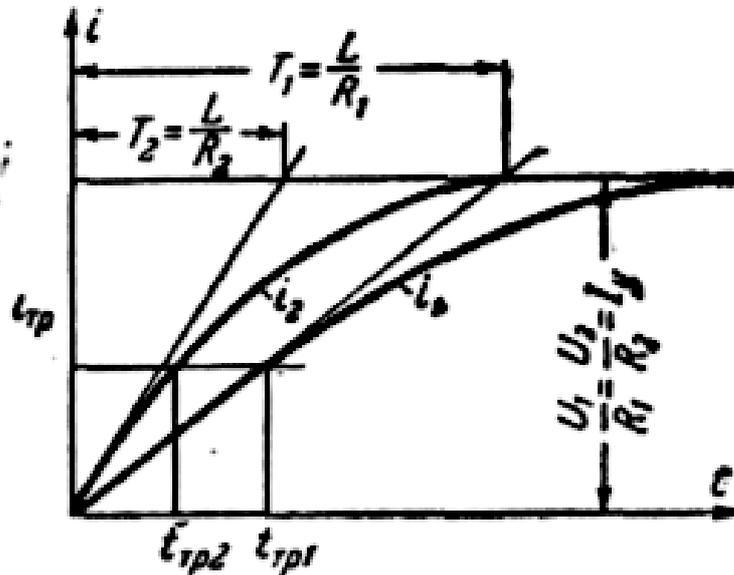


Рис. 5.5. Изменение токов в обмотке электромагнита при неизменном установившемся токе

Для создания электромагнитов замедленного действия применяются короткозамкнутая обмотка или гильза. Эскиз электромагнита с короткозамкнутой обмоткой показан на рис. 5.6.

При включении питающей обмотки в магнитной цепи нарастает поток. Этот поток наводит в короткозамкнутой обмотке э.д.с. Последняя вызывает ток такого направления, при котором поток короткозамкнутой обмотки направлен встречно с намагничивающим. Результирующий поток равен разности этих потоков. Скорость нара-

тания потока уменьшается, а время трогания увеличивается.

Результирующий поток нарастает во времени по экспоненте с суммарной постоянной времени

$$\Phi = \Phi_y (1 - e^{-\frac{t}{T_1+T_2}}), \quad (5.18)$$

где $\Phi_y = \frac{U}{R_1} w_1 G_\delta$ – установившийся поток;

$T_1 = L_1 / R_1$, и $T_2 = L_2 / R_2$ – постоянные времени обмоток.

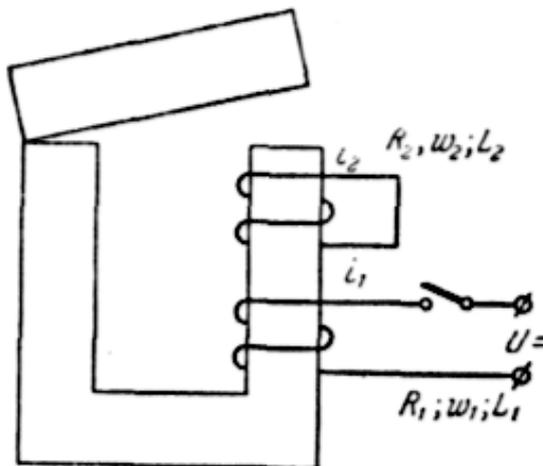


Рис. 5.6. Электромагнит с короткозамкнутой обмоткой

Если пренебречь потоками рассеяния, то индуктивности L_1 и L_2 согласно равны:

$$L_1 = w_1^2 G_\delta, \quad L_2 = w_2^2 G_\delta. \quad (5.19)$$

Ввиду того, что при отпущенном якоре G_δ мало, суммарная постоянная времени $T_1 + T_2$ невелика и замедление электромагнита получается небольшим.

При отключении электромагнита с короткозамкнутой обмоткой можно считать, что ток в первичной обмотке практически мгновенно падает до нуля из-за быстрого нарастания сопротивления дугового промежутка в отключающем аппарате.

Изменение потока определяется процессом затухания тока в короткозамкнутой обмотке. При спадании потока в короткозамкнутой обмотке w_2 наводится э.д.с. и возникает ток, направленный так, что поток, создаваемый обмоткой w_2 , препятствует изменению (умень-

шению) потока в системе.

Замедленное спадание потока создает выдержку времени при отпуске.

Для вторичной короткозамкнутой обмотки ненасыщенной системы в этом случае можно записать:

$$0 = i_2 R_2 + L'_2 \frac{di_2}{dt}. \quad (5.20)$$

Поскольку величина зазора уменьшилась, *индуктивность при притянтом якоре L'_2 больше, чем при отпущенном.*

Решив (5.20) относительно тока, получим:

$$\begin{aligned} i_2 &= I_{y2} e^{-\frac{t}{T'_2}}; \\ T'_2 &= \frac{L'_2}{R_2}; L'_2 = w_2^2 G'_\delta. \end{aligned} \quad (5.21)$$

Умножив обе части на $G'_\delta w_2$, после преобразования получим

$$\Phi = \Phi_y e^{-\frac{t}{T'_2}}. \quad (5.22)$$

Благодаря тому, что рабочий зазор в притянтом состоянии в десятки и даже сотни раз меньше, чем в отпущенном ($T'_2 \gg T_1 + T_2$), время трогания при отпуске может достигать 10 сек, тогда как время трогания при притяжении составляет доли секунды.

При н.с., равной нулю, в цепи устанавливается поток, определяемый кривой размагничивания материала и воздушным зазором. Этот остаточный поток может создавать силу притяжения большую, чем сила, развиваемая пружиной. Произойдет залипание якоря. Для устранения залипания ставится немагнитная прокладка, снижающая величину остаточного потока.

В реальных конструкциях реле времени магнитная система при притянтом положении якоря сильно насыщена.

Для насыщенной цепи справедливо уравнение

$$0 = i_2 R_2 + w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.23)$$

Решив уравнение относительно времени, получим

$$t_{\text{тр}} = -\frac{w_2^2}{R_2} \int_{\Phi_0}^{\Phi_{\text{отп}}} \frac{d\Phi}{i_2 w_2}, \quad (5.24)$$

где $\Phi_{\text{отп}}$ – поток, при котором сила, развиваемая пружиной, равна силе электромагнита.

Для определения значения интеграла рассчитывается зависимость потока в рабочем зазоре от н.с. После этого строится зависимость $1/iw = f(\Phi)$ и уравнение решается методом графического интегрирования.

в) Динамика электромагнитов переменного тока. Рассмотрим магнитную цепь электромагнита, у которого магнитопровод ненасыщен. Пусть включение происходит в нуль напряжения. В этом случае можно записать:

$$U_m \sin \omega t = iR + w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.25)$$

Поскольку цепь линейна, ток можно выразить через поток:

$$i = \frac{\Phi w}{L}.$$

Подставив, получим

$$U_m \sin \omega t = \frac{R}{L} \Phi w + w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.26)$$

Решив это уравнение относительно потока, найдем

$$\Phi = \Phi_m (e^{-\frac{R}{L}t} - \cos \omega t), \quad (5.27)$$

где Φ_m – максимальное значение потока.

Согласно (5.27), при $t=0$ поток в системе также равен нулю. Через время $t = \pi/\omega$ поток достигает наибольшего значения, поскольку постоянная составляющая потока складывается с переменной составляющей. Если пренебречь затуханием, то через полпериода поток достигает величины, равной $2\Phi_m$.

По мере затухания постоянной составляющей потока пиковое значение потока будет уменьшаться, пока не достигнет Φ_m . Таким образом, в электромагните переменного тока наибольшие пиковые значения потока, а следовательно, и силы, будут иметь место в начале процесса включения, причем пиковое значение потока и силы наступает примерно через 0,01 сек после начала включения (при частоте тока 50 Гц. Это обеспечивает малое время трогания.

Если магнитная система насыщена, то возникновение постоянной составляющей потока в момент включения ведет к появлению большого сильно искаженного намагничивающего тока.

При включении в нуль тока (потока) постоянная составляющая не появляется и пиковое значение потока появляется через четверть периода после начала включения. Таким образом, и в этом случае обеспечивается быстрое срабатывание электромагнита без применения специальных мер.

Расчет динамических характеристик электромагнитов переменного тока аналитически очень затруднен. Эту задачу удастся решить применением аналоговых счетных машин. Необходимо отметить, что в момент включения электромагнита рабочий зазор в магнитной цепи велик, что вызывает большой намагничивающий ток, в десятки раз превышающий ток в притянутом положении якоря.

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

а) Общие сведения. Для создания постоянного магнитного поля в целом ряде электрических аппаратов используются постоянные магниты, которые изготавливаются из магнитотвердых материалов, имеющих широкую петлю гистерезиса (рис. 5.7).

Работа постоянного магнита происходит на участке от $H = 0$ до $H = -H_c$. Эта часть петли называется кривой размагничивания.

Рассмотрим основные соотношения в постоянном магните, имеющем форму тороида с одним малым зазором b (см. рис. 5.7). Благодаря форме тороида и небольшому зазору потоками рассеяния в та-

ком магните можно пренебречь. Если зазор мал, то можно пренебречь выпучиванием магнитного поля, и значения индукции в зазоре и внутри магнита одинаковы.

На основании закона полного тока при интегрировании по замкнутому контуру 1231 (рис. 5.8) получим

$$\begin{aligned} H_{\delta}\delta + Hl &= 0; \\ H_{\delta} &= -\frac{Hl}{\delta}. \end{aligned} \quad (5.28)$$

Таким образом, напряженность поля в зазоре направлена встречно напряженности в теле магнита. Для электромагнита постоянного тока, имеющего аналогичную форму магнитной цепи, без учета насыщения можно написать: $H_{\delta} = \frac{i\omega}{\delta}$.

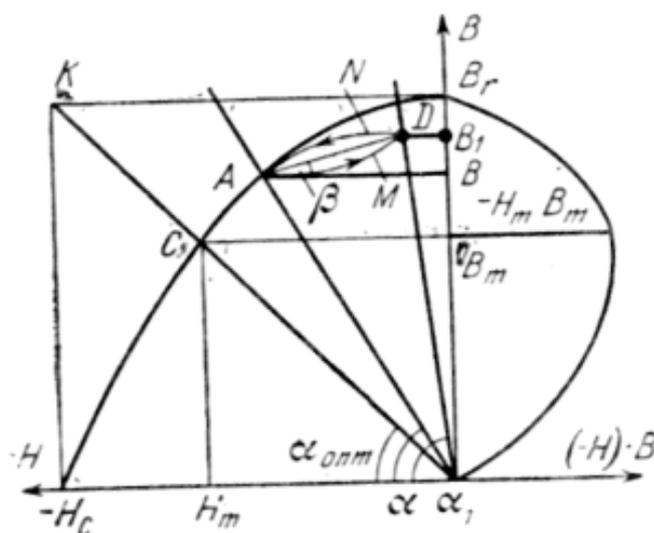


Рис. 5.7. Кривая размагничивания постоянного магнита

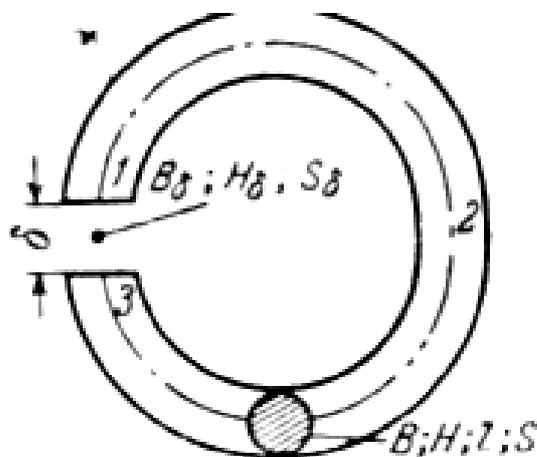


Рис. 5.8. Постоянный магнит, имеющий форму тороида

Сравнивая, можно видеть, что в случае с постоянным магнитом намагничивающая сила, создающая поток в рабочем зазоре, представляет собой произведение напряженности в теле магнита на его длину с обратным знаком – $-Hl$.

Воспользовавшись тем, что

$$B = B_{\delta}; H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \text{ и } H_{\delta} = -\frac{Hl}{\delta}, \quad (5.29)$$

получим

$$B = -\frac{Hl}{\delta} \mu_0 = -\frac{Hl}{\delta} \mu_0 \frac{S}{S_0} = -H \frac{G_{\delta} l}{S} \quad (5.30)$$

или

$$-\frac{B}{H} = \frac{G_{\delta} l}{S}, \quad (5.31)$$

где S – площадь полюса; G_{δ} – проводимость воздушного зазора.

Уравнение есть уравнение прямой, проходящей через начало координат во втором квадранте под углом α к оси H . С учетом масштаба индукции m_B и напряженности m_H угол α определяется равенством

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{m_H G_{\delta} l}{m_B S}. \quad (5.32)$$

Так как индукция и напряженность магнитного поля в теле постоянного магнита связаны кривой размагничивания, то пересечение указанной прямой и кривой размагничивания (точка A на рис. 5.6) и определяет состояние сердечника при заданном зазоре.

При замкнутой цепи $\delta = 0, \operatorname{tg} \alpha = \infty, \alpha = 90^\circ$ и

$$B = B_{\delta} = B_r. \quad (5.33)$$

С ростом δ проводимость рабочего зазора и $\operatorname{tg} \alpha$ уменьшаются, индукция в рабочем зазоре падает, а напряженность поля внутри магнита увеличивается.

Одной из важных характеристик постоянного магнита является энергия магнитного поля в рабочем зазоре W_t . Учитывая, что поле в зазоре однородно,

$$W_{\delta} = \frac{B_{\delta} H_{\delta}}{2} S_{\delta}. \quad (5.34)$$

Подставляя значение H_δ , получим

$$W_\delta = \frac{B(-H)}{2} Sl = \frac{B(-H)}{2} V_m = W_m, \quad (5.35)$$

где V_M – объем тела магнита.

Таким образом, энергия в рабочем зазоре равна энергии внутри магнита.

Зависимость произведения $B(-H)$ в функции индукции показана на рис. 5.7. Очевидно, что для точки C , в которой $B(-H)$ достигает максимального значения, энергия в воздушном зазоре также достигает наибольшей величины, и с точки зрения использования постоянного магнита эта точка является оптимальной. Можно показать, что точка C , соответствующая максимуму произведения $B(-H)$, есть точка пересечения с кривой размагничивания луча OK , проведенного через точку с координатами $-H$ и B_r .

Рассмотрим более подробно влияние зазора δ на величину индукции B (см. рис. 5.7). Если намагничивание магнита производилось при зазоре δ , то после снятия внешнего поля в теле магнита установится индукция, соответствующая точке A . Положение этой точки определяется зазором δ .

Уменьшим зазор до значения $\delta_1 < \delta$, тогда

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{m_H}{m_B} \frac{\mu_0 l}{\delta_1} > \operatorname{tg} \alpha = \frac{m_H}{m_B} \mu_0 \frac{l}{\delta}. \quad (5.36)$$

При уменьшении зазора индукция в теле магнита возрастает, однако процесс изменения индукции идет не по кривой размагничивания, а по ветви частной петли гистерезиса AMD . Индукция B_1 определяется точкой пересечения этой ветви с лучом, проведенным под углом к оси $-H$ (точка D).

Если мы снова увеличим зазор до значения δ , то индукция будет падать до значения B , причем зависимость $B(H)$ будет определяться ветвью DNA частной петли гистерезиса. Обычно частная петля гистерезиса $AMDNA$ достаточно узка и ее заменяют прямой AD , которую

называют прямой возврата. Наклон к горизонтальной оси (+H) этой прямой называется коэффициентом возврата:

$$\rho = \frac{\Delta B}{\Delta H};$$

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\Delta B}{\Delta H} \frac{m_H}{m_B} = \rho \frac{m_H}{m_B}. \quad (5.37)$$

Характеристика размагничивания материала обычно не приводится полностью, а задаются только величины индукции насыщения B_s , остаточной индукции B_r , коэрцитивной силы H_c . Для расчета магнита необходимо знать всю кривую размагничивания, которая для большинства магнитотвердых материалов хорошо аппроксимируется формулой

$$B = \frac{H + H_c}{\frac{H_c}{B_r} + \frac{H}{B_s}}. \quad (5.38)$$

Кривая размагничивания, выражаемая (5.30), может быть легко построена графически, если известны B_s , B_r .

б) Определение потока в рабочем зазоре для заданной магнитной цепи. В реальной системе с постоянным магнитом поток в рабочем зазоре отличается от потока в нейтральном сечении (середине магнита) из-за наличия потоков рассеяния и выпучивания (рис. 5.9).

Поток в нейтральном сечении равен:

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_{\text{вып}} + \Phi_{\sigma}, \quad (5.39)$$

где Φ_0 – поток в нейтральном сечении;

$\Phi_{\text{вып}}$ – поток выпучивания у полюсов;

Φ_{σ} – поток рассеяния;

Φ_p – рабочий поток.

Коэффициент рассеяния σ определяется равенством

$$\sigma = \frac{\Phi_0}{\Phi_p}. \quad (5.40)$$

Если принять, что потоки Φ_p ; $\Phi_{\text{вып}}$ и Φ_{σ} создаются одной и той же разностью магнитных потенциалов, то

$$\sigma = \frac{G_p + G_{\text{вып}} + G_{\sigma}}{G_p}. \quad (5.41)$$

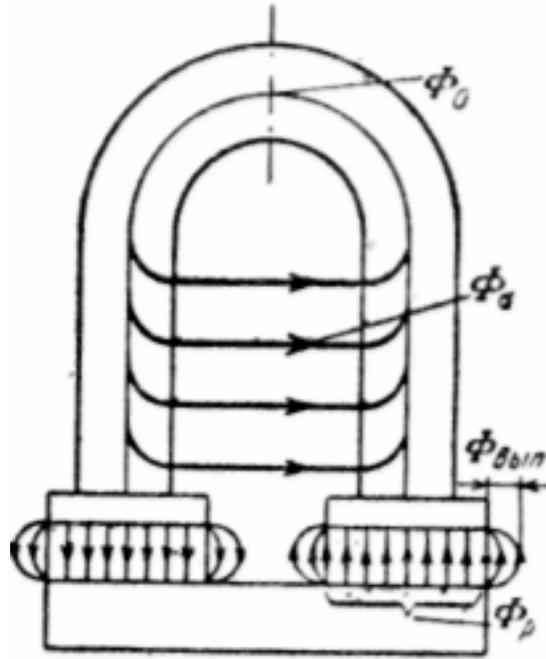


Рис. 5.9. Магнитная цепь с постоянным магнитом и потоками рассеяния и выпучивания

Индукцию в нейтральном сечении найдем, определив $\operatorname{tg} \alpha$:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{m_{\text{H}}}{m_{\text{B}}} \frac{G_{\text{P}} \sigma_{\text{M}}}{S_{\text{M}}}$$

и воспользовавшись кривой размагничивания (см. рис. 5.7). Индукция в рабочем зазоре:

$$B_{\text{p}} = \frac{B_0}{\delta}, \quad (5.42)$$

поскольку поток в рабочем зазоре в δ раз меньше, чем поток в нейтральном сечении.

Очень часто намагничивание системы происходит в несобранном состоянии, когда проводимость рабочего зазора уменьшена из-за отсутствия деталей из ферромагнитного материала. В этом случае расчет ведется с использованием прямой возврата. Если потоки рассеяния значительны, то расчет рекомендуется вести по участкам так же, как и в случае электромагнита.

Потоки рассеяния в постоянных магнитах играют значительно большую роль, чем в электромагнитах. Дело в том, что магнитная проницаемость магнитотвердых материалов значительно ниже, чем у

магнитомягких, из которых изготавливаются системы для электромагнитов. Потоки рассеяния вызывают значительное падение магнитного потенциала вдоль постоянного магнита и уменьшают н.с., а следовательно, и поток в рабочем зазоре.

Коэффициент рассеяния выполненных систем колеблется в довольно широких пределах. Расчет коэффициента рассеяния и потоков рассеяния связан с большими трудностями. Поэтому при разработке новой конструкции величину коэффициента рассеяния рекомендуется определить на специальной модели, в которой постоянный магнит заменен электромагнитом. Намагничивающая обмотка выбирается такой, чтобы получить в рабочем зазоре необходимый поток.

в) Определение размеров магнита по требуемой индукции в рабочем зазоре. Эта задача является еще более трудной, чем определение потока при известных размерах. При выборе размеров магнитной цепи обычно стремятся к тому, чтобы индукция B_0 и напряженность H_0 в нейтральном сечении соответствовали максимальному значению произведения $H_0 B_0$. При этом объем магнита будет минимальным. Даются следующие рекомендации по выбору материалов. Если требуется при больших зазорах получить большое значение индукции, то наиболее подходящим материалом является магнито. Если при большом зазоре необходимо создать небольшие индукции, то можно рекомендовать альниси. При малых рабочих зазорах и большом значении индукции целесообразно применение альни.

Сечение магнита выбирается из следующих соображений. Индукция в нейтральном сечении выбирается равной B_0 . Тогда поток в нейтральном сечении

$$\Phi_0 = B_0 S_0 = B_1 \sigma S_p, \quad (5.43)$$

откуда сечение магнита

$$S_0 = \frac{B_p S_p \sigma}{B_0}. \quad (5.44)$$

Величины индукции в рабочем зазоре B_p и площадь полюса являются заданными величинами. Наиболее трудным является определение значения коэффициента *рассеяния*. Величина его зависит от

конструкции и индукции в сердечнике. Если сечение магнита получилось большим, то применяют несколько магнитов, включенных параллельно. Длина магнита определяется из условия создания необходимой н.с. в рабочем зазоре при напряженности в теле магнита H_0 :

$$l_m = \frac{B_p \delta_p}{\mu_0 H_0}, \quad (5.45)$$

где δ_p – величина рабочего зазора.

При больших рабочих зазорах рекомендуется соединять несколько магнитов последовательно.

После выбора основных размеров и конструирования магнита проводится поверочный расчет по методике, описанной ранее.

г) Стабилизация характеристик магнита. В процессе работы магнита наблюдается уменьшение потока в рабочем зазоре системы – старение магнита. Различают структурное, механическое и магнитное старение.

Структурное старение наступает вследствие того, что после закалки материала в нем возникают внутренние напряжения, материал приобретает неоднородную структуру. В процессе работы материал становится более однородным, внутренние напряжения исчезают. При этом остаточная индукция B_m и коэрцитивная сила H_c уменьшаются. Для борьбы со структурным старением материал подвергается термообработке в виде отпуска. При этом внутренние напряжения в материале исчезают. Его характеристики становятся более стабильными. Алюминиево-никелевые сплавы (альни и др.) не требуют структурной стабилизации.

Механическое старение наступает при ударах и вибрациях магнита. Для того чтобы сделать магнит нечувствительным к механическим воздействиям, его подвергают искусственному старению. Образцы магнита перед установкой в аппарат подвергаются таким ударам и вибрации, которые имеют место в эксплуатации.

Магнитное старение – изменение свойств материала под действием внешних магнитных полей. Положительное внешнее поле увеличивает

индукцию по прямой воз врата, а отрицательное снижает ее по кривой размагничивания. Для того чтобы сделать магнит более стабильным, его подвергают действию размагничивающего поля, после чего магнит работает на прямой возврата. Из-за меньшей крутизны прямой возврата влияние внешних полей уменьшается. При расчете магнитных систем с постоянными магнитами необходимо учитывать, что в процессе стабилизации магнитный поток уменьшается на 10-15%.

ЛЕКЦИЯ №6

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ (ЭДУ), МЕТОДЫ РАСЧЕТА. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ. НАГРЕВ ЭЛЕКТРОАППАРАТОВ. НОРМЫ НАГРЕВА, ТЕРМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ АППАРАТОВ

При коротком замыкании в сети через токоведущую часть аппарата могут протекать токи, в десятки раз превышающие номинальные. Эти токи, взаимодействуя с магнитным полем, создают электродинамические усилия (э.д.у.), которые стремятся деформировать проводники и изоляторы, на которых они крепятся. В некоторых случаях величина э.д.у. может достигать десятков тонн, при этом возможно даже разрушение аппарата.

Для определения э.д.у. используются два метода.

В первом методе сила рассматривается как результат взаимодействия проводника с током и магнитным полем. Если элементарный проводник dl с током i находится в магнитном поле с индукцией \vec{B} , создаваемой другими проводниками, то сила $d\vec{F}$, действующая на этот элемент:

$$dF = i[di\vec{B}] = iBdl \sin \beta, \quad (6.1)$$

где β – угол между векторами элемента dl и индукции B .

За направление dl принимается направление тока в этом элементе.

Направление индукции, создаваемой проводником, легко найти с

помощью правила буравчика. Если винт буравчика движется вдоль тока в проводнике, то направление вращения рукоятки совпадает с направлением магнитной силовой линии, т.е. с вектором индукции.

Направление силы можно определить по правилу левой руки. Для этого левую руку располагают так, чтобы вектор индукции пронизывал ладонь, а направление тока в проводнике совпадало с четырьмя вытянутыми пальцами. Тогда направление силы будет указывать большой палец (рис. 6.1).

Правило буравчика можно использовать и для определения направления результирующего вектора $[d\vec{l}\vec{B}]$ следовательно, и направления силы.

Если рукоятку штопора вращать от вектора $d\vec{l}$ к вектору \vec{B} по кратчайшему расстоянию, то направление движения винта штопора совпадает с направлением силы, действующей на элемент с током $d\vec{l}$.

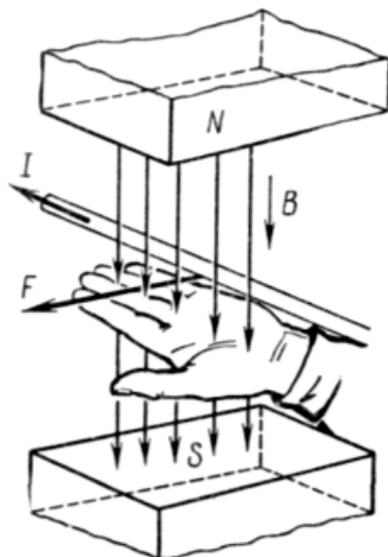


Рис. 6.1. Правило левой руки

Для определения полной силы, действующей на проводник длиной l , необходимо просуммировать силы, действующие на все его элементы:

$$F = \int_0^l Bi \sin \beta dl \quad (6.2)$$

В случае любого расположения проводников в одной плоскости $\beta = 90^\circ$ уравнение упрощается:

$$F = \int_0^l Bidl \quad (6.3)$$

Описанный метод рекомендуется применять тогда, когда можно аналитически найти индукцию в любой точке проводника, для которого необходимо определить силу.

Второй метод определения э.д.у. основан на использовании энергетического баланса системы проводников с током. Если пренебречь электростатической энергией системы и принять, что при деформации токоведущих контуров или их перемещении под действием э.д.у. величина тока во всех контурах остается неизменной, то силу можно найти по уравнению

$$F = \frac{\partial A}{\partial x}, \quad (6.4)$$

где A – электромагнитная энергия;

x – возможное перемещение в направлении действия силы F .

Таким образом, *сила равна частной производной от электромагнитной энергии данной системы по координате, в направлении которой действует сила.*

Электромагнитная энергия системы обусловлена как энергией магнитного поля каждого изолированного контура, так и энергией, определяемой магнитной связью между контурами.

Для системы трех взаимосвязанных контуров электромагнитная энергия

$$A = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + \frac{1}{2} L_3 i_3^2 + M_{12} i_1 i_2 + M_{13} i_1 i_3 + M_{23} i_2 i_3, \quad (6.5)$$

здесь L_1, L_2, L_3 – индуктивности контуров;

i_1, i_2, i_3 – токи в контурах;

M_{12}, M_{13}, M_{23} – взаимоиנדуктивности между контурами.

Первые три члена уравнения определяют энергию независимых контуров, вторые три члена характеризуют энергию, обусловленную магнитной связью.

Уравнение дает возможность рассчитать как силы, действующие в изолированном контуре, так и силу взаимодействия этого контура со всеми остальными.

При коротком замыкании величина тока в цепи не зависит от не-

значительных деформаций токоведущих контуров или от изменения расстояния между ними, возникающих под действием э.д.у. Поэтому при нахождении сил с помощью уравнения можно считать, что величина тока не меняется, а сила возникает в результате изменения индуктивности или взаимоиндуктивности.

Для определения сил внутри одного контура пользуются уравнением

$$F = \frac{\partial A}{\partial x} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial x}, \quad (6.6)$$

где x – координата, в направлении которой действует сила F .

При расчете силы, действующей между контурами, считаем, что энергия меняется только в результате возможного изменения взаимного расположения контуров. При этом энергия, обусловленная собственной индуктивностью, считается неизменной:

$$F = \frac{\partial A}{\partial x} = i_1 i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial x} + i_1 i_3 \frac{\partial M_{13}}{\partial x}. \quad (6.7)$$

Энергетическим методом очень удобно пользоваться тогда, когда известна аналитическая зависимость индуктивности или взаимоиндуктивности от геометрических параметров.

Этот метод позволяет легко найти направление э.д.у. Из уравнения (6.4) следует, что положительному направлению силы F соответствует возрастание энергии системы $\frac{\partial A}{\partial x} > 0$, т.е. деформация контура или его перемещение происходит под действием силы таким образом, чтобы электромагнитная энергия системы возрастала.

Электромагнитная энергия одного контура

$$A = \frac{1}{2} L i^2 = \frac{1}{2} \frac{\Psi}{i} i^2 = \frac{1}{2} \Psi i = \frac{1}{2} w \Phi i, \quad (6.8)$$

где Ψ – потокосцепление;

Φ – магнитный поток;

w – число витков в контуре.

Сила, действующая в контуре, будет направлена таким образом,

чтобы индуктивность, потокосцепление и поток при деформации контура под действием этой силы возрастали.

Возьмем для примера круговой виток (рис. 6.2).

Если $r \leq 0,25R$, то индуктивность витка достаточно точно выражается уравнением

$$L = 4\pi R \left[\ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right] 10^{-7} \text{ Гн.}$$

При протекании тока возникает сила, стремящаяся увеличить радиус витка, поскольку с ростом R растет индуктивность L , а следовательно, увеличивается и электромагнитная энергия системы:

$$A = \frac{1}{2} i^2 L. \quad (6.9)$$

С ростом радиуса возрастает потокосцепление данного контура при условии, что ток в цепи не меняется.

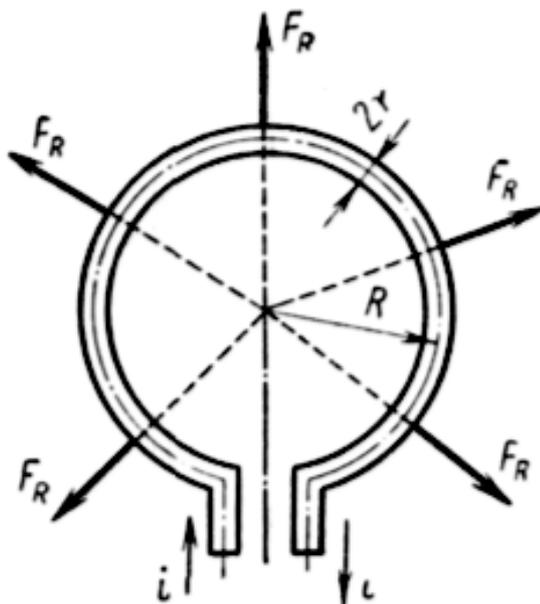


Рис. 6.2. Силы в витке, обтекаемом током

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СЕЧЕНИЯ ПРОВОДНИКА

При протекании тока по цилиндрическому проводнику на отдельные нити тока действуют э.д.у., стремящиеся переместить эту нить к центру проводника. Поскольку все линии тока вертикальны, а индукция в любой точке проводника направлена по касательной, то

сила, действующая на элементарные нити, направлена по радиусу и не имеет осевой составляющей.

При изменении сечения проводника линии тока искривляются и, кроме поперечной сжимающей силы, возникает продольная, стремящаяся разорвать место перехода вдоль оси проводника. Как видно из рис. 6.3, сила, возникающая в месте перехода, направлена в сторону большего сечения.

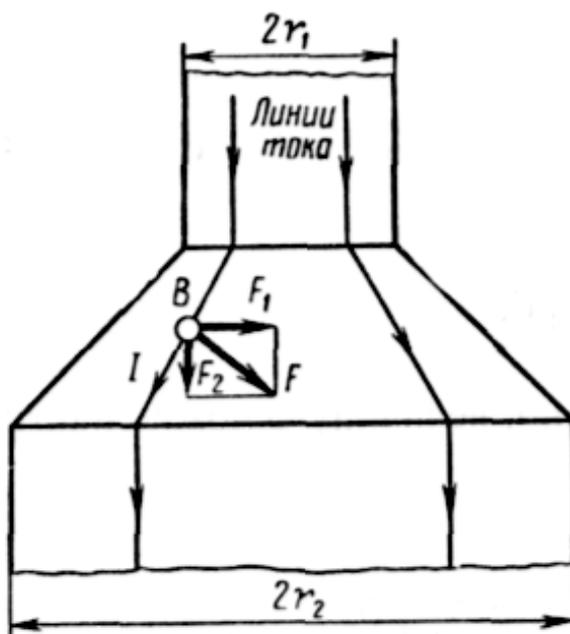


Рис. 6.3. Электродинамические силы, действующие в месте изменения поперечного сечения проводника

Формула для расчета этих сил имеет следующий вид:

$$F = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r_2}{r_1}, \text{ [Н]}. \quad (6.10)$$

Следует отметить, что эта формула справедлива для любого симметричного перехода от сечения с радиусом r_k к сечению с радиусом r_n . Так, в случае многократного конуса

$$F = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r_k}{r_n}, \quad (6.11)$$

где r_k – радиус конечного сечения;

r_n – радиус начального сечения.

Плавный переход от одного сечения к другому можно рассматривать как переход, образованный большим числом конусных переходов.

Таким образом, электродинамическая сила, возникающая при изменении сечения, зависит только от отношения конечного и начального радиусов и не зависит от формы перехода. Этот вывод справедлив для равномерного распределения тока по сечению проводника.

Известно, что в электрическом контакте при переходе тока из одного контакта в другой происходит искривление линий тока, аналогичное показанному на рис. 6.3. Для односточечного контакта касание контактов происходит по площадке смятия. Если положить, что эта площадка находится в центре цилиндрических проводников, то сила, действующая на каждый контакт, может быть рассчитана по формуле

$$F = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r}{r_k}, \quad (6.12)$$

где r – радиус цилиндрического контакта;

r_k – радиус круглой площадки касания.

При номинальном токе эта отбрасывающая сила ничтожна. При коротком замыкании в односточечном контакте отбрасывающая сила может достигать сотен ньютонов. Для того чтобы контакт был динамически устойчив, сила нажатия должна быть больше силы отброса.

В реальных контактах, кроме силы отброса, возникающей из-за изменения сечения проводника, появляется дополнительное э.д.у. за счет взаимодействий, создаваемых токоведущим контуром.

СИЛЫ ВТЯГИВАНИЯ ДУГИ (ПРОВОДНИКА) В СТАЛЬНУЮ РЕШЕТКУ

В дугогасительных камерах аппаратов высокого и низкого напряжений применяется решетка из набора ферромагнитных пластин с пазами.

Электрическая дуга, возникающая между контактами аппарата, является своеобразным проводником тока. Взаимодействие этого проводника с решеткой создает электромагнитную силу,двигающую дугу. Наиболее широко распространены решетки из стальных пластин с клиновидными пазами.

Рассмотрим силу, действующую на проводник (дугу), симметрично расположенный в пазу прямоугольного сечения (рис. 6.4).

При расчете примем следующие упрощения: магнитное сопротивление стали равно нулю; потоком рассеяния, выходящим с торца решетки пренебрегаем; ток течет по геометрической ОСИ проводника.

В данном случае для расчета силы удобно воспользоваться энергетическим методом. В данном случае сила, действующая на проводник:

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial x} . \quad (6.13)$$

Индуктивность системы L можно выразить через поток

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{w\Phi_x}{i} = \frac{\Phi_x}{i} . \quad (6.14)$$

Поскольку $w=1$, тогда

$$F_x = \frac{1}{2} i \frac{\partial \Phi_x}{\partial x} . \quad (6.15)$$

Поток, связанный с проводником,

$$\Phi_x = iwG_\delta = i \frac{\mu_0 l x}{\delta} , \quad (6.16)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7 \text{ ГН/М}$;

l – активная длина решетки;

x – расстояние от проводника до начала паза;

δ – ширина паза.

Подставляя (6.16) в (6.15), получим

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{1}{2} i^2 \frac{\mu_0 l}{\delta} , \text{ [Н]} \\ F_x &= 0,05 l i^2 \frac{\mu_0 l}{\delta} , \text{ [кГ]} \end{aligned} \quad (6.17)$$

При сделанных допущениях сила, действующая на проводник, не зависит от положения проводника в пазу.

В дугогасительных устройствах низкого напряжения дуга, втягиваясь в решетку, пересекает ее и останавливается в точке a , в которой сила, действующая на дугу, должна быть равна нулю.

Это может быть при $\frac{\partial \Phi_x}{\partial x} = 0$, т.е. дуга остановится в точке, где поток достигает максимального значения. Поскольку $\frac{1}{2} i \frac{\partial \Phi_x}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial x}$, то эта

точка также соответствует максимуму электромагнитной энергии. По мере движения дуги вверх проводимость нижней части магнитной цепи растет линейно с x . В точке a общая проводимость цепи будет максимальна. Если дуга пройдет выше нее, то поток начнет снова убывать и возникнет сила, стремящаяся вернуть дугу опять в точку a .

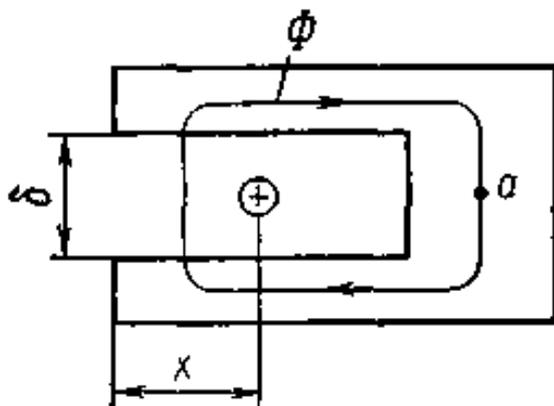


Рис. 6.4. К расчету сил, действующих на проводник, расположенный в прямоугольном пазу ферромагнитного тела

В реальном аппарате картина значительно усложняется, поскольку по мере продвижения дуги вверх растет поток в цепи и наступает насыщение верхней части пластин решетки. Если опытным путем, с помощью измерительной катушки получить зависимость $\Phi_x = f(x)$, заменив дугу проводником, то величина силы, действующей на дугу, может быть достаточно точно рассчитана с учетом сопротивления стали по следующей формуле:

$$F_x = \frac{1}{2} i \frac{\partial \Phi_x}{\partial x_{\text{опыт}}}, \quad (6.18)$$

где $\frac{\partial \Phi_x}{\partial x_{\text{опыт}}}$ находится графическим дифференцированием опытной кривой $\Phi_x = f(x)$. Для клиновидной щели (рис. 6.5) сила, действующая на дугу, может быть также рассчитана по уравнению (6.16), если принять те же допущения, что и для прямоугольной щели:

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{\partial \Phi_x}{\partial x_1}; \quad (6.19)$$

$$\Phi_{x1} = \int_0^{x_1} i \frac{\mu_0 l dx}{\delta_x}, \quad (6.20)$$

здесь δ_x – воздушный зазор на расстоянии x от начала решетки.

Подставив $\Phi_x = f(x)$ в уравнение для силы, получим

$$F_x = \frac{1}{2} i \frac{\partial \Phi_{x1}}{\partial x_1} = 2\pi 10^{-7} i^2 \frac{l}{\delta \frac{h-x_1}{h}} = 2\pi 10^{-7} i^2 \frac{l}{\delta_x}. \quad (6.21)$$

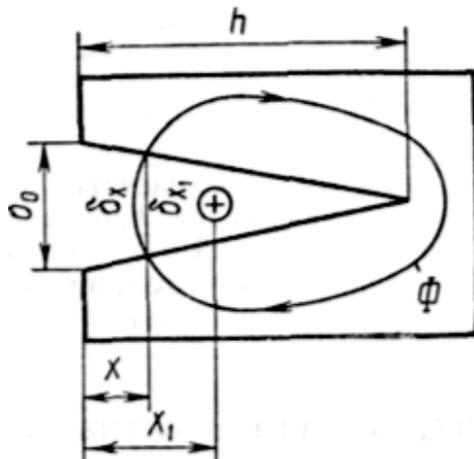


Рис. 6.5. К расчету сил, действующих на проводник, расположенный в суживающемся пазу ферромагнитного тела

В отличие от предыдущего случая по мере роста x_1 величина силы увеличивается и достигает бесконечной величины при $x_1 = h$. В действительности, по мере уменьшения δ_x будет возрастать падение магнитного потенциала в стали. В этом случае мы не имеем права пользоваться уравнением. При $x_1 = h$ вся намагничивающая сила проводника становится равной падению магнитного потенциала в стали. Уравнением можно пользоваться только тогда, когда падение магнитного потенциала в стали невелико (не более 10% от общей намагничивающей силы).

Сила, действующая на дугу, может значительно искажаться ее формой. После расхождения контактов дуга имеет форму не прямолинейного проводника, а скорее форму части окружности. Это приводит к тому, что сначала в решетку входит средняя часть дуги, а потом ее крайние части. Кроме того, дуга может не располагаться точно по оси паза, что также затрудняет расчет. Формулы могут быть использованы только для ориентировочных расчетов. Для более точных расчетов рекомендуется опытным путем снимать зависимость

$\Phi_x = f(x)$ и пользоваться графическим дифференцированием.

Аналогичные силы возникают между проводником и ферромагнитным телом, поскольку при приближении проводника к телу обязательно возрастает поток и, следовательно, увеличивается электромагнитная энергия системы.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ АППАРАТОВ

Электродинамические силы, возникающие в токоведущих частях аппаратов, стремятся деформировать как сами проводники, так и изоляторы, с помощью которых эти проводники прикреплены к заземленным частям аппарата.

Ранее было показано, что э.д.у. меняются как во времени, так и по направлению. Известно, что прочность материала зависит не только от величины силы, но и от направления, длительности ее воздействия и от крутизны нарастания. К сожалению, в настоящее время сведения о работе проводниковых и изоляционных материалов в динамическом режиме крайне ограничены. Поэтому расчет прочности конструкции, как правило, ведется исходя из максимально возможных сил, хотя действуют эти силы кратковременно.

Электродинамической устойчивостью аппарата называется его способность противостоять силам, возникающим при протекании токов короткого замыкания.

Эта устойчивость может выражаться либо непосредственно амплитудным значением тока $i_{\text{дин}}$, при котором механические напряжения в деталях аппарата не выходят за пределы допустимых величин, либо кратностью этого тока относительно амплитуды номинального тока

$$k_{\text{дин}} = \frac{i_{\text{дин}}}{\sqrt{2I_n}}. \quad (6.22)$$

Иногда динамическая устойчивость оценивается действующим значением ударного тока за период после начала короткого замыкания.

В однофазных установках расчет э.д.у. ведется по ударному току короткого замыкания

$$i_{уд} = k_{уд} I_m. \quad (6.23)$$

Если короткое замыкание произошло вблизи генератора, то за расчетную величину I_m берется амплитуда сверхпереходного тока короткого замыкания.

Для трехфазного аппарата за расчетный ток принимается

$$i_{уд} = k_{уд} I_{m3}, \quad (6.24)$$

где ток I_{m3} – амплитуда симметричной составляющей 3-фазного замыкания. Расчет устойчивости проводится для средней фазы, дающей наибольшее значение сил.

Для проводниковых материалов рекомендуется не превышать следующих значений механических напряжений:

$$\text{Медь (МТ)} - 1400 \text{ кГ/см}^2; 1 \text{ кГ/см}^2 = \frac{10^4}{0,102} \text{ Н/м}^2.$$

$$\text{Алюминий (АТ)} - 700 \text{ кГ/см}^2.$$

ДОПУСТИМЫЕ МАКСИМАЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ И ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

ИЗОЛИРОВАННЫЕ ПРОВОДНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Как показывают наблюдения, чем выше температура, воздействию которой подвергаются изоляционные материалы, входящие в конструкции аппаратов, тем быстрее ухудшаются их механические и электрические качества: уменьшаются механическая и электрическая прочность, эластичность; при переменном токе увеличиваются диэлектрические потери, что, в свою очередь, вызывает дальнейшее повышение температуры изоляции и ее быстрое старение. Ухудшение электрических и механических свойств изоляционных материалов приводит к нарушению нормальной работы аппарата. С другой стороны, при прочих равных условиях, чем большие температуры допускаются в аппарате, тем требуется меньший расход проводниковых материалов, следовательно, снижаются вес и стоимость аппарата. Оп-

оптимальное решение вопроса о допустимых температурах достигается в результате длительных лабораторных исследований и эксплуатации электрических аппаратов с разными изоляционными материалами при различных температурах и режимах работы (длительном, повторно-кратковременном, кратковременном).

Естественно, что изоляционные материалы обладают разной стойкостью в отношении воздействия температур. Кроме того, в различных условиях степень воздействия температуры на изоляционные материалы меняется. Так, например, воздействие температуры на изоляцию проводников катушек, пропитанных лаком, значительно слабее, чем непропитанных, и старение изоляции в них соответственно будет протекать медленнее.

В настоящее время в соответствии с ГОСТ 8865-58 и нормами МЭК (Международная электротехническая комиссия) изоляционные материалы разбиты по нагревостойкости на семь классов Y, A, E, B, F, H, C, длительно допустимые температуры для этих классов приведены в табл. 6.1. В ГОСТах наряду с допустимой температурой часто указывается допустимое превышение температуры аппарата над температурой окружающего воздуха, определяемое как разность допустимой температуры и температуры окружающего воздуха. При этом температура окружающего воздуха чаще всего принимается 35 или 40 °С.

Дело в том, что в некоторых пределах изменения температур окружающего воздуха для данного режима работы превышение температуры аппарата практически не зависит от температуры окружающего воздуха, и, таким образом, результаты испытаний на нагрев электрических аппаратов, проведенные при разных температурах окружающего воздуха, становятся сравнимыми. Однако следует помнить, что срок службы аппарата определяется не превышением температуры, а температурой нагрева, и вследствие этого превышения могут быть допущены разные температуры в зависимости от температуры окружающего воздуха.

В настоящее время во многих ГОСТах на электрические аппараты приведенная классификация изоляционных материалов пока не

нашла отражения. Так, например, в ГОСТ 8024-56 «Аппараты переменного тока высокого напряжения» в зависимости от нагрева при длительной работе все изоляционные материалы разделяются на классы *O, A, B, C* с наибольшей температурой нагрева только 110 °С.

Для трансформаторного масла согласно ГОСТ 8024-56 допускается превышение температуры 40 °С, если масло используется в качестве дугогасящей среды, и 55 °С – для случаев, когда масло используется только как изолирующая среда.

Применительно к аппаратам низкого напряжения (до 1000 В) разработан ГОСТ 12434-66, в котором электрические аппараты разделяются на аппараты распределения энергии и аппараты управления приемниками энергии.

К аппаратам распределения энергии относятся автоматические выключатели, переключатели, плавкие предохранители, контактные разъемы.

К аппаратам управления – приемникам энергии относятся контакторы, реле управления и промышленной автоматики, командоконтроллеры, кнопки управления, конечные и путевые выключатели, резисторы, реостаты, электромагниты, контроллеры, ручные и электромагнитные пускатели.

Таблица 6.1

**Длительно допустимые температуры
для изоляционных материалов различных классов**

Класс	<i>Y</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>C</i>
°С	90	105	120	130	155	180	180

Примечание:

Класс *Y* – непропитанные и непогруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы и шелка, а также другие материалы, соответствующие данному классу и другому сочетанию материалов.

Класс *A* – пропитанные и погруженные в жидкий электроизоляционный состав волокнистые материалы из целлюлозы или шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов.

Класс *E* – некоторые синтетические и органические пленки, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов.

Класс *B* – материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов.

Класс *F* – материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов.

Класс *H* – материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов.

Класс *C* – слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или кремнийорганическими связующими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов.

ИЗОЛИРОВАННЫЕ И НЕИЗОЛИРОВАННЫЕ ТОКОВЕДУЩИЕ ЧАСТИ АППАРАТОВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Короткое замыкание в электроустановках сопровождается протеканием по проводникам токов, значительно превышающих токи нормального рабочего режима. Так как длительность протекания токов короткого замыкания измеряется обычно от долей до единиц секунд, то естественно, что и допустимые температуры в конце короткого замыкания могут быть значительно выше температур, допускаемых при длительной нормальной работе.

В настоящее время довольно широко распространено мнение о нецелесообразности ограничения каким-либо ГОСТом температур при коротких замыканиях, и взамен этого предлагается предъявлять требования к аппарату: быть пригодным к дальнейшей эксплуатации после протекания тока короткого замыкания данной длительности (1 сек, 5 сек и т.д.). Для лучшей ориентировки при проектировании электрических аппаратов приведем предельно допустимые температуры в конце короткого замыкания, которые обычно принимаются за

основу при расчете устойчивости электрических аппаратов при коротких замыканиях:

а) для медных проводников, неизолированных или покрытых изоляцией органического происхождения – 250 °С;

б) для алюминиевых проводников как изолированных, так и неизолированных – 200 °С;

в) для медных проводников, покрытых изоляцией неорганического происхождения – 350 °С.

При таких больших температурах слой изоляции, непосредственно прилегающий к проводнику, повреждается; однако срок службы аппарата, как показывает опыт, все-таки остается довольно большим и экономически приемлемым.

Следует отметить, что при таких температурах, как 200-350 °С, особое внимание при проектировании электрических аппаратов должно быть уделено уменьшению механической прочности и температурным деформациям частей электрических аппаратов во избежание неудовлетворительной работы последних.

ПРОСТЕЙШИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРЕВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

ПОНЯТИЕ О ВИДАХ ТЕПЛООБМЕНА

При наличии разницы температур в теле в нем происходит процесс выравнивания температур из-за потока тепла от мест с более высокой температурой к местам с более низкой температурой.

По аналогичной причине происходит выравнивание температур двух тел, имеющих разные температуры и находящихся в непосредственном соприкосновении или разделенных друг от друга какой-либо средой (газом, жидкостью и др.). *Процесс переноса тепла называется теплообменом или теплоотдачей.* Различают три способа теплообмена: теплопроводность, конвекция, тепловое излучение.

Теплопроводностью называют явление переноса тепловой энергии непосредственно от одной части тела к другой (в чистом виде явление теплопроводности имеет место в твердых телах).

Конвекцией называют явление переноса тепловой энергии путем

перемещения частиц жидкости или газа; явление конвекции всегда сопровождается явлением теплопроводности.

Различают *естественную* (свободную) *конвекцию*, когда движение частиц окружающей среды у нагретой поверхности обусловлено разностью плотностей нагретых и холодных частиц жидкости или газа, и *вынужденную конвекцию*, когда движение частиц окружающей среды происходит в результате действия вентилятора, насоса или ветра и пр.

Исходя из физических представлений, легко прийти к выводу, что отдача тепла конвекцией в значительной мере будет зависеть от физических свойств среды (теплопроводности, вязкости, теплоемкости, плотности), от обтекаемости тела, т.е. от его геометрической формы и расположения в пространстве, от скорости движения частиц окружающей среды около нагретой поверхности и от степени шероховатости последней. Далее, поскольку физические свойства среды зависят от температуры, то и отдача тепла конвекцией будет зависеть от температуры среды и превышения температуры нагретой поверхности относительно среды.

Тепловым излучением (лучеиспусканием) называют явление переноса тепловой энергии электромагнитными волнами. Как будет видно из дальнейшего, теплообмен излучением между нагретыми поверхностями зависит от температуры поверхностей, от размеров, геометрии, обработки и их взаимного расположения, от физических свойств материала.

Наружная поверхность нагретого тела излучает тепло на окружающие поверхности, имеющие меньшую температуру, чем поверхность нагретого тела, при этом мы будем предполагать, что газовая среда, например воздух, разделяющая поверхность нагретого тела от поверхностей, воспринимающих тепловые лучи, полностью прозрачна для последних.

При расчетах часто предполагается, что температура окружающего воздуха практически равна температуре поверхностей, воспринимающих тепловое излучение нагретой поверхности.

Жидкости и твердые тела практически не пропускают тепловых лучей, следовательно, в жидких средах имеет место только кон-

вективный теплообмен. Следует подчеркнуть, что физическая природа всех трех способов передачи тепла совершенно различна.

**ПРИМЕНЕНИЕ ФОРМУЛЫ НЬЮТОНА ДЛЯ РАСЧЕТА
ОТДАЧИ ТЕПЛА С НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ (ЖИДКОСТИ, ГАЗУ)**

В электротехнической практике весьма часто приходится рассчитывать превышение температуры наружной поверхности относительно температуры жидкой или газообразной среды, омывающей нагретую поверхность. В этих случаях оказывается весьма удобной широко известная формула Ньютона

$$P = k_{\text{то}} S (\vartheta - \vartheta_0), \quad (6.25)$$

здесь P – мощность, отдаваемая конвекцией и лучеиспусканием окружающей среде, Вт;

S – нагретая поверхность, м²;

ϑ – температура поверхности, °С;

ϑ_0 – температура окружающей среды;

$k_{\text{то}}$ – коэффициент теплоотдачи, учитывающий в общем случае отдачу тепла конвекцией и лучеиспусканием, Вт/м²·град. *Коэффициент теплоотдачи $k_{\text{то}}$ численно равен мощности, отдаваемой нагретой поверхностью в 1 м² окружающей среде при разности температур в 1 °С между нагретой поверхностью и окружающей средой.*

$$P = k_{\text{то}} \cdot 1 \text{ м}^2 \cdot 1 \text{ °С}. \quad (6.26)$$

В соответствии с *отмеченными* факторами, от которых зависит отдача тепла конвекцией и лучеиспусканием, следует подчеркнуть, что коэффициент теплоотдачи $k_{\text{то}}$ зависит от физических постоянных (удельного веса, теплопроводности, вязкости, теплоемкости), жидкой или газообразной среды, воспринимающей тепло от нагретого тела, или наоборот, отдающей тепло твердому телу, от формы и расположения тела в жидкой или газообразной среде, от состояния поверхностей и т.д.

Практический интерес представляет расчет нагрева катушек электрических аппаратов. На основе большого количества опытов, прове-

денных с различными цилиндрическими катушками, можно предложить следующие приблизительные выражения для определения коэффициента теплоотдачи:

– для случая, когда теплоотдающая поверхность катушек S_k лежит в пределах $1,0 < S_k < 100 \text{ см}^2$ формула для коэффициента теплоотдачи имеет вид

$$k_{\text{ТО}} = 4,6 \cdot 10^{-3} \frac{1 + 0,005(\vartheta - \vartheta_0)}{\sqrt[3]{S_k}}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}, \quad (6.27)$$

– для случаев, когда $100 < S_k < 500 \text{ см}^2$:

$$k_{\text{ТО}} = 2,3 \cdot 10^{-3} \frac{1 + 0,005(\vartheta - \vartheta_0)}{\sqrt[5]{S_k}}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}. \quad (6.28)$$

Формула может быть представлена в ином виде:

$$P = \frac{\vartheta - \vartheta_0}{\frac{1}{k_{\text{ТО}} S}}. \quad (6.29)$$

Формально она имеет такой же вид, как и формула закона Ома для электрического тока. Поэтому знаменатель в этой формуле $\frac{1}{k_{\text{ТО}} S}$ часто называют *сопротивлением тепловому потоку при переходе от поверхности S к окружающей среде*, при этом имеется в виду, что превышение температуры не изменяется во времени.

**ПРИМЕНЕНИЕ ФОРМУЛЫ НЬЮТОНА
ДЛЯ РАССМОТРЕНИЯ УСТАНОВЛИВАЮЩЕГОСЯ
ПРОЦЕССА НАГРЕВА ТЕЛА ОТ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА,
РАСПОЛОЖЕННЫХ ВНУТРИ ТЕЛА**

Пусть внутри тела действует источник тепла постоянной мощности P . Введем следующие предположения:

- температура тела в любой момент времени одинакова во всех точках объема тела;
- теплоемкость тела C не зависит от температуры;
- коэффициент теплоотдачи практически не зависит от превышения температуры и одинаков по всей поверхности тела.

За время dt энергия, генерируемая в теле, будет расходоваться на повышение температуры тела ($Cd\tau$), а часть ее ($k_{\text{то}}S\tau dt$) будет отдаваться в окружающую среду:

$$Pdt = Cd\tau + k_{\text{то}}S\tau dt . \quad (6.30)$$

Следовательно, уравнение процесса нагрева тела:

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{k_{\text{то}}S}{C}\tau - \frac{P}{C} = 0 . \quad (6.31)$$

Частное решение последнего уравнения:

$$\tau_1 = \frac{P}{k_{\text{то}}S} . \quad (6.32)$$

Общее решение дополнительного уравнения

$$\frac{d\tau_2}{dt} + \frac{k_{\text{то}}S}{C}\tau_2 = 0 , \quad (6.33)$$

будет

$$\tau_2 = Ae^{-\frac{t}{T}} , \quad (6.34)$$

где A – постоянная интегрирования, определяемая условиями задач.

Величина $T = \frac{C}{k_{\text{то}}S}$, равная отношению полной теплоемкости C тела к его теплоотдающей способности $k_{\text{то}}S$, называется постоянной времени.

Общее решение уравнения:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{P}{k_{\text{то}}S} + Ae^{-\frac{t}{T}} . \quad (6.35)$$

Для определения постоянной A используем следующее условие: при $t=0$ должно быть

$$0 = \frac{P}{k_{\text{то}}S} + A , \text{ т.е. } A = -\frac{P}{k_{\text{то}}S} . \quad (6.36)$$

Подставляя полученное выражение, будем иметь

$$\tau = \frac{P}{k_{\text{то}}S}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) . \quad (6.37)$$

На рис. 6.6 представлено графическое изображение последнего

выражения, из которого видно, что при $t = \infty$

$$\tau_{\infty} = \frac{P}{k_{\text{то}}S}. \quad (6.38)$$

Откуда следует, что

$$\frac{\tau}{\tau_{\infty}} = 1 - e^{-\frac{t}{T}}. \quad (6.39)$$

Таким образом, T_0 равно установившемуся превышению температуры, когда выделяемая мощность P становится численно равной мощности, отдаваемой в окружающую среду с поверхности нагретого тела.

Очевидно, что

$$\tau_{\infty} = \frac{P}{k_{\text{то}}S} = \text{const}. \quad (6.40)$$

Из (6.39) следует:

$$\left. \frac{d\tau}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\tau_{\infty}}{T} \quad \text{или} \quad T = \frac{\tau_{\infty}}{\left. \frac{d\tau}{dt} \right|_{t=0}}. \quad (6.41)$$

Касательная к кривой $\tau(t)$ в начале координат отсекает на прямой τ_{∞} отрезок, равный в выбранном масштабе постоянной времени T .

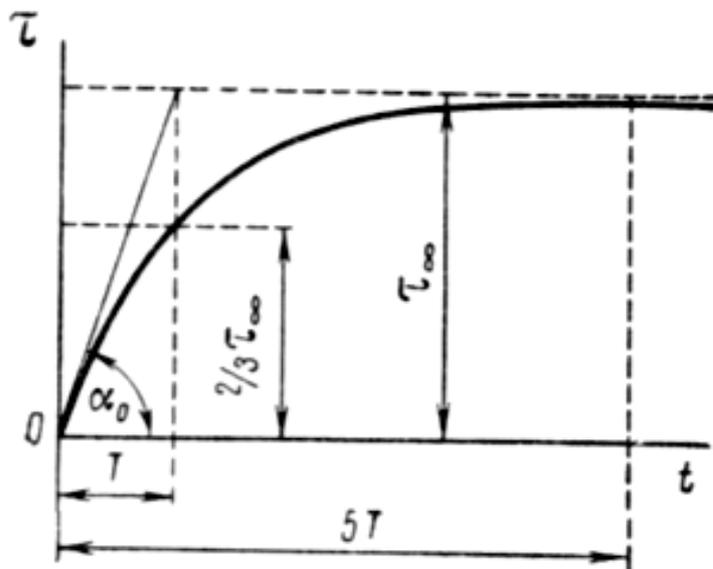


Рис. 6.6. Зависимость превышения температуры от времени при нагреве однородного тела

Нетрудно показать, что при $t=T$

$$\frac{\tau_T}{\tau_\infty} \cong \frac{2}{3}. \quad (6.42)$$

На основании этого можно определять *постоянную времени T* как *время, необходимое для достижения $\approx \frac{2}{3}$ установившегося превышения температуры* (см. рис. 6.6).

С точностью $\approx 1\%$ можно считать, что процесс установления температуры происходит через время, равное $5T$.

После отключения аппарата начинается его охлаждение. Так как энергия, подводимая к аппарату, равна нулю, то левая часть также равна нулю:

$$0 = Cd\tau + k_{\tau_0} S\tau dt. \quad (6.43)$$

Решение уравнения (6.43) имеет вид:

$$\tau = Ae^{-\frac{t}{T}}, \quad (6.44)$$

где A – постоянная интегрирования, равная

$$A = \tau_\infty = \frac{P}{k_{\tau_0} S}. \quad (6.45)$$

Окончательно получаем:

$$\tau = \tau_\infty e^{-\frac{t}{T}} = \frac{P}{k_{\tau_0} S} e^{-\frac{t}{T}}.$$

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

ОСНОВНОЙ ЗАКОН ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БИО – ФУРЬЕ

Основной закон теплопроводности математически описывается выражением

$$dQ = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n} S dt. \quad (6.46)$$

λ – коэффициент теплопроводности (Вт/м °С).

Знак (–) показывает, что тепло передается в направлении убывания температуры вдоль нормали (n) к площадке (S).

Поделив обе части равенства на dt , получим количество тепла, проходящее в единицу времени через площадку S :

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n} S. \quad (6.47)$$

Здесь: dQ – количество тепла, передаваемое за время dt через площадку S в направлении нормали к последней; $\frac{\partial \vartheta}{\partial n}$ – производная от температуры вдоль нормали (n) к площадке S .

Производная $\frac{dQ}{dt} = \Phi$ является тепловым потоком через площадку S . Отношение

$$\frac{\Phi}{S} = \Phi_0 \quad (6.48)$$

представляет собой плотность теплового потока в какой-либо точке на поверхности S . Таким образом, равенство можно написать в следующем виде

$$\Phi_0 = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n}. \quad (6.49)$$

ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ СКВОЗЬ ТОЛЩУ СТЕНКИ, ОГРАНИЧЕННУЮ ДВУМЯ ПЛОСКОСТЯМИ

Рассмотрим простейшие случаи, когда тепловой поток Φ и его плотность Φ_0 не изменяются во времени (стационарное состояние) и в пространстве.

Такой случай может иметь место при наличии стенки толщиной δ , ограниченной двумя параллельными плоскостями и разделяющей две среды (жидких или газообразных) с различными температурами (рис. 6.7).

Пусть температура ϑ_1 на всем протяжении одной стороны стенки l будет больше, чем температура ϑ_2 на противоположной стороне. Предполагая, что площадь стенки достаточно велика (теоретически

не ограничена), можно предположить, что поверхности с одинаковой температурой (изотермические поверхности) в толще стенки будут представлять собой плоскости, параллельные граничным поверхностям, имеющим постоянные (но различные) температуры на всем протяжении каждой поверхности. При этом естественно, что изменение температуры будет происходить только в направлении нормали к поверхности стенки. Вследствие этого, направляя ось ординат вдоль стенки l , ось абсцисс – вдоль нормали к поверхности стенки, и заменяя букву n буквой x в равенстве можно написать:

$$\Phi_0 = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = -\lambda \frac{d\vartheta}{dx}.$$

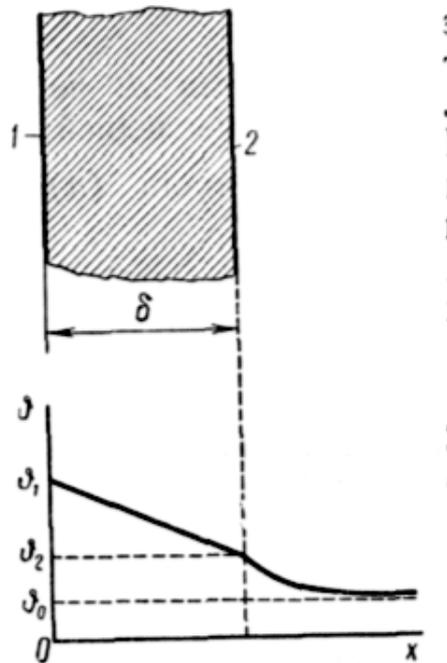


Рис. 6.7. К расчету теплопередачи через плоскую стенку

Этому дифференциальному уравнению соответствуют следующие граничные условия:

$$\text{при } x = 0; \vartheta = \vartheta_1;$$

$$\text{при } x = \delta; \vartheta = \vartheta_2.$$

Решением уравнения будет

$$-\frac{\Phi_0}{\lambda} x + C_1 = \vartheta. \quad (6.50)$$

Для определения C_x используем условие:

$$C_1 = \vartheta_1;$$

$$\vartheta = \vartheta_1 - \frac{\Phi_0}{\lambda} x.$$

Из последнего равенства следует, что температура в стенке изменяется по закону прямой.

Используя условие, получим

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 - \frac{\Phi_0}{\lambda} \delta;$$

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \frac{\Phi_0}{\lambda} \delta, \quad (6.51)$$

где $\vartheta_1 - \vartheta_2$ – падение (перепад) температуры в толще стенки при данной плотности теплового потока.

Формулу (6.51) записывают иначе, учитывая, что $\Phi = \Phi_0 S$:

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \frac{\Phi}{\lambda S} \delta. \quad (6.52)$$

Следует обратить внимание на аналогию уравнений соответствующим уравнениям для электрических явлений.

Закон Ома для теплового потока

$$\Phi = \frac{\Delta \vartheta}{\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\delta}{S}}. \quad (6.53)$$

Закон Ома для однородного проводника

$$I = \frac{U}{\rho \frac{l}{S}}. \quad (6.54)$$

Тепловое сопротивление стенки

$$R_T = \frac{1}{\lambda} \frac{\delta}{S},$$

$$R_s = \rho \frac{l}{S}. \quad (6.55)$$

Видно, что между явлениями электрического тока в проводниках

и явлениями теплового потока существует далеко идущая аналогия, которой часто пользуются для упрощения решения различных задач по теплопередаче. В частности, для решения задач по нагреву электрических машин и аппаратов весьма удобным оказывается применение понятия о сопротивлении тепловому потоку.

РЕЖИМЫ НАГРЕВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ КРАТКОВРЕМЕННЫЙ И ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННЫЙ РЕЖИМЫ НАГРЕВА

Температура аппарата или отдельных его частей в процессе нагрева (или охлаждения) определяется отношением времени нагрева к постоянной времени нагрева аппарата или отдельной его части.

Уравнение процесса нагрева при отдаче тепла в окружающую среду по закону Ньютона имеет следующий вид:

$$\tau = \tau_{\text{НАЧ}} e^{-\frac{t}{T}} + \tau_y (1 - e^{-\frac{t}{T}}). \quad (6.56)$$

Теоретически время достижения установившегося превышения температуры бесконечно, но если задаться точностью 2%, то при этом можно считать, что для достижения установившегося превышения температуры время нагрева t должно быть больше, чем $4T$, так как $(1 - e^{-4}) > 0,98$;

Если время нагрева $t < 4T$, то, очевидно, температура аппарата не достигнет установившегося значения.

Аналогично при охлаждении аппарата, если время охлаждения аппарата (ток через аппарат не протекает) больше $4T$, то можно считать, что за такой промежуток времени температура аппарата станет равной температуре окружающей среды.

Часто встречаются такие режимы работы аппаратуры, когда время, в течение которого аппарат включен, (время нагрева) меньше, чем время, необходимое для нагрева до установившейся температуры, т.е. $t_{\text{н}} < 4T$, а время паузы $t_{\text{п}}$ (когда ток через аппарат не протекает) – много больше, т.е. $4T (t_{\text{п}} > 4T)$. Подобный режим работы аппарата назы-

вается *кратковременным*.

Очевидно, что при кратковременном режиме работы допустимая величина тока может быть принята большей, чем при длительном режиме.

Пусть известны допустимое превышение температуры аппарата $T_{\text{доп}}$, длительно допустимый ток $I_{\text{дл.доп}}$ или длительно допустимая мощность потерь $P_{\text{дл.доп}}$ и постоянная времени нагрева аппарата T . Пусть через аппарат в кратковременном режиме за время $T_{\text{кр}}$ протекает некоторый ток $I_{\text{кр}}$. Току $I_{\text{кр}}$ соответствует мощность потерь $P_{\text{кр}}$. Если бы ток $I_{\text{кр}}$ протекал достаточно долго, то в соответствии с уравнением (6.56) превышение температуры аппарата установилось бы равным (рис. 6.8)

$$(\tau_y)_{\text{кр}} = \frac{P_{\text{кр}}}{k_{\text{то}} S_{\text{охл}}}. \quad (6.57)$$

При времени протекания $t_{\text{кр}}$ максимальное превышение температуры примет следующее значение:

$$(\tau_{\text{max}})_{\text{кр}} = (\tau_y)_{\text{кр}} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{кр}}}{T}}\right). \quad (6.58)$$

В качестве условия мы примем, что это максимальное превышение температуры в кратковременном режиме не должно превзойти установившееся значение в длительном режиме, т.е.

$$\begin{aligned} (\tau_{\text{max}})_{\text{кр}} &\leq (\tau_y)_{\text{дл.доп}} \cdot \\ (\tau_y)_{\text{дл.доп}} &= \frac{P_{\text{дл.доп}}}{k_{\text{то}} S_{\text{охл}}}, \end{aligned} \quad (6.59)$$

то из (6.57)-(6.59) следует

$$\frac{P_{\text{дл.доп}}}{k_{\text{то}} S_{\text{охл}}} = \frac{P_{\text{кр}}}{k_{\text{то}} S_{\text{охл}}} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{кр}}}{T}}\right). \quad (6.60)$$

Откуда коэффициент допустимой перегрузки по мощности в кратковременном режиме

$$k_p = \frac{P_{\text{кр}}}{P_{\text{дл.доп}}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{\text{кр}}}{T}}}.$$

Если принять в простейшем случае, что мощность потерь пропорциональна квадрату тока, то коэффициент перегрузки по току в кратковременном режиме:

$$k_i = \sqrt{k_p} = \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{sp}}{T}}}}$$

При конструировании аппаратов, специально предназначенных для кратковременного режима работы, надо стремиться к увеличению его постоянной времени нагрева T , так как при этом растет коэффициент перегрузки по току и по мощности. Увеличение постоянной времени T , как правило, достигается увеличением теплоемкости аппарата.

Если время *бестоковой паузы* недостаточно для полного остывания аппарата, т.е. если $t_{п} < 4T$, то при последующем включении аппарата его нагрев начнется при некотором значении температуры, отличающемся от температуры окружающей среды ($\tau_{нач} > 0$).

Существует ряд аппаратов, предназначенных для работы в *повторно-кратковременном режиме*. В этом режиме циклы нагрева и охлаждения аппарата строго чередуются. Обозначим *время работы* аппарата в одном цикле (время протекания тока) t_p , а время *бестоковой паузы* $t_{п}$. Пусть $t_p < 4T$ и $t_{п} < 4T$. Графически зависимость тока от времени в повторно-кратковременном режиме представлена на рис. 6.9. Сумму t_p и $t_{п}$ назовем *временем цикла* $t_{ц}$.

В течение первого цикла за время t_{p1} аппарат нагревается до некоторого превышения температуры $\tau_{max 1}$, а за время первой паузы $t_{п1}$ произойдет его охлаждение до $\tau_{min 1}$.

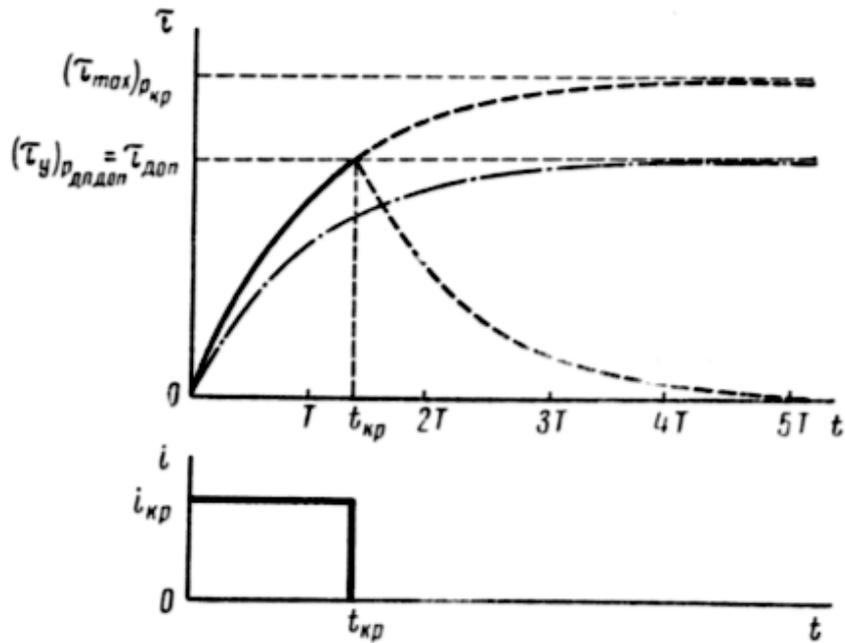


Рис. 6.8. Кратковременный процесс нагрева

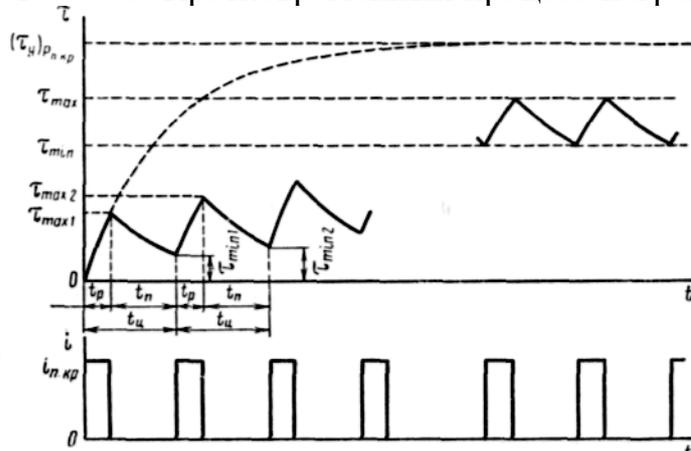


Рис. 6.9. Повторно-кратковременный процесс нагрева

Во втором цикле нагрев аппарата начнется при $\tau_{\text{нач}2} = \tau_{\text{мин}1}$ и за время t_{p2} будет достигнуто превышение температуры $\tau_{\text{max}2}$, но так как $t_{p1} = t_{p2}$ и $\tau_{\text{нач}2} > \tau_{\text{нач}1}$, то $\tau_{\text{max}2} > \tau_{\text{max}1}$. За время второй паузы $t_{п2}$ аппарат охладится и в конце второго цикла опять будет иметь место превышение температуры, которое будет больше, чем $\tau_{\text{мин}1}$. Если такие циклы будут периодически повторяться достаточно долго, то в конце концов установится процесс колебания температуры аппарата, так называемый *квазиустановившийся режим*.

Если в повторно-кратковременном режиме мощность потерь в аппарате в промежутки t_p равна $P_{п.кр}$, то, очевидно, максимальное превышение температуры в квазиустановившемся режиме будет ни-

же, чем если бы мощность $P_{п.кр}$ выделялась бесконечно долго, т.е. $\tau_{max} < (\tau_y)_{п.кр}$. Для полного использования материалов в аппарате и для обеспечения надежности его работы должно соблюдаться условие:

$$\tau_{max} = \tau_{дл.доп}. \quad (6.61)$$

Рассмотрим n -ный цикл при достаточно большом значении числа n квазиустановившегося режима. Для этого цикла справедливы равенства

$$\begin{aligned} \tau_{max} &= \tau_{min} e^{\frac{t_p}{T}} + (\tau_y)_{п.кр} (1 - e^{\frac{t_p}{T}}); \\ \tau_{min} &= \tau_{max} e^{-\frac{t_n}{T}}. \end{aligned}$$

откуда следует

$$\tau_{max} (1 - e^{\frac{t_p+t_n}{T}}) = (\tau_y)_{п.кр} (1 - e^{\frac{t_p}{T}}). \quad (6.62)$$

Установившееся превышение температуры при длительном процессе выделения мощности:

$$(\tau_y)_{п.кр} = \frac{P_{п.кр}}{k_{то} S_{охл}}. \quad (6.63)$$

Получим

$$\frac{P_{дл.доп}}{k_{то} S_{охл}} (1 - e^{-\frac{t_p+t_n}{T}}) = \frac{P_{п.кр}}{k_{то} S_{охл}} (1 - e^{-\frac{t_p}{T}}), \quad (6.64)$$

тогда коэффициент перегрузки по мощности в повторно-кратковременном режиме:

$$k_p = \frac{P_{п.кр}}{P_{дл.доп}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_p+t_n}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}, \quad (6.65)$$

а коэффициент перегрузки по току

$$k_1 = \sqrt{k_p} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p+t_n}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}}. \quad (6.66)$$

При расчетах аппаратов, предназначенных для повторно-кратковременного режима работы, часто используется величина *относительной продолжительности включения* ПВ%. Она является вы-

раженным в процентах отношением времени работы ко времени всего цикла, то есть

$$ПВ\% = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100\%. \quad (6.67)$$

Для аппаратов, предназначенных к работе в повторно-кратковременном режиме, обычно задается частота включения в час n . Тогда время цикла и время работы аппарата могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} t_{\text{ц}} &= \frac{3600}{n}; \\ t_p &= t_{\text{ц}} \frac{ПВ\%}{100\%} = \frac{3600}{n} \frac{ПВ\%}{100\%}, \end{aligned} \quad (6.68)$$

где n – заданная частота включений в час, откуда получим выражение коэффициента перегрузки по току:

$$k_I = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{1}{T} \frac{3600}{n}}}{1 - e^{-\frac{1}{T} \frac{3600}{n} \frac{ПВ\%}{100\%}}}}. \quad (6.69)$$

ПРОЦЕСС НАГРЕВА ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ. ПОНЯТИЕ О ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Режим короткого замыкания в цепи большей частью является аварийным и его обычно ликвидируют за малые промежутки времени – секунды и доли секунды, однако, как ни мала длительность протекания токов короткого замыкания, их воздействие может оказаться катастрофическим.

Обычно время воздействия токов КЗ $t_{\text{КЗ}}$ значительно меньше постоянной времени нагрева токоведущих частей. Легко показать, что при $t_{\text{КЗ}} < 0,05T$ процесс нагрева происходит так, что тепло не отдается в окружающую среду. Такой процесс нагрева называют адиабатическим.

Действительно, если функцию $e^{-\frac{t}{T}}$ разложить в ряд Маклорена, то получим выражения:

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-\frac{t}{T}}); \quad (6.70)$$

$$\tau = \tau_y \left(\frac{t}{T} - \frac{t^2}{2!T^2} + \frac{t^3}{3!T^3} - \dots \right). \quad (6.71)$$

Так как температуры проводников в конце процесса короткого замыкания строго ограничены, каждый аппарат может быть охарактеризован допустимой величиной произведения $[I^2t]$. Обычно задается не сама величина $[I^2t]$, а *величина тока неизменной силы, тепловое действие которого аппарат может выдержать в течение заданного времени так, что это не препятствует его дальнейшей нормальной работе*. Эта величина тока называется током термической устойчивости. Чаще всего задается ток десяти-, пяти- или односекундной термической устойчивости. Если необходимо найти ток термической устойчивости при времени действия t , отличающемся от 10 сек (или 5 сек соответственно), то это может быть легко сделано из условия

$$I_t^2 t = I_{10}^2 10,$$

$$I_t = I_{10} \sqrt{\frac{10}{t}}.$$

ЛЕКЦИЯ №7

ЭЛЕКТРОКОНТАКТЫ, ПОНЯТИЯ И ТЕОРИЯ. КОНСТРУКЦИЯ И ВЫБОР КОММУТИРУЮЩИХ КОНТАКТОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Любая электротехническая установка состоит из элементов, так или иначе связанных между собой. Соединение проводящих звеньев электрической цепи, обеспечивающее протекание электрического тока при наличии источника э.д.с., осуществляется с помощью электрических контактов.

Слово контакт от латинского слова *contactus* – прикосновение. Под электрическим контактом весьма часто понимается совокупность двух или нескольких проводников электрического тока, соединенных между собой и сжатых с определенной силой.

ГОСТ 2774-44 определяет электрический контакт, как «место перехода тока из одной токоведущей части в другую».

По своему назначению электрические контакты можно разделить на две группы.

1. *Соединительные контакты*, которые служат только для соединения различных звеньев электрической цепи, т.е. для обеспечения протекания тока от одного звена к другому. Соединительные контакты всегда замкнуты.

2. *Коммутирующие контакты*, предназначенные для включения, отключения и переключения электрических цепей.

Соединительные контакты, применяемые в токопроводах электрических аппаратов, весьма разнообразны. Некоторые типичные конструкции их изображены на рис. 7.1.

Основным требованием, предъявляемым к соединительным контактам, является надежность в длительной эксплуатации: *соединительные контакты должны длительно, в пределах срока службы всей установки в целом и без повреждений допускать протекание токов нормального режима и кратковременных токов аварийных режимов работы.*

Надежность в длительной эксплуатации соединительных (не размыкаемых) контактов будет обеспечена, если сопротивление контакта электрическому току будет достаточно стабильным. Для этого соединительный контакт должен обладать способностью противостоять как воздействию окружающей среды, так и воздействию механических усилий от температурных деформаций и от электродинамических усилий, возникающих при протекании больших токов короткого замыкания.

Контактирующие проводники в соединительных контактах могут быть либо неподвижны друг относительно друга (хотя контакт в целом может и перемещаться с определенной скоростью), либо перемещаться относительно друг друга без размыкания цепи, как, например, это имеет место в роликовом или щеточном контакте.

Коммутирующие контакты могут находиться в замкнутом (соответствующая цепь включена) или разомкнутом (соответствующая

цепь отключена) состоянии.

Существует большое разнообразие коммутирующих контактов. Например, могут быть контакты: рубящие, торцовые, щеточные, пальцевые, розеточные и пр. По своему назначению коммутирующие контакты в силовых аппаратах можно разделить на главные и дугогасительные. Обычно главные контакты шунтируются дугогасительными, в процессе размыкания цепи главные контакты выходят из соприкосновения ранее, чем дугогасительные, а поэтому образование дуги происходит только на дугогасительных. Таким образом, главные контакты защищены от воздействия дуги и служат для надежного пропускания рабочих токов и токов короткого замыкания в замкнутом состоянии.

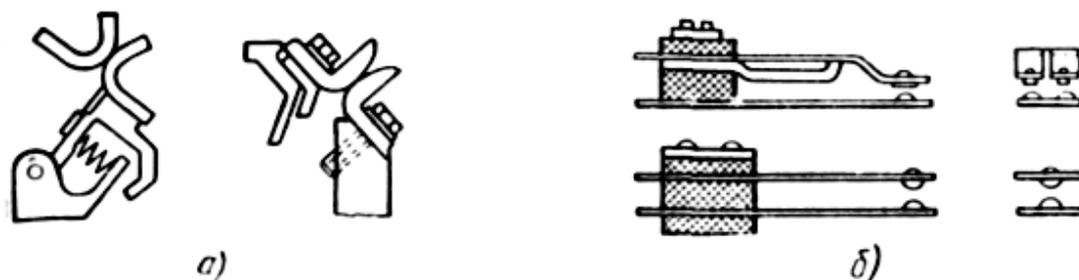


Рис. 7.1. Некоторые типы коммутирующих контактов:
а – контакты контактора; б – релейные контакты на плоских пружинах

Часто функции контактов совмещаются: они исполняют роль и токоведущих, и дугогасительных контактов.

Некоторые типы коммутационных контактов представлены на рис. 7.1.

Как ни тщательно обработаны поверхности соприкосновения контактов, электрический ток проходит между ними только в отдельных точках, в которых эти поверхности касаются, так как получить абсолютно гладкую поверхность практически невозможно. Примерная картина соприкосновения контактов показана на рис. 7.2. Благодаря нажатию P одного контакта на другой вершины выступов деформируются и образуются площадки действительного касания контактов. Рассмотрим процесс перехода тока из одного контакта в другой при касании двух цилиндрических контактов по торцам.

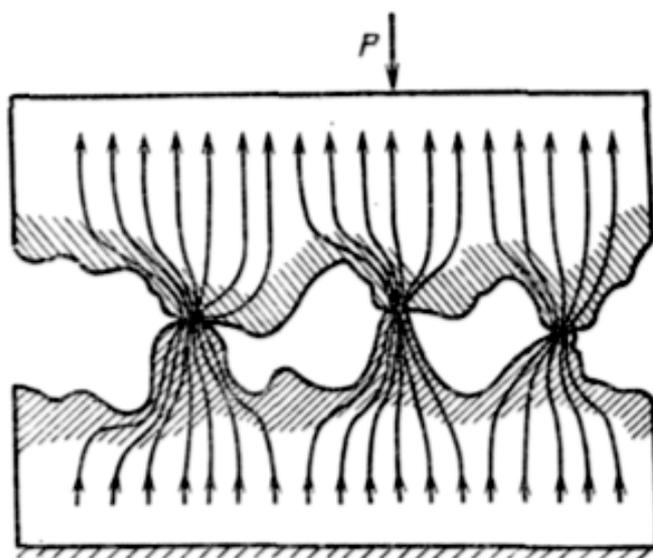


Рис. 7.2. Соприкосновение поверхностей контактов

В результате стягивания линий тока к площадке касания их длина увеличивается, а сечение проводника, через которое фактически проходит ток, уменьшается, что вызывает увеличение сопротивления. Сопротивление в области площади касания, обусловленное явлениями стягивания линий тока, называется переходным сопротивлением стягивания контакта.

Таким образом, переходное сопротивление, обусловленное стягиванием линий тока, пропорционально удельному сопротивлению материала контакта, корню квадратному из временного сопротивления на смятие этого материала и обратно пропорционально корню квадратному из силы контактного нажатия. Одноточечный контакт применяется в основном только при малых токах (до 20 А). При больших токах (100 А и более) применяется многоточечный контакт. В многоточечном контакте ток проходит через несколько контактных переходов, соединенных параллельно. Поэтому его переходное сопротивление при неизменном нажатии меньше, чем у одноточечного контакта. Однако нажатие в каждой контактной площадке уменьшается. Количество контактных переходов увеличивается с ростом нажатия по весьма сложному закону.

Сопротивление зависит и от обработки поверхности. При шли-

фовке поверхность выступов более пологая с большой площадью. Смятие таких выступов возможно только при больших силах нажатия. Поэтому сопротивление шлифованных контактов выше, чем сопротивление контактов с более грубой обработкой.

Переходное сопротивление контактов обусловлено не только явлением стягивания линий тока. Контактующие поверхности покрыты адсорбированными молекулами газа, в котором располагались контакты до их замыкания. Очень часто молекулы газа вступают в химическую реакцию с материалом контактов, в результате чего на их поверхности могут возникнуть пленки с высоким удельным сопротивлением.

МАТЕРИАЛЫ КОНТАКТОВ

К материалам контактов современных электрических аппаратов предъявляются следующие требования:

- 1) высокие электрическая проводимость и теплопроводность;
- 2) высокая коррозионная стойкость в воздушной и других средах;
- 3) стойкость против образования пленок с высоким электрическим сопротивлением;
- 4) малая твердость для уменьшения необходимой силы нажатия;
- 5) высокая твердость для уменьшения механического износа при частых включениях и отключениях;
- 6) малая эрозия;
- 7) высокая дугостойкость (температура плавления);
- 8) высокие значения тока и напряжения, необходимые для дугообразования;
- 9) простота обработки, низкая стоимость.

Свойства некоторых контактных материалов рассмотрены ниже.

Медь. Положительные свойства: высокие удельная электрическая проводимость и теплопроводность, достаточная твердость, что позволяет применять при частых включениях и отключениях, простота технологии, низкая стоимость.

Недостатки: достаточно низкая температура плавления, при работе на воздухе покрывается слоем прочных оксидов, имеющих высокое сопротивление, требует довольно больших сил нажатия. Для защиты меди от окисления поверхность контактов покрывается электролитическим способом слоем серебра толщиной $20 \div 30$ мкм. В контактах на большие токи иногда ставятся серебряные пластинки (в аппаратах, включаемых относительно редко). Применяется как материал для плоских и круглых шин, контактов аппаратов высокого напряжения, контакторов, автоматов и др. Вследствие низкой дугоустойчивости нежелательно применение в аппаратах, отключающих мощную дугу и имеющих большое число включений в час.

В контактах, не имеющих взаимного скольжения, из-за пленки оксидов применение меди не рекомендуется.

Серебро. Положительные свойства: высокие электрическая проводимость и теплопроводность, пленка оксида серебра имеет малую механическую прочность и быстро разрушается при нагреве контактной точки. Контакт серебра устойчив благодаря малому напряжению на смятие. Для работы достаточны малые нажатия (применяется при нажатиях 0,05 Н и выше). Устойчивость контакта, малое переходное сопротивление являются характерными свойствами серебра.

Недостатки: малая дугоустойчивость и недостаточная твердость препятствуют использованию его при наличии мощной дуги и частых включениях и отключениях.

Применяется в реле и контакторах при токах до 20 А. При больших токах вплоть до 10 кА серебро используется как материал для главных контактов, работающих без дуги.

Алюминий. Положительные свойства: достаточно высокие электрическая проводимость и теплопроводность. Благодаря малой плотности токоведущая часть круглого сечения из алюминия на такой же ток, как и медный проводник, имеет почти на 48% меньшую массу. Это позволяет уменьшить массу аппарата.

Недостатки:

1) образование на воздухе и в активных средах пленок с высокой

механической прочностью и высоким сопротивлением;

2) низкая дугостойкость (температура плавления значительно меньше, чем у меди и серебра);

3) малая механическая прочность;

4) из-за наличия в окружающем воздухе влаги и оксидов медный и алюминиевый контакты образуют своеобразный гальванический элемент. Под действием э.д.с. этого элемента происходит электрохимическое разрушение контактов (электрохимическая коррозия). В связи с этим при соединении с медью алюминий должен покрываться тонким слоем меди электролитическим путем либо оба металла необходимо покрывать серебром. Алюминий и его сплавы (дюраль, силумин) применяются, главным образом, как материалы для шин и конструктивных деталей аппаратов.

Вольфрам. Положительные свойства: высокая дугостойкость, большая стойкость против эрозии, сваривания. Высокая твердость вольфрама позволяет применять его при частых включениях и отключениях.

Недостатки: высокое удельное сопротивление, малая теплопроводность, образование прочных оксидных и сульфидных пленок. В связи с образованием пленок и их высокой механической прочностью вольфрамовые контакты требуют большого нажатия.

В реле на малые токи с небольшим нажатием применяются стойкие против коррозии материалы – золото, платина, палладий и их сплавы.

Металлокерамические материалы. Рассмотрение свойств чистых металлов показывает, что ни один из них не удовлетворяет полностью всем требованиям, предъявляемым к материалу контактов.

Основные необходимые свойства контактного материала – высокая электрическая проводимость и дугостойкость – не могут быть получены за счет сплавов таких материалов, как серебро и вольфрам, медь и вольфрам, так как они не образуют сплавов. Материалы, обладающие необходимыми свойствами, получают методом порошковой металлургии (металлокерамики). Полученные таким методом материалы сохраняют физические свойства входящих в них металлов. Дугостойкость металлокерамики обеспечивается такими компонентами,

как вольфрам, молибден. Низкое переходное сопротивление контакта достигается использованием в качестве второго компонента серебра или меди. Чем больше содержание вольфрама, тем выше дугостойкость, механическая прочность и меньше возможность приваривания металлокерамических контактов. Но соответственно растет переходное сопротивление контактов и уменьшается их теплопроводность. Обычно металлокерамика с содержанием вольфрама выше 50% применяется для аппаратов защиты на большие токи КЗ.

Композиции из тонкоизмельченных порошков с диаметром зерна менее 10 мкм имеют мелкодисперсную структуру и обладают большой механической прочностью. Их износостойкость в 1,5-2 раза выше, чем у материалов не мелкодисперсного типа.

Для контактов аппаратов высокого напряжения наиболее распространена металлокерамика КМК-А60, КМК-А61, КМК-Б20, КМК-Б21.

В аппаратах низкого напряжения чаще всего применяется металлокерамика КМК-А10 из серебра и оксида кадмия CdO . Отличительной особенностью этого материала является диссоциация CdO на пары кадмия и кислород. Выделяющийся газ заставляет дугу быстро перемещаться по поверхности контакта, что значительно снижает температуру контакта и способствует деионизации дуги. Металлокерамика КМК-А20, состоящая из серебра и 10%-ного оксида меди, обладает большей износостойкостью, чем КМК-А10.

Серебряно-никелевые металлокерамики хорошо обрабатываются, обладают высокой стойкостью против электрического износа. Контакты из этих материалов обеспечивают низкое и устойчивое переходное сопротивление, но более подвержены привариванию, чем контакты КМК-А60, КМК-Б20, КМК-А10.

Серебряно-графитовые и медно-графитовые контакты благодаря высокой устойчивости против сваривания применяются как дугогасительные. Применение металлокерамики увеличивает стоимость аппаратуры, однако в эксплуатации эти затраты окупаются за счет увеличения срока службы аппарата и повышения его надежности.

КОНСТРУКЦИЯ ТВЕРДОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

а) Неподвижные разборные и неразборные контакты. Такие контакты служат для соединения неподвижных токоведущих деталей шин, кабелей и проводов. Эти детали могут находиться как внутри электрического аппарата, так и вне его. В последнем случае они служат для присоединения аппарата к источнику энергии или к нагрузке. Контакты соединяются либо с помощью болтов (разборные соединения), либо с помощью горячей или холодной сварки.

При болтовом соединении медные шины перед сборкой тщательно зачищаются от оксидов и смазываются техническим вазелином. После сборки места стыков между шинами покрываются влагостойким лаком или краской. При этом уменьшается переходное сопротивление и повышается его стабильность во времени.

Покрытие соприкасающихся поверхностей контактов оловом (лужение) несколько увеличивает начальное переходное сопротивление, но благодаря пластичности олова увеличивает количество площадок смятия, и переходное сопротивление становится более стабильным. Для токоведущих деталей, от которых требуется повышенная надежность при больших номинальных токах, рекомендуется серебрение соприкасающихся поверхностей. Описанные разборные контактные соединения могут быть разобраны при ремонте и монтаже и имеют малое переходное сопротивление.

Рекомендуемые давления одной шины на другую (10^4 Па) при болтовом соединении приведены ниже.

Материалы соединения:

Медь луженая	500-1000;
Медь, латунь, бронза нелуженые	600-1200;
Алюминий	2500.

Момент при затяжке болтов контролируется специальным тарированным моментным ключом. Болтовые соединения могут оказаться недостаточно надежными, особенно при алюминиевых контактах. Поэтому в настоящее время алюминиевые токоведущие детали со-

единяются с помощью холодной или горячей (термитной) сварки и представляют после этого неразборный контакт.

В болтовом шинном соединении при КЗ токоведущий проводник нагревается до температуры $200 \div 300$ °С.

Стягивающие стальные болты нагреваются в основном за счет теплопроводности, так как ток через болты практически не проходит. Температура болтов обычно не превосходит 20% температуры шин. Температурный коэффициент расширения у меди и алюминия значительно выше, чем у стали, поэтому шины, увеличиваясь по толщине больше, чем удлиняются болты, растягивают их. При этом деформация болтов может перейти за пределы упругости. Тогда после отключения цепи и остывания контакта из-за вытягивания болтов нажатие в контактах уменьшится, что приведет к увеличению сопротивления, сильному нагреву и последующему разрушению.

Для того чтобы избежать пластической деформации шин, ставятся соответствующие шайбы. Вследствие малой прочности алюминиевых шин может произойти пластическая их деформация, что приведет к порче контакта. Поэтому для стабильности алюминиевого контакта необходимо либо производить предварительный обжим, уплотнение шин, либо ставить под гайки пружинящие шайбы или специальные пружины, которые ограничивают деформации элементов контактов.

б) Подвижные неразмыкающиеся контактные соединения. Такие соединения используются либо для передачи тока с подвижного контакта на неподвижный, либо при небольшом перемещении неподвижного контакта под действием подвижного.

Наиболее простым соединением такого типа является гибкая связь (рис. 7.3). Неподвижный контакт 1 крепится к каркасу аппарата на изоляционной подкладке. Подвижный контакт 2 вращается относительно точки 0, расположенной на контактном рычаге 4. Этот рычаг изолирован от вала 5, на который действует электромагнит контактора. Гибкая связь 6 соединяет подвижный контакт 2 с выводом аппарата. Контактное нажатие создается пружиной 3. Для получения необходимой эластичности гибкая связь изготавливается из медной

ленты толщиной $0,1 \cdot 10^{-3}$ м и менее или из многожильного жгута, сплетенного из медных жил ($0,1 \cdot 10^{-3}$ м и менее). При наличии резких перегибов гибкая связь быстро разрушается.

При больших ходах подвижных контактов длина гибкой связи получается значительной, а ее надежность уменьшается. Поэтому она применяется при перемещениях подвижного элемента не более 0,25 м.

При больших ходах и больших номинальных токах применяются контактные соединения в виде скользящих и роликовых токосъемов. Принцип действия токосъема ясен из рис. 7.4 и 7.5. Подвижный контакт 1 скользящего токосъема (см. рис. 7.4) выполнен в виде стержня круглого сечения. Цилиндрическая обойма 2 соединяется с неподвижным выводом аппарата. Соединение контакта 1 и обоймы 2 осуществляется пальцами (ламелями) 3. Контактное нажатие создается пружинами 4. Подвижный контакт имеет возможность перемещаться поступательно. Неподвижный контакт имеет поверхность касания в виде плоскости, подвижный – в виде цилиндрической поверхности. Контактное касание осуществляется по линии, отчего контакт называется линейным.

Недостатком скользящего токосъема является большая сила трения, которая требует значительной мощности приводного механизма. Сила трения уменьшается при роликовом контакте (рис. 7.5). Подвижный контакт 1 роликового токосъема (см. рис. 7.5) выполнен в виде стержня круглого сечения и имеет поступательное движение. Токосъемные стержни 2 также имеют круглое сечение и соединены с выводом аппарата. Соединение стержня 1 и стержней 2 осуществляется с помощью конусных роликов 3, которые катятся по поверхности стержней 1 и 2. Контактное нажатие создается пружинами 4.

Число роликов зависит от номинального тока и тока КЗ. Этот контакт для своего перемещения требует небольших усилий и широко применяется в современной аппаратуре высокого напряжения.

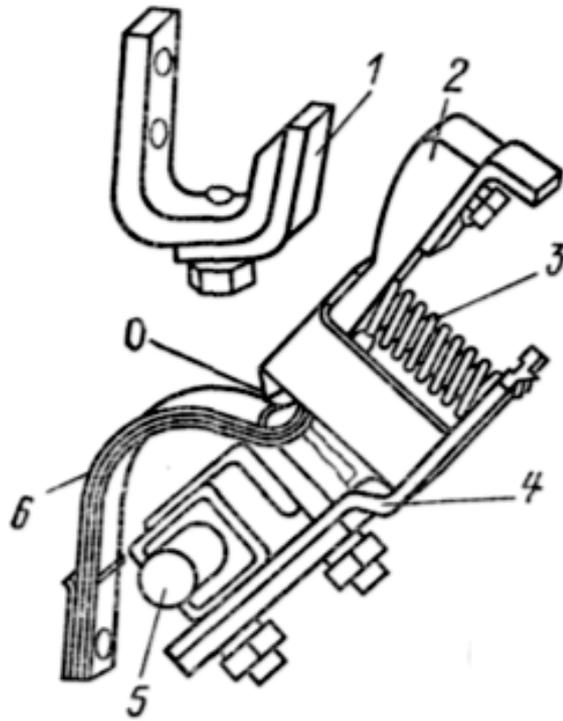


Рис. 7.3. Передача тока с подвижного контакта на вывод аппарата с помощью гибкой связи

в) Разрывные контакты. Контакты многих аппаратов разрывают цепь с током, большим, чем минимальный ток дугообразования. Возникающая электрическая дуга приводит к быстрому износу контактов. Для надежного гашения дуги, образующейся при отключении, необходимо определенное расстояние между неподвижным и подвижным контактами, которое выбирается с запасом. Расстояние между неподвижным и подвижным контактами в отключенном состоянии аппарата называется зазором контактов (рис. 7.6, 7.7). Конструкция разрывных контактов определяется значениями номинального тока, номинального напряжения, тока КЗ, режимом работы, назначением аппарата и рассмотрена в разделах, посвященных устройству различных аппаратов. Здесь же рассмотрим только некоторые общие вопросы.

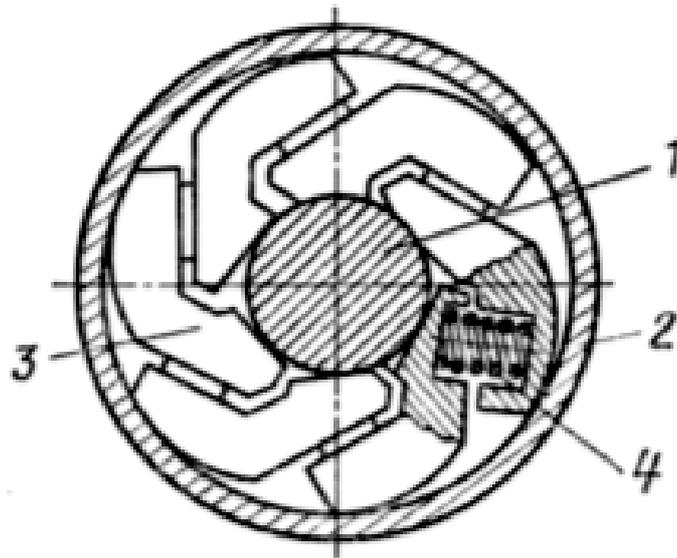


Рис. 7.4. Скользящий токосъемный розеточный контакт

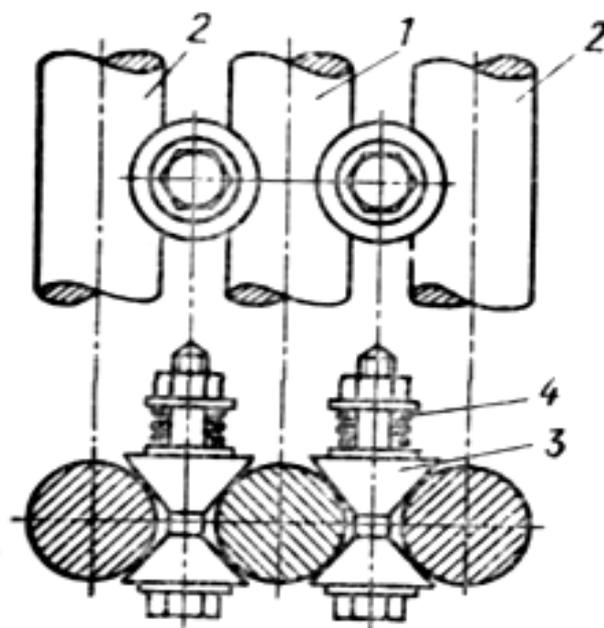


Рис. 7.5. Роликовый токосъемный контакт

Число площадок касания и стабильность переходного сопротивления зависят от конструкции крепления подвижного и неподвижного контактов. Подвижные контакты, имеющие возможность устанавливаться в положение с максимальным числом контактных площадок, называются самоустанавливающимися. Контактный узел с самоустанавливающимся контактом представлен на рис. 7.6. Неподвижные контакты 1 и подвижный мостиковый контакт 2 в месте касания имеют сферические (или цилиндрические) напайки 3, выполненные

из серебра или металлокерамики. Контактное нажатие создается пружиной 4. После касания контактов скоба 5, связанная с приводом аппарата, продолжает свое движение вверх на величину хода, равную провалу δ . Применительно к конструкциям, показанным на рис. 7.6 и 7.7, провалом называется расстояние, на которое переместится подвижный контакт, если убрать неподвижный.

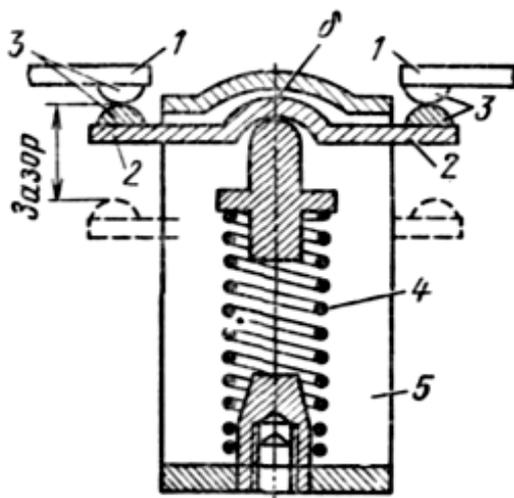


Рис. 7.6. Контактный узел с самоустанавливающимся контактом

На рис. 7.7 показана работа контактной системы, широко применяемой в контакторах с медными контактами.

Для наглядности точки начального и конечного касания обозначены буквами a и b . При включении контактный рычаг 4 вращается электромагнитом вокруг центра O_2 , а точка O_1 вращения контактной скобы 3 перемещается по радиусу O_2O_1 .

Касание пальцевых контактов 1 и 2 происходит в точках a (рис. 7.7, б). При дальнейшем перемещении O_x точка касания переходит в точку b (рис. 7.7, в). При этом происходит перекачивание контакта 2 по контакту 1 с небольшим проскальзыванием, за счет чего пленка оксида на них стирается.

При включении контактов, отключавших дугу, из-за шероховатости поверхности касания появляется дополнительная вибрация контактов. Для уменьшения вибрации проскальзывание должно быть небольшим. При отключении дуга загорается между точками $a-a$, что предохраняет от оплавления точки $b-b$, в которых контакты касаются уже

во включенном положении. Таким образом, контакт разделяется на две части: в одной происходит гашение дуги, в другой ток проводится длительно. Поскольку для контактов по рис. 7.7 непосредственный контроль провала затруднен, о нем судят по зазору δ' между рычагом 4 и контактной скобой 3. Контактное нажатие создается пружиной 5.

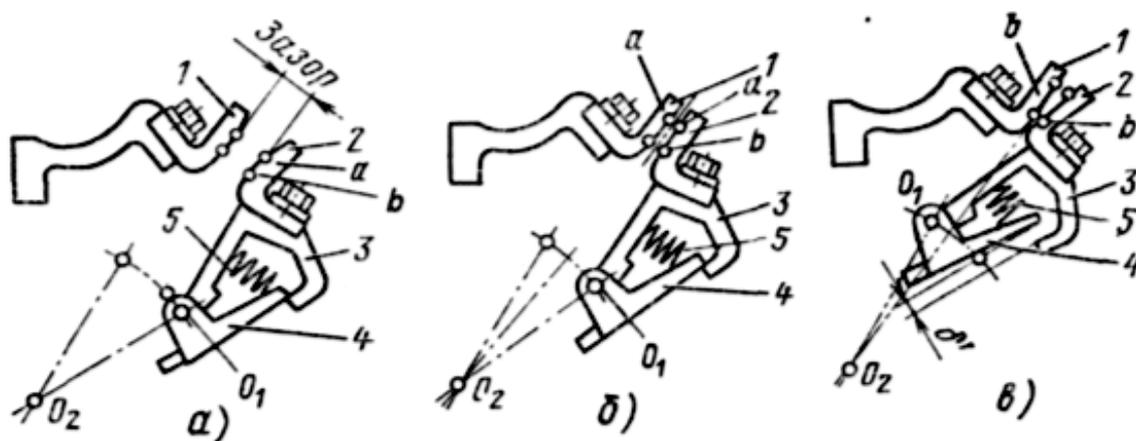


Рис. 7.7. Контактный узел с перекатыванием подвижного контакта

Во всех без исключения аппаратах имеется провал контактов, который обеспечивает их необходимое нажатие. Вследствие обгорания и износа контактов в эксплуатации провал уменьшается, что приводит к уменьшению контактного нажатия и росту переходного сопротивления. Поэтому при эксплуатации провал контактов должен контролироваться и находиться в пределах, требуемых заводом-изготовителем. Особенно это относится к аппаратам, работающим в режиме частых включений и отключений (контакторы), где износ контактов интенсивен. Допустимое уменьшение провала обычно составляет 50% начального значения.

В торцевом мостиковом контакте (см. рис. 7.6) провал обычно составляет 3-5 мм. В мощных выключателях высокого напряжения он увеличивается до 8-10 мм.

В высоковольтных масляных выключателях широко применяется розеточная система (рис. 7.8). Неподвижный контакт состоит из пальцев (ламелей) 1, расположенных по окружности. Для уменьшения обгорания концы ламелей снабжены металлокерамическими наконечниками 2. Контактное нажатие создается пружинами 3. Ла-

мели с помощью гибких связей 5 соединяются с медным цоколем 4. Параллельное соединение шести ламелей снижает переходное сопротивление контакта и облегчает работу контакта при токах КЗ, так как через ламель протекает примерно 1/6 полного тока контакта. Контактное нажатие обратно пропорционально квадрату числа ламелей. Подвижный контакт выполнен в виде стержня круглого сечения, движущегося поступательно. Конец стержня снабжен металлокерамическим наконечником.

Для главных контактов применяется щеточная система (рис. 7.9). Неподвижные контакты 1 выполняются в виде массивных медных призм, часто покрываемых серебром. Подвижные контакты выполнены в виде пакета эластичных медных пластин 2. Большое количество пластин создает многоточечный контакт с малым переходным сопротивлением. При нажатии на подвижный контакт происходит деформация пластин, скольжение линии касания по поверхности неподвижного контакта и разрушение пленки оксидов.

Широкое применение получили пальцевые самоустанавливающиеся контакты (рис. 7.10). Неподвижным контактом являются пальцы (ламели) 1, выполняемые из меди. Пальцы крепятся к выводу 2 гибкими связями 3. Нажатие контактов создается плоскими пружинами 4. Для получения наибольшего числа площадок касания пружина 4 действует на контакт 1 через сферическую поверхность заклепки 5 (самоустанавливающийся контакт).

Если не имеется возможности подвижному контакту самоустанавливаться, то такой контакт называется несамоустанавливающимся (пружина 4 жестко соединена с контактом 1). Подвижный контакт выполнен в виде латунной призмы 6.

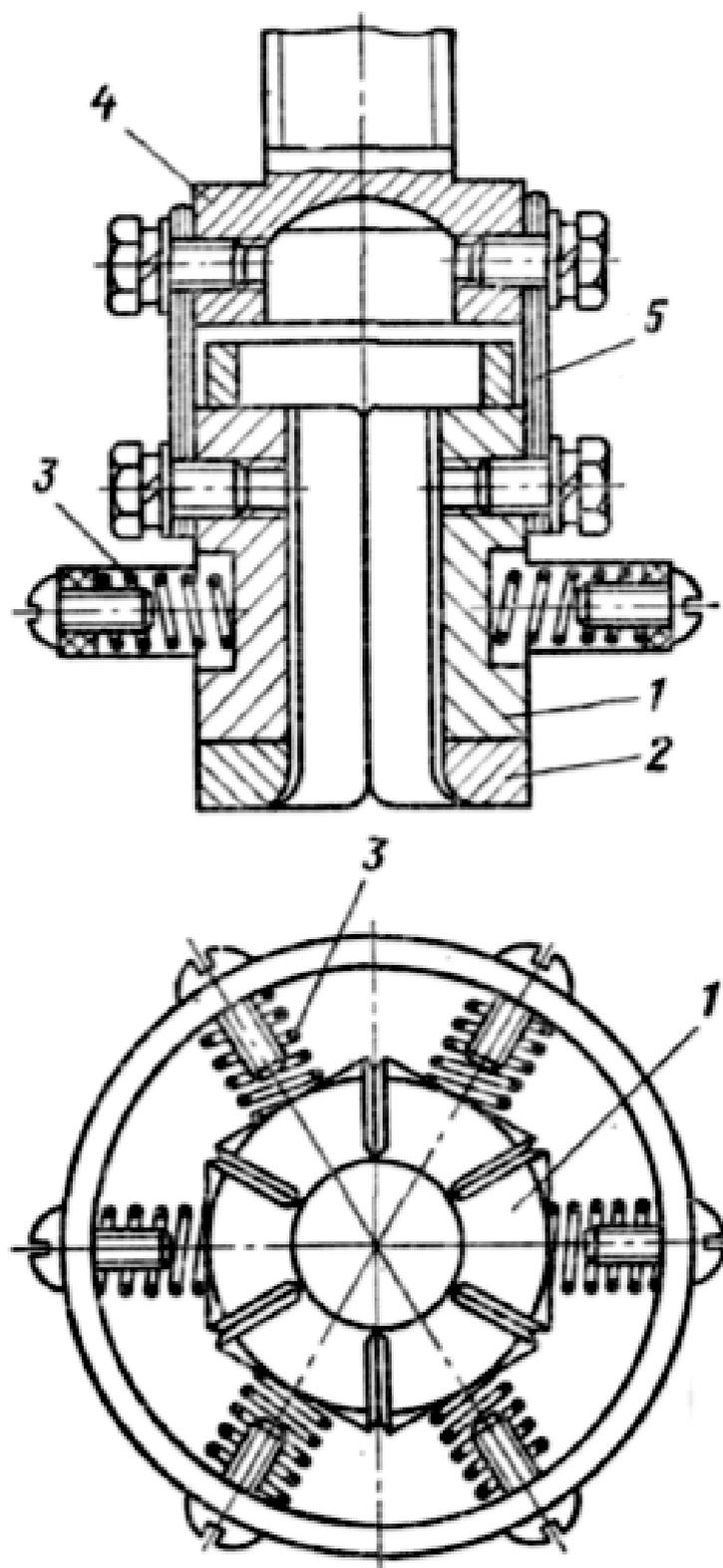


Рис. 7.8. неподвижный розеточный контакт

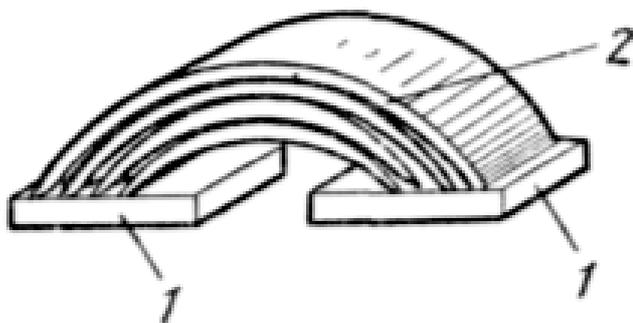


Рис. 7.9. Щеточные контакты

На рис. 7.11 показана двухступенчатая контактная система с главными 1-1 и дугогасительными 2-2' контактами. Главные контакты выполняются из меди, а поверхности их соприкосновения – из серебра, нанесенного электролитически (слой 20 мкм), или в виде припаянных пластин. Дугогасительные контакты выполняются из меди и имеют наконечники из дугостойкого материала – вольфрама или металлокерамики.

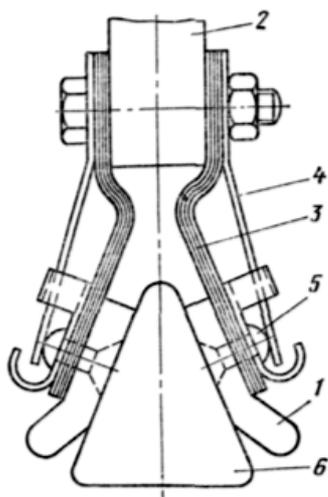


Рис. 7.10. Пальцевый самоустанавливающийся контакт

Ввиду того, что переходное сопротивление цепи главных контактов значительно меньше, чем дугогасительных, через них проходит $70 \div 80\%$ длительного тока. При отключении вначале расходятся главные контакты и весь ток цепи замыкается по дугогасительным контактам.

Дугогасительные контакты 2-2' расходятся в тот момент, когда расстояние между главными контактами достаточно, чтобы выдержать наибольшее напряжение, возникающее в процессе гашения дуги на дугогасительных контактах.

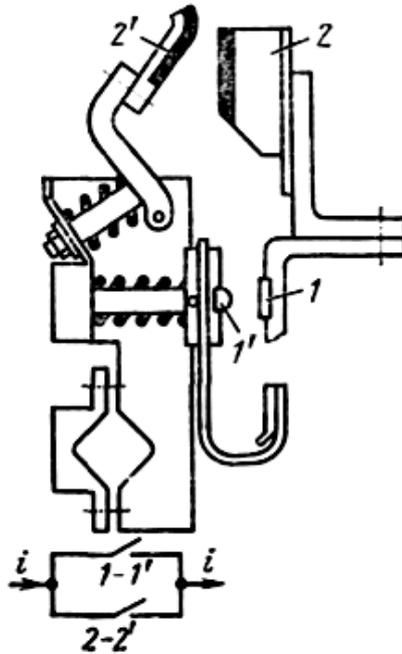


Рис. 7.11. Двухступенчатая контактная система

Необходимо отметить, что при отключении больших токов на главных контактах может возникнуть дуга. Дело в том, что после размыкания главных контактов весь ток цепи начинает проходить через дугогасительную систему и на главных контактах появляется напряжение. Допустим, что дугогасительная система имеет сопротивление R_2 и индуктивность L_2 , а скорость нарастания тока в этой цепи di_2/dt . Тогда напряжение на главных контактах может оказаться достаточным для пробоя промежутка между ними. Для уменьшения обгорания главных контактов необходимо уменьшать индуктивность L .

При включении двухступенчатой системы вначале замыкаются дугогасительные контакты, а затем главные, что обеспечивает отсутствие дуги и оплавления серебряных поверхностей главных контактов. Ввиду своей сложности двухступенчатые системы применяются только при очень больших токах (более 2000 А) в автоматах и выключателях высокого напряжения. Во всех остальных случаях надежная работа контактов обеспечивается выбором их материала и конструкции при использовании одноступенчатой системы.

В заключение отметим, что в настоящее время начинают широко применять электрические аппараты с герметизированными контактами и контактами, работающими в глубоком вакууме.

ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ

Наиболее характерные недостатки твердометаллических контактов следующие:

1. С ростом длительного номинального тока возрастают необходимое значение контактного нажатия, габариты и масса контактов. При токах 10 кА и выше резко увеличиваются габариты и масса аппарата в целом.

2. Эрозия контактов ограничивает износостойкость аппарата.

3. Окисление поверхности и возможность приваривания контактов понижают надежность аппарата. При больших токах КЗ контактные нажатия достигают больших значений, что увеличивает необходимую мощность привода, габариты и массу аппарата.

Рассмотрим принцип действия контактора с жидкометаллическим контактом (ЖМК) (рис. 7.12).

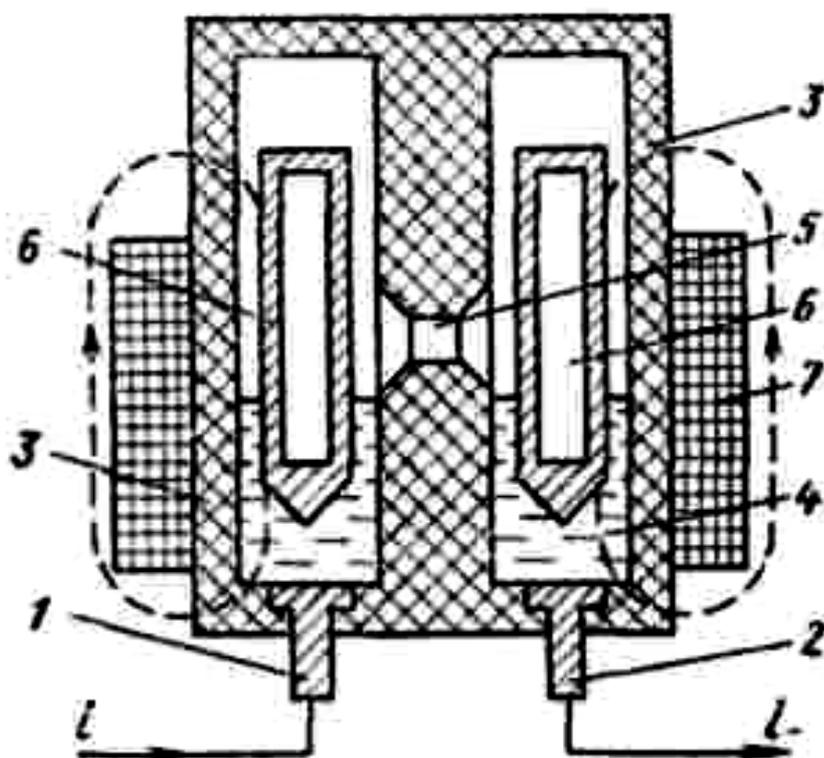


Рис. 7.12. Контактор с жидкометаллическим контактом

Внешняя цепь подключается к электродам 1 и 2. Корпус 3 выполнен из электроизоляционного материала. Полости корпуса заполнены жидким металлом 4 и соединяются между собой отверстием 5.

Внутри полостей корпуса плавают пустотелые ферромагнитные цилиндры 6. При подаче напряжения на катушку 7 цилиндры 6 опускаются вниз. Жидкий металл поднимается и через отверстие 5 соединяет электроды 1 и 2, контактор включается.

По сравнению с твердометаллическими жидкометаллические контакты обладают следующими преимуществами:

1. Малое переходное сопротивление и высокие допустимые плотности тока на поверхности раздела «жидкий металл – электрод» (до 120 А/мм²), что позволяет резко сократить габаритные размеры контактного узла и контактное нажатие, особенно при больших токах.

2. Отсутствие вибрации, приваривания, залипания и окисления контактов при их коммутации.

3. Высокая механическая и электрическая износостойкость ЖМК, что позволяет создавать аппараты с большим сроком службы.

4. Возможность разработки коммутационных аппаратов на новом принципе (автоматический восстанавливающийся предохранитель и др.) благодаря свойствам текучести жидкого металла.

5. Возможность работы ЖМК при высоких внешних давлениях, высоких температурах, в глубоком вакууме.

К электрическим аппаратам обычно предъявляется требование сохранять работоспособность в интервале температур -40...+40 °С. Очевидно, что жидкий металл должен сохранять свое состояние в указанном интервале. Из известных материалов только ртуть находится в жидком виде при температуре ниже 0 °С и может быть в чистом виде пригодна для ЖМК. Высокая токсичность паров ртути существенно осложняет технологию ее применения.

В ЖМК перспективно применение диэлектрического или металлокерамического твердого каркаса, пропитанного жидким металлом.

ГЕРМЕТИЧНЫЕ КОНТАКТЫ (ГЕРКОНЫ)

Наименее надежным узлом электромагнитных реле является контактная система. Электрическая дуга или искра, образующиеся при

размыкании и замыкании контактов, приводят к их быстрому разрушению. Этому также способствуют окислительные процессы и покрытие контактных поверхностей слоем пыли, влаги, грязи. Существенным недостатком электромагнитных реле является и наличие трущихся механических деталей, износ которых также сказывается на их работоспособности. Попытки разместить контакты и электромагнитный механизм в герметизированном объеме с инертным газом не приводят к положительным результатам из-за больших технологических и конструктивных трудностей, а также из-за того, что контакты при этом не защищаются от воздействия продуктов износа и старения изоляционных материалов. Другим недостатком электромагнитных реле является их инерционность, обусловленная значительной массой подвижных деталей. Для получения необходимого быстродействия приходится применять специальные схемы форсировки, что приводит к снижению надежности и росту потребляемой мощности.

Перечисленные недостатки электромагнитных реле привели к созданию реле с герметичными магнитоуправляемыми контактами (герконами).

Простейшее герконовое реле с замыкающим контактом изображено на рис. 7.13, *a*. Контактные сердечники (*КС*) 1 и 2 изготавливаются из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью (пермаллоя) и ввариваются в стеклянный герметичный баллон 3. Баллон заполнен инертным газом – чистым азотом или азотом с небольшой (около 3%) добавкой водорода. Давление газа внутри баллона составляет $(0,4 \div 0,6) \cdot 10^5$ Па. Инертная среда предотвращает окисление *КС*. Баллон устанавливается в обмотке управления 4. При подаче тока в обмотку возникает магнитный поток Φ , который проходит по *КС* 1 и 2 через рабочий зазор δ между ними и замыкается по воздуху вокруг обмотки 4. Поток Φ при прохождении через рабочий зазор создает тяговую электромагнитную силу P_z , которая, преодолевая упругость *КС*, соединяет их между собой. Для улучшения контактирования поверхности касания покрываются тонким слоем ($2 \div 50$ мкм) золота, родия, палладия, рения, серебра и др.

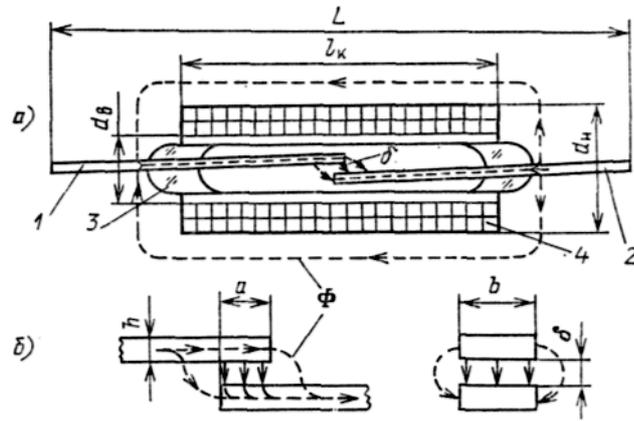


Рис. 7.13. Простейшее герконовое реле с симметричным замыкающим контактом

При отключении обмотки магнитный поток и электромагнитная сила спадают и под действием сил упругости КС размыкаются. Таким образом, в герконовых реле отсутствуют детали, подверженные трению (места крепления якоря в электромагнитных реле), а КС одновременно выполняют функции магнитопровода, токопровода и пружины.

В связи с тем что контакты в герконе управляются магнитным полем, герконы называют магнитоуправляемыми контактами.

На основе герконов могут быть созданы также реле с размыкающими и переключающими контактами. В герконе с переключающим контактом (рис. 7.14, а) неподвижные КС 1, 3 и подвижный 2 размещены в баллоне 4. При появлении сильного магнитного поля КС 2 притягивается к КС 1 и размыкается с КС 3. Один из КС переключающего геркона (например, 2) может быть выполнен из немагнитного материала (рис. 7.14, б). Герконовое реле (рис. 7.14, в) имеет два подвижных КС 1, 2, два неподвижных КС 5, 6 и две обмотки управления 7, 8. При согласном включении обмоток замыкаются КС 1 и 2. При встречном включении обмоток КС 1 замыкается с КС 5, а КС 2 с КС 6. При отсутствии тока в обмотках все КС разомкнуты. Герконовое реле (рис. 7.14, г) имеет переключающий контакт 3 сферической формы. При согласном включении обмоток 7 и 8 контакт 3 притягивается к КС 1 и КС 2 и замыкает их. После отключения обмоток 7 и 8 и при согласном включении обмоток 9 и 10 контакт 3 замыкает КС 5 и КС 6. Так как КС герконов выполняют функции возвратной пружины, им придаются опре-

деленные упругие свойства. Упругость КС обуславливает возможность их вибрации («дребезга») после удара, который сопутствует срабатыванию. Длительность такой вибрации достигает 0,25 мс при общем времени срабатывания $0,5 \div 1$ мс.

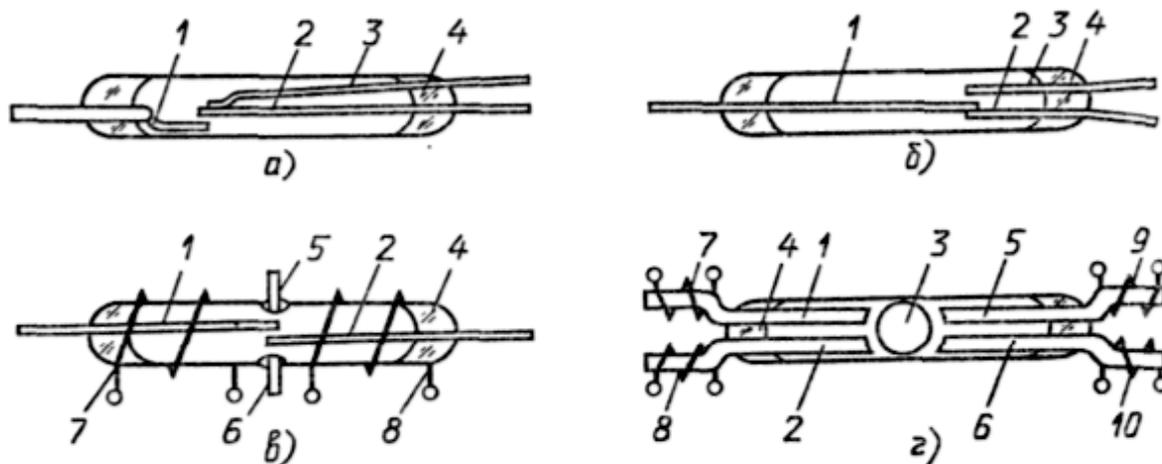


Рис. 7.14. Переключающие герконы

Одним из способов устранения влияния вибраций является использование жидкометаллических контактов. В переключающем герконе (рис. 7.15, а) внутри подвижного КС 1 имеется капиллярный канал, по которому из нижней части баллона 4 поднимается ртуть 5. Ртуть смачивает поверхности касания КС 1 с КС 2 или КС 3. В момент удара контактов при срабатывании возникает их вибрация. Из-за ртутной пленки на контактной поверхности КС 1 вибрация не приводит к разрыву цепи. В конструкции на рис. 7.15, б между КС 2, КС 3 и ртутью 5 находится ферромагнитная изоляционная жидкость 6. При возникновении магнитного поля ферромагнитная жидкость 6 перемещается вниз, в положение, при котором поток будет наибольшим. Ртуть вытесняется вверх и замыкает КС 2 и КС 3. Следует отметить, что жидкометаллический контакт позволяет уменьшить переходное сопротивление и значительно увеличить коммутируемый ток. Наличие ртути удлиняет процесс разрыва контактов, что увеличивает время отключения реле.

Управление герконом можно осуществлять и с помощью постоянного магнита. Если постоянный магнит установлен вблизи геркона,

его магнитный поток замыкается через КС, которые в результате этого находятся в замкнутом состоянии. Использование постоянного магнита совместно с управляющей катушкой позволяет создать герконовое реле с размыкающим контактом.

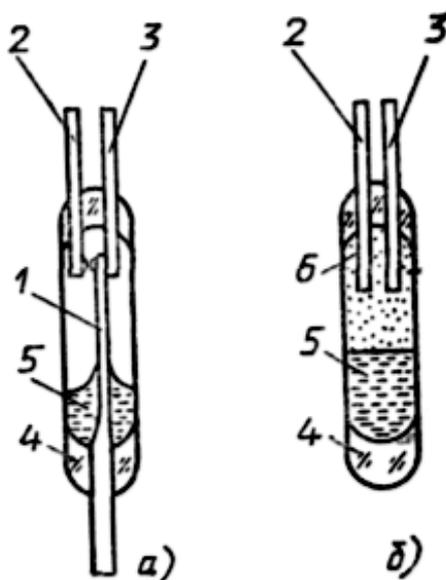


Рис. 7.15. Ртутные герконы

ЛЕКЦИЯ №8

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА, ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ОСНОВЫ ГОРЕНИЯ И ГАШЕНИЯ ДУГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ОТКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ (ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА) ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Большая группа электрических аппаратов представлена коммутационными устройствами, с помощью которых замыкается и размыкается электрическая цепь. Электрический разряд, возникающий при размыкании контактов, приводит к их износу и в значительной степени определяет надежность и долговечность аппарата. Этот разряд в окружающем контакт газе является либо тлеющим разрядом, либо электрической дугой. Тлеющий разряд возникает при отключении тока менее 0,1 А при напряжении на контактах 250 ÷ 300 В. Такой разряд происходит на контактах маломощных реле, а в более мощных аппаратах является переходной фазой к разряду в виде электрической

дуги. Если ток и напряжение в цепи выше определенных значений, то имеет место дуговой разряд, обладающий следующими особенностями:

1. Дуговой разряд имеет место только при относительно больших токах. Минимальный ток дуги для различных материалов для металлов составляет примерно 0,5 А.

2. Температура центральной части дуги очень велика и может достигать $6\ 000 \div 25\ 000$ К.

3. При дуговом разряде плотность тока на катоде чрезвычайно велика и достигает $10^2 \div 10^3$ А/мм².

4. Падение напряжения у катода составляет всего $10 \div 20$ В и практически не зависит от тока.

В дуговом разряде можно различить три характерные области: околокатодную, область столба дуги, околоанодную. В каждой из этих областей процессы ионизации и деионизации протекают по-разному.

а) Околокатодная область.

Занимает весьма небольшое пространство длиной не более 10^{-6} м. Около катода возникает положительный объемный заряд, создаваемый положительными ионами. Между этим положительным объемным зарядом и катодом создается электрическое поле с напряженностью до 10^7 В/м, в котором движутся электроны, вышедшие из катода и создающие электрический ток. Электрическое поле воздействует на электроны, увеличивая их скорость. При соударении такого электрона с нейтральной частицей может произойти ионизация, для чего электрон должен обладать определенной энергией.

Напряжение (разгоняющее напряжение), которое должен пройти электрон для приобретения энергии, необходимой для ионизации, называется *потенциалом ионизации*. Для газов этот потенциал колеблется от 24,58 В (гелий) до 13,3 В (водород). Пары металлов имеют значительно меньший потенциал ионизации. Так, для паров меди он равен 7,7 В.

Положительные ионы, как и электроны, разгоняются электрическим полем, но из-за большой массы скорость их много меньше. При ударе положительного иона о нейтральную частицу меньшая часть энергии передается на ионизацию, так что *ионизация толчком* происходит в основном за счет электронов.

Ввиду малой протяженности околокатодной области электроны не набирают скорости, достаточной для ионизации ударом. Чаще всего после удара атом переходит в *возбужденное состояние* (электрон атома переходит на более удаленную от ядра орбиту). Для ионизации возбужденного атома требуется меньшая энергия. В результате необходимый потенциал ионизации уменьшается. Такая ионизация называется ступенчатой. При ступенчатой ионизации необходим многократный удар электронов по атому: на каждый образующийся положительный ион требуются десятки электронов. Поэтому ток около катода, несмотря на наличие положительных ионов, носит электронный характер.

Образующиеся электроны не создают около катода отрицательного объемного заряда, так как их скорость значительно больше скорости тяжелых положительных ионов. Положительные ионы разгоняются в поле катодного падения напряжения и бомбардируют катод. Благодаря этому температура катода поднимается и достигает точки испарения материала электрода. При высоких температурах появляется термоэлектронная эмиссия катода, которая в сильной степени зависит от температуры электрода. Проведенные исследования также показали, что дуга может существовать только за счет автоэлектронной эмиссии, создаваемой у катода электрическим полем.

б) Область дугового столба. Энергия, приобретенная заряженными частицами в электрическом поле дугового столба, столь мала, что практически ионизация толчком не происходит.

При большой температуре, которая имеет место в области дугового столба, скорость частицы возрастает до значения, при котором удар в нейтральный атом приводит к его ионизации. Такая ионизация называется термической. Основным источником ионов и электронов в столбе дуги является термическая ионизация. Чем меньше масса частицы, тем больше ее скорость движения.

Таким образом, с ростом давления степень ионизации уменьшается. В связи с этим во многих дугогасящих устройствах (ДУ) электрических аппаратов создается повышенное давление газа, что способствует гашению дуги. Очень сильное влияние на ионизацию ока-

зывает температура. Для большого числа двухатомных газов из-за ступенчатой ионизации процесс образования ионов начинается при температурах $6 \cdot 10^3$ К. Пары металла ионизируются значительно легче. Заметная ионизация начинается уже при температурах $3000 \div 4000$ К. Поэтому в ДУ необходимы меры против попадания металлических паров электродов.

в) Энергетический баланс дуги. Процесс ионизации и процесс деионизации в значительной степени определяются температурой дугового промежутка. Последняя зависит от количества тепла, выделяемого в дуге и отводимого от дуги.

Охлаждение дуги происходит за счет излучения, теплопроводности и конвекции.

Для открытой дуги, горящей в воздухе, излучением отдается $15 \div 30\%$ выделяемой в дуге энергии. Для дуги, горящей в закрытом ДУ, доля тепла, отдаваемого лучеиспусканием, меньше.

Отвод тепла за счет теплопроводности газа в значительной степени зависит от его температуры. Так, при температуре 4000 К молекулы водорода диссоциируют на атомы. При этом от дуги отводится большое количество тепла. Внешне этот процесс представляется как резкое увеличение теплопроводности. Теплопроводность газа сильно зависит от его природы. Так, средняя теплопроводность водорода в 17 раз больше, чем воздуха. Благодаря своей высокой теплопроводности при прочих равных условиях водород способствует более быстрому охлаждению столба дуги. Ток, отключаемый в атмосфере водорода, в 7,5 раза больше, чем в воздухе при том же давлении.

При горении дуги в трансформаторном масле последнее разлагается с выделением водорода, что способствует эффективному гашению дуги. В некоторых аппаратах под действием магнитного поля дуга перемещается с большой скоростью относительно воздуха, что приводит к ее охлаждению за счет конвекции. Этот вид теплоотдачи наряду с теплопроводностью является определяющим для процесса гашения.

г) Околоанодная область. Поток электронов из столба дуги устремляется к положительному электроду – аноду. Анод при дуго-

вом разряде не излучает положительных ионов, которые могли бы нейтрализовать электроны. Поэтому вблизи анода создается отрицательный объемный заряд, что и вызывает появление околоанодного падения напряжения и повышение напряженности электрического поля. Околоанодное падение напряжения зависит от температуры анода, его материала и значения тока.

Электроны разгоняются в поле, образованном отрицательным объемным зарядом и анодом. Энергия, приобретенная электронами, отдается аноду. Благодаря большой энергии электронов анод нагревается до очень высокой температуры, которая, как правило, выше температуры катода. Мощный поток электронов выбивает из анода электроны, которые также участвуют в создании отрицательного объемного заряда.

Высокая температура анода и околоанодная область не оказывают существенного влияния на возникновение и условия существования дугового разряда. Роль анода сводится к приему электронного потока из дугового столба.

Для дуги большого тока околоанодное падение напряжения столь мало, что им можно пренебречь.

Распределение напряжения, напряженности электрического поля (градиента) и производной, пропорциональной объемному заряду a в дуге, представлено на рис. 8.1.

Падение напряжения у катода составляет $10 \div 20$ В и зависит от материала катода и свойств газа, в котором горит дуга. Околокатодное падение напряжения несколько меньше потенциала ионизации газа из-за наличия около катода его паров, у которых потенциал ионизации значительно ниже.

Околоанодное падение напряжения составляет $5 \div 10$ В. При больших токах околоанодное напряжение уменьшается, в то время как околокатодное напряжение остается постоянным.

В некоторых аппаратах низкого напряжения длина дуги невелика. Падение напряжения на столбе дуги мало по сравнению с суммой падения напряжения у катода и анода. Такие дуги называются короткими. Условия гашения короткой дуги в значительной степени определяются процессами, происходящими у электродов, и условиями их охлаждения.

В аппаратах высокого напряжения падение напряжения на столбе дуги значительно больше околоэлектродных, и последними можно пренебречь. Условия существования таких дуг, называемых длинными, определяются процессами в столбе дуги.

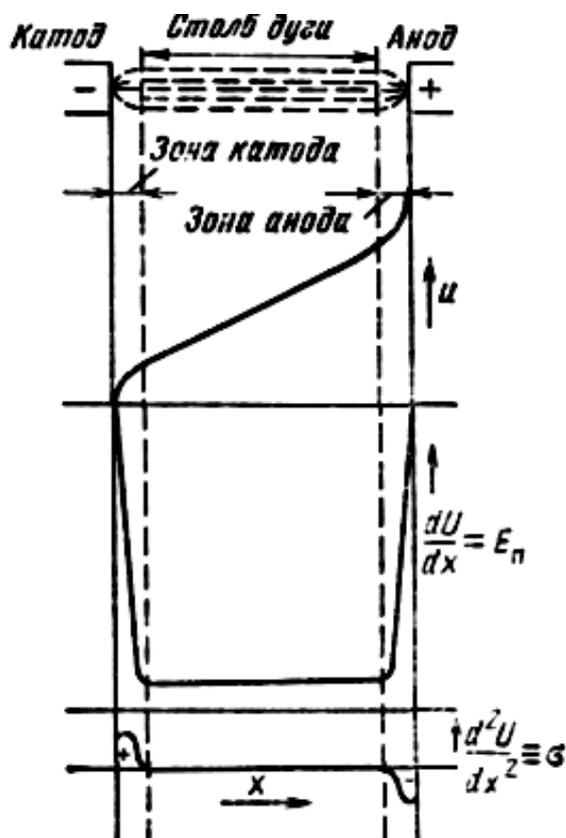


Рис. 8.1. Распределение напряжения, напряженности электрического поля и объемных зарядов в электрической дуге

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДУГОВОГО РАЗРЯДА ПРИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

Явление прохождения электрического тока через газ, называемое газовым разрядом, может наблюдаться практически при любых значениях тока. На рис. 8.2 изображена вольтамперная характеристика последовательных стадий газового разряда в воздухе при атмосферных условиях.

При несамостоятельном разряде (зона $O - B$) ток поддерживается за счет внешних ионизаторов (космические лучи, рентгеновские лучи и др.); при самостоятельном разряде (зона $B - E$) носители электричества возникают в газоразрядном канале непосредственно за счет ионизирующих факторов, присущих газоразрядному каналу.

Между точками $O - A$ зависимость $i = f(t)$ следует закону степени трех вторых.

В стадии «насыщения» ($A - B$) все заряды, содержащиеся в промежутке, достигают электродов. Но так как никакой дополнительной ионизации здесь не возникает, то значительное увеличение напряжения не ведет к существенному изменению тока.

За точкой B напряжение становится достаточным для возникновения ударной ионизации (под действием сил электрического поля), начинается самостоятельная форма разряда.

Участок $B - C$ соответствует стадии пробоя, или «таунсендовской» стадии (по имени Таунсенда, разработавшего математическую теорию этой стадии).

Наиболее характерные признаки стадии пробоя: ударная ионизация, незначительные пространственные заряды, лавинообразный процесс образования электронов (и ионов). При больших расстояниях между электродами и достаточно высокой плотности газа таунсендовская стадия может перейти в так называемую стримерную стадию пробоя.

Когда мощность источника становится достаточно большой, способной вызвать в цепи токи порядка мА, стадия пробоя переходит в стадию тлеющего разряда ($C - D$). Для тлеющего разряда характерна ударная ионизация, но уже в условиях резко неравномерного поля, когда основное падение напряжения приходится на слой у катода. Основной столб разряда в данном случае представляет собой как бы проводник тока, убыль электронов в котором восполняется за счет столкновения наиболее «быстрых» электронов с атомами газа. Для тлеющего разряда также характерно постоянство произведения давления газа на длину околочатодного слоя. При достаточно большом токе тлеющий разряд переходит в дуговой (переходная стадия $D - E$).

Дуговой разряд в газовой среде относительно высокой плотности (при атмосферном и более высоком давлении) обладает следующими характерными чертами:

- 1) ясно очерчена граница между дуговым столбом и окружающей

средой;

2) высокая плотность тока в дуговом столбе (десятки – сотни А/мм²);

3) высокая температура газа внутри дугового столба, достигающая 5000 ÷ 10000 К и более высоких значений. В этих условиях преобладает термическая ионизация газа (см. ниже). При нормальных условиях дуговая стадия разряда (и термическая ионизация) в воздухе практически прекращаются при температурах около 3000 К;

4) высокая плотность тока на катоде и малое падение напряжения у катода.

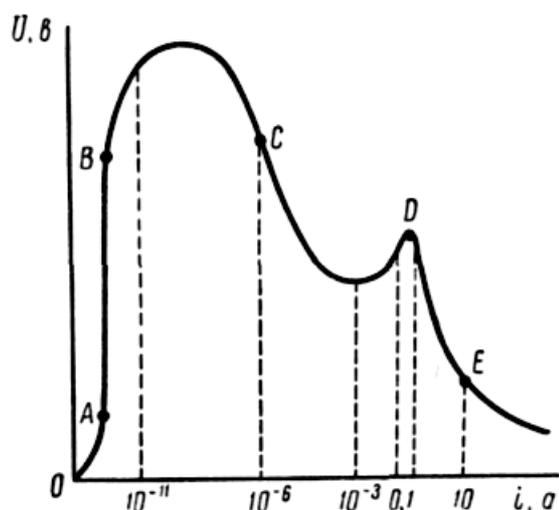


Рис. 8.2. Вольтамперная характеристика газового разряда

Одно время полагали, что характерной особенностью дуги является высокая температура катода, однако теперь уже совершенно ясно, что дуговой разряд на металлических электродах может существовать практически и при холодном катоде. На рис. 8.3 приведено изображение дугового столба между металлическими контактами и показано распределение напряжения вдоль него. Как можно видеть, падение напряжения на дуге складывается из трех слагаемых: катодного падения напряжения; падения напряжения в дуговом столбе и анодного падения напряжения.

Общее напряжение на дуге

$$U_d = U_k + U_A + U_{ст}.$$

При условии однородности дугового столба последний член – напряжение на дуговом столбе – может быть представлен как произведение напряженности электрического поля E на длину канала дуги.

$$U_{ct} = El.$$

Катодное падение напряжения сосредоточено на очень небольшом участке дуги, непосредственно примыкающем к катоду (около 0,001 мм при нормальном атмосферном давлении). Оно составляет величину порядка $10 \div 20$ В, следовательно, средняя напряженность электрического поля у катода достигает величины порядка 10^5 В/см и выше. При таких напряженностях выход электронов с поверхности катода может осуществляться в значительной степени за счет автоэлектронной эмиссии. Если материал катода таков, что температура его кипения может превысить 2500 К, то эмиссия электронов с поверхности катода может происходить и за счет термических процессов (термоэлектронная эмиссия). При этих условиях выход электронов с катода обеспечивается и при более низких падениях напряжения у катода. В этом случае катодное падение является не прямой причиной выхода электронов с катода, как при автоэлектронной эмиссии, а косвенной, обеспечивающей выделение около катода необходимой энергии для подогрева катода.

Возможно и совместное существование термической и автоэлектронной эмиссии при нагретом катоде.

Дуга может существовать между металлическими электродами и при холодном катоде. В этом случае имеет место в основном автоэлектронная эмиссия.

Возможен и такой механизм выхода электронов с катода, когда за счет высокой удельной плотности энергии в области околоскатодного пространства возникает высокая степень термической ионизации газа. При этом электроны уходят в зону Дуговой плазмы, а положительные ионы, падая на катод, забирают электроны из катода, образуя нейтральные атомы. Таким образом создается электрический ток в цепи. Вполне вероятно, что при холодном катоде имеет место совместное действие автоэлектронной эмиссии и эмиссии за счет термической ионизации в околоскатодном пространстве. Следовательно, каким бы ни был механизм освобождения электронов с катода, при всех

условиях у катода должна совершаться работа, т.е. выделяться энергия, что и обеспечивается благодаря катодному падению напряжения.

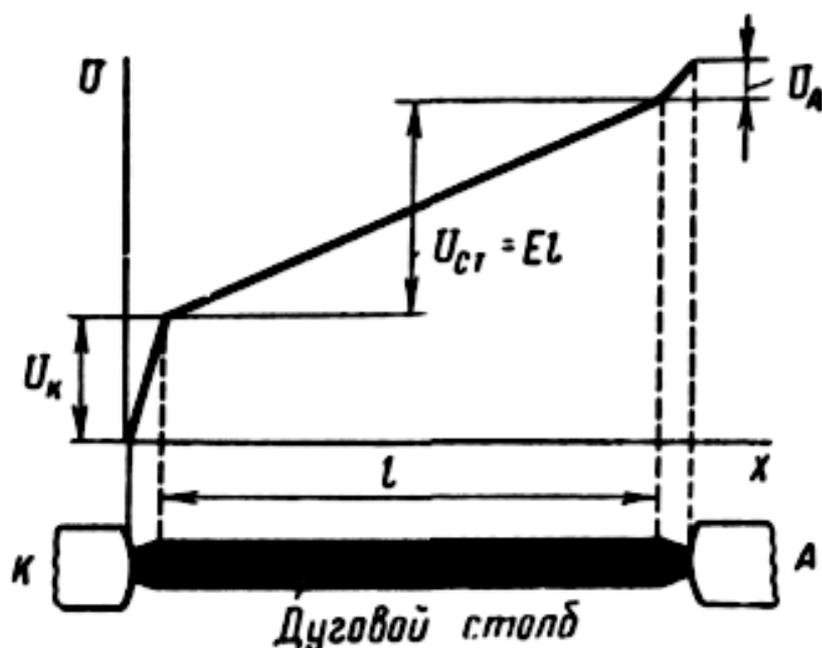


Рис. 8.3. Распределение напряжения по длине электрической дуги

Анодное падение напряжения имеет место в области, непосредственно примыкающей к аноду. Оно не является необходимым условием существования дугового разряда, так как задача анода относительно пассивная – принимать идущий к нему из зоны плазмы дуги электронный поток. Повышение же напряженности электрического поля у анода является следствием образования у анода пространственного отрицательного заряда из-за недостатка ионов у анода. Анод в дуговом разряде не излучает положительные ионы. Ионы же, возникающие в дуговом столбе, хотя и с небольшой скоростью, движутся к катоду. Таким образом, непосредственно у поверхности анода образуется преобладание отрицательных зарядов и создается условие для анодного скачка напряжения (анодного падения напряжения). Величина анодного падения напряжения зависит от температуры анода, рода металла и пр. Пришедшие из столба дуги электроны, нейтрализуясь на аноде, освобождают «работу выхода», затраченную ранее на выход электронов из катода. Часто температура анода бывает даже выше, чем температура катода.

Падение напряжения в дуговом столбе $U_{СТ}$ представляет собой произведение напряженности электрического поля E на длину столба l . Произведение напряженности электрического поля на ток в дуге определяет мощность, подводимую к дуговому столбу из сети на единицу его длины $W = Ei$.

При установившемся состоянии эта мощность равна мощности, рассеиваемой дугой в окружающее пространство P , т.е. $P = W$.

Рассеивание энергии дуговым столбом идет посредством излучения, теплопроводности и конвекции. При различных условиях гашения дуги в отключающих аппаратах может преобладать тот или иной вид теплоотдачи. Это зависит от величины тока, среды, в которой образуется дуга (различные газы или жидкости), давления, состояния среды (неподвижная или движущаяся) и пр.

Величина напряженности электрического поля в дуговом столбе также существенно зависит от условий, в которых горит дуга, и свойств дугогасящей среды. На практике наблюдается колебание напряженности электрического поля в пределах $10 \div 200$ В/см. Меньшая цифра относится к открытым дугам в воздухе при относительно больших токах, а большая – к дугам, находящимся в потоке газов или паров жидкости, когда отбор тепла от дугового столба делается особо интенсивным.

В дуговом разряде с изменением тока меняются радиус дугового столба, температура газа и плотность ионизации. В результате часто получается падающая вольтамперная характеристика, т.е. напряженность электрического поля в дуговом столбе уменьшается с ростом тока, как показано на рис. 8.4 (кривая 1).

Можно получить зависимость между напряженностью электрического поля и током в дуговом столбе. Мощность, поглощаемая дугой, в стационарном состоянии полностью отдается в окружающее пространство. Эту мощность дуга отдает не только поверхностью, как это имеет место у твердого тела, но и всем своим объемом.

Но иногда можно наблюдать, что E остается постоянной величиной, не зависящей от тока. Это может иметь место, когда плотность зарядов в дуговом канале остается величиной постоянной, не зависящей

от тока. Такое состояние получается в том случае, когда сечение дуги пропорционально току, текущему через нее. Постоянство напряжения на дуге наблюдается при гашении дуги переменного тока в выключателях, т.е. в условиях интенсивной деионизации дугового канала. Отсюда можно заключить, что в таких дугах сечение канала возрастает пропорционально току и плотность тока сохраняется постоянной.

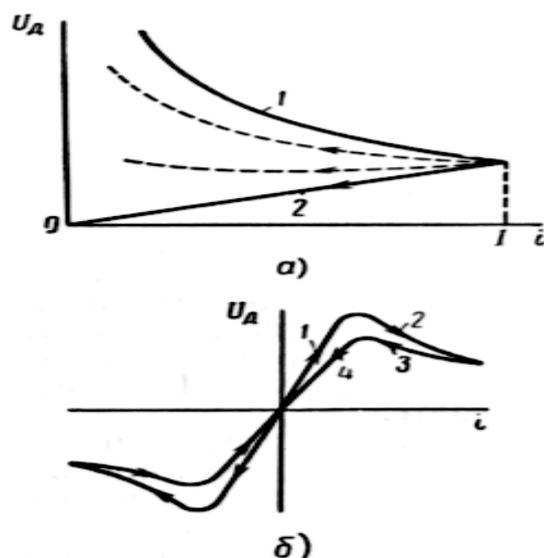


Рис. 8.4. Вольтамперные характеристики электрической дуги

Рассмотренные зависимости относятся к статическим вольтамперным характеристикам. Однако при быстром изменении тока в дуге напряжение на ней может довольно существенно отличаться от того, которое имеет место при установившемся значении. Это происходит вследствие того, что процессы в дуговом канале обладают инерционностью и для их установления требуется некоторое время.

Рассмотрим рис. 8.4, а, на котором показано семейство вольтамперных характеристик для различных скоростей убывания тока. Кривая 1 – это статическая вольтамперная характеристика, относящаяся к открытой дуге в воздухе. Если от значения $i = I$ ток убывает с различными скоростями, то чем выше скорость спада тока, тем ниже проходит вольтамперная характеристика. Это происходит потому, что при снижении тока такие параметры дуги, как сечение дуги, температура газа и степень ионизации, не успевают быстро измениться и приобрести значения, соответствующие меньшему значению тока при установившемся

режиме. В результате напряжение на дуговом столбе может существенно отличаться от значений, определяемых статической характеристикой. Эта серия характеристик при резких скоростях спада тока носит название динамических вольтамперных характеристик.

При бесконечно высокой скорости спада тока к нулю активное падение напряжения на дуге изменяется по прямой 2, так как при очень быстром уменьшении тока в цепи физические свойства канала не успевают сколько-нибудь измениться, т.е. сопротивление канала остается неизменным, и, следовательно, напряжение на дуге будет падать прямо пропорционально току. Этот крайний предел – падающая к нулю прямая – практически не достижим. Обычно те динамические характеристики, которые получаются в аппаратах отключения при спаде тока, имеют всегда возрастающий характер. Особенно большое отступление от статической характеристики при спаде тока наблюдается в области малых токов, т.е. при подходе тока к нулю (непосредственно перед гашением дуги), что способствует ограничению перенапряжений на выключателе и элементах цепи.

Динамическая характеристика дуги лежит, в общем, ниже статической, если она соответствует условиям спадания тока от некоторого сравнительно большего значения к меньшему. В другом случае, когда ток цепи не уменьшается, а, наоборот, возрастает независимо от сопротивления дуги, динамическая характеристика дуги в принципе может лежать выше ее статической характеристики.

На рис. 8.4, б представлена динамическая характеристика дуги синусоидального тока. Ее ветви 1 и 2 относятся к первой половине полупериода, когда ток нарастает во времени, а ветви 3 и 4 – ко второй полуволне, когда ток уменьшается.

Вид статических (и динамических) характеристик определяется многими условиями, в том числе и способом гашения дуги.

ГАШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При размыкании контактов аппарата, находящегося в цепи пос-

тоянного тока, возникает дуговой разряд. Для гашения возникающей дуги постоянного тока обычно стремятся повысить напряжение на дуге (и ее сопротивление) или путем растяжения дуги, или путем повышения напряженности электрического поля в дуговом столбе, а большей частью – одновременно и тем, и другим путем.

Это достигается применением специальных дугогасительных камер в выключающих аппаратах, задача которых состоит в том, чтобы обеспечивать быстрое растяжение дуги и повышение напряжения на ней, с одной стороны, а с другой – ограничивать распространение порождаемого ею пламени и раскаленных газов в приемлемом объеме пространства.

Казалось бы, что идеальным выключателем постоянного тока будет тот, сопротивление межконтактного промежутка в котором может мгновенно возрастать от нуля до бесконечности. Тогда мгновенно прекращалось бы протекание тока по цепи. Однако для реальных цепей постоянного тока, которые всегда содержат индуктивность L , такой выключатель не пригоден. Дело в том, что запасенная в индуктивной цепи электромагнитная энергия должна куда-то израсходоваться в процессе отключения цепи. Она может уйти, например, на заряд емкости C (рис. 8.5), параллельной дуговому промежутку, и существенно повысить напряжение на ней.

В пределе максимально возможное перенапряжение на емкости определится из равенства энергии:

$$\frac{LI^2}{2} = \frac{CU_{\max}^2}{2};$$
$$U_{\max} = I\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (8.1)$$

Для примера возьмем реальные величины:

$$I = 1000 \text{ А};$$
$$L = 10^{-3} \text{ Гн};$$
$$C = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Тогда

$$U_{\max} = 1000 \sqrt{\frac{10^{-3}}{0,1 \cdot 10^{-6}}} = 100000, \text{ В.}$$

Естественно, что такие большие перенапряжения для низковольтных установок недопустимы. Электрическую цепь следует отключать так, чтобы перенапряжения не превышали тех величин, которые может выдержать без пробоя электрическая изоляция. Такие условия выполняются в рационально сконструированных выключателях с электрической дугой, при гашении которой большая часть электромагнитной энергии цепи превращается в тепловую и рассеивается столбом дуги в окружающую среду. В результате энергия, запасаемая в емкости, и перенапряжения на емкости снижаются. В этом отношении электрическая дуга играет, очевидно, положительную роль.

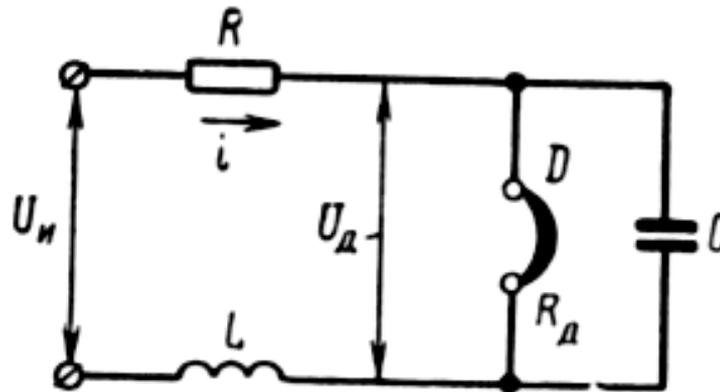


Рис. 8.5. Цепь постоянного тока с электрической дугой

Для того чтобы уяснить условие угасания дуги в цепи постоянного тока, необходимо сначала выяснить условия стабильного ее горения. На рис. 8.6 показана статическая вольтамперная характеристика дуги $U_d = f(i)$. Там же приведены величина напряжения источника U_R и вольтамперная характеристика сопротивления цепи $U_R = iR = f(i)$.

На рис. 8.5 была изображена электрическая цепь постоянного тока с дугой. Принципиально во всех реальных схемах присутствует емкость C (емкости между токоведущими проводами, проводами и землей и т.д.). Но обычно в процессе горения дуги D через C протекают относительно небольшие токи в сравнении с основным током цепи i , и влияние C обычно не учитывается. Это влияние становится

заметным в конце процесса гашения дуги, когда ток i приближается к нулевому значению, а напряжение на дуговом промежутке резко возрастает. При таком допущении общее уравнение баланса напряжений для цепи с дугой будет выглядеть следующим образом:

$$U_{\text{н}} = iR + U_{\text{д}} + L \frac{di}{dt}. \quad (8.2)$$

В установившемся состоянии при $\frac{di}{dt} = 0$

$$U_{\text{н}} = iR + U_{\text{д}}. \quad (8.3)$$

Для удобства анализа вместо прямой $iR = f(i)$ проведем реостатную или внешнюю характеристику $U_{\text{н}} - iR = f(i)$. Это будет прямая (рис. 8.6), исходящая из точки $U = U_{\text{н}}$ на оси ординат и пересекающая ось абсцисс в точке $i = I = \frac{U_{\text{н}}}{R}$, где I – установившийся ток в цепи при замкнутом выключателе B , т.е. при $U_{\text{д}} = 0$.

Нетрудно видеть, что прямая $U_{\text{н}} - iR = f(i)$ пересекает вольтамперную характеристику дуги $U_{\text{д}} = f(i)$ в точках A и B . В них соблюдается уравнение (8.3). Однако подлинно устойчивое состояние обеспечивается в точке A , так как при меньшем токе мы должны написать

$$U_{\text{н}} = iR + U_{\text{д}} + \Delta U,$$

а при токе, большем, чем в точке A ($i > i_A$):

$$U_{\text{н}} = iR + U_{\text{д}} - \Delta U.$$

В рассматриваемом контуре (см. рис. 8.5) величина ΔU может компенсироваться только за счет э.д.с. самоиндукции (8.2), т.е. $\Delta U = L \frac{di}{dt}$. При этом слева от точки A ΔU , а следовательно, и $\frac{di}{dt}$, должны быть положительными. Справа же от точки A ΔU , а следовательно, и $\frac{di}{dt}$, должны быть отрицательными. Это возможно только в том случае, когда слева от точки A ток возрастает, а справа – убывает. В точке B это условие равновесия не обеспечивается, так как справа от нее ток возрастает (переходит в точку A), а слева – убывает (дуга уга-

сает), точка *Б* характеризует собой *неустойчивое равновесие*.

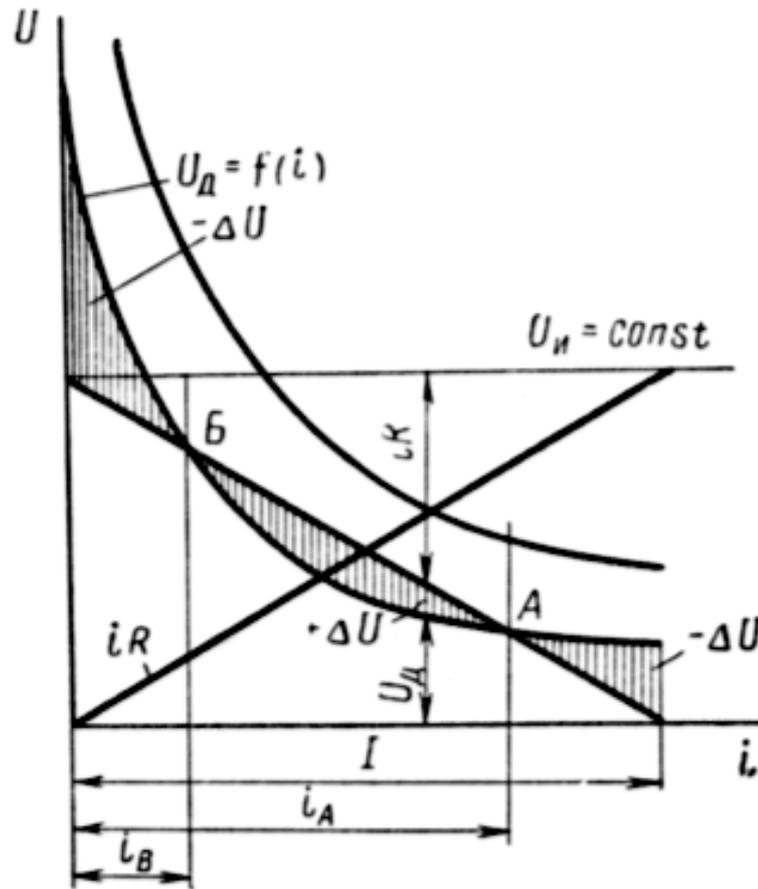


Рис. 8.6. Графическая интерпретация условия гашения дуги постоянного тока

Таким образом, если разомкнуть цепь при токе I и при этом на контактах установится дуга с напряжением U_d (полагаем, что дуга сразу достигает определенной длины, которой соответствует характеристика $U_d = f(i)$, нанесенная на рис. 8.6), то ток спадет со значения I до i_A и дуга при этом будет устойчиво гореть.

Для обеспечения условий гашения дуги после размыкания контактов необходимо, чтобы вольтамперная характеристика дуги оказалась выше внешней характеристики цепи, т.е. прямой $U_n - iR = f(i)$, когда не будет пересечения этих кривых и не возникнет точка *А*. В этом случае ток в цепи со значения I будет убывать до нуля. Во всем диапазоне изменения тока от I до 0 будет сохранено условие

$$U_n = iR + U_d - \Delta U. \quad (8.4)$$

Весьма эффективным средством, повышающим дугогасящие

свойства аппарата и снижающим перенапряжения при отключении цепей постоянного тока, является шунтирование дугового промежутка активным сопротивлением r (рис. 8.7).

На рис. 8.8 дано построение, позволяющее сделать заключение об эффективности шунтирования дугового промежутка сопротивлением r . Шунтирующее сопротивление r находится под тем же напряжением $U_{д}$, что и дуга. Ток в цепи, текущий через индуктивность L и сопротивление R , разветвляется на ток дуги и ток шунта, при этом всегда остается справедливым равенство $i = i_{д} + i_{r}$.

Для оценки условий гашения дуги необходимо построить зависимость напряжения на дуге от общего тока, т.е. $U_{д} = f(i)$, чтобы судить, как ориентируется кривая напряжения по отношению к реостатной характеристике цепи $U_{и} - iR = f(i)$. Из рис. 8.8 можно видеть, что (без шунта) кривая напряжения на дуге проходит вблизи прямой, почти касаясь ее. Условия гашения дуги здесь соблюдаются, но они близки к предельным, так как даже небольшое понижение характеристики дуги привело бы к устойчивой дуге. Кроме того, пик напряжения на дуге в конце гашения весьма велик, а также высоко значение $\Delta U_{м}$, т.е. напряжение на индуктивности

$$\Delta U = L \frac{di}{dt} = U_{м} - U_{и} = \Delta U_{м}. \quad (8.5)$$

Если же мы подключаем к дуговому промежутку сопротивление r , имеющее вольтамперную характеристику в виде прямой, общий ток в цепи i должен складываться из токов дуги и шунта, т.е. $i = i_{д} + i_{r}$.

Кривая напряжения на дуге в функции общего тока 2 (см. рис. 8.8) лежит существенно выше, чем кривая напряжения на дуге без шунта 1. Таким образом, процесс гашения происходит значительно быстрее, и наибольший пик напряжения на дуге будет $U_{м}$. В этот момент дуга гаснет. После этого ток продолжает убывать до момента пересечения прямых (i_{r0}). Этот ток остается в цепи. Он равен

$$i_{r0} = \frac{U_{и}}{R+r}. \quad (8.6)$$

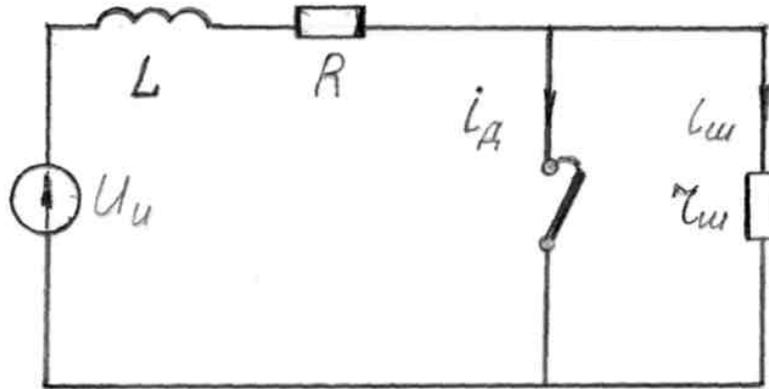


Рис. 8.7. Электрическая цепь постоянного тока с дугой, шунтированной активным сопротивлением

Для полного разрыва цепи ток i_{r0} необходимо отключить дополнительным контактом K (см. рис. 8.5). В этом состоит недостаток метода шунтирования, так как он несколько усложняет коммутационный аппарат.

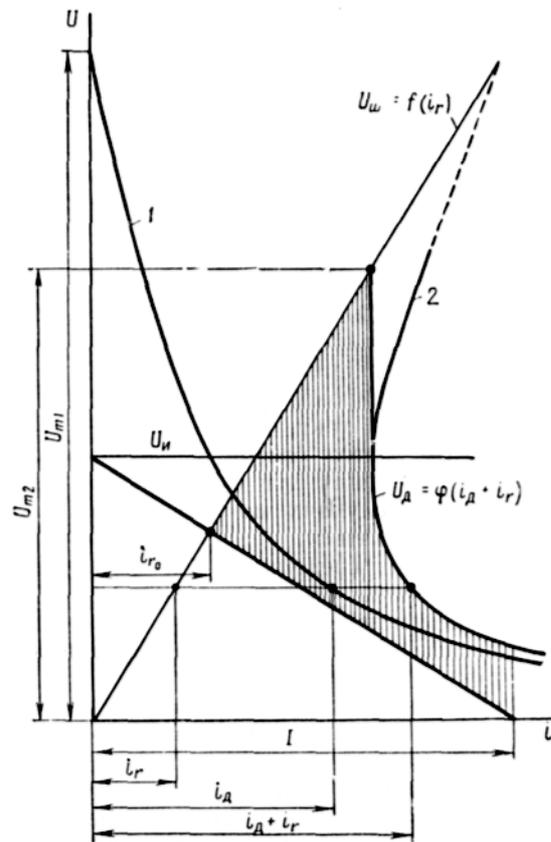


Рис. 8.8. Построение вольтамперной характеристики при шунтировании дуги активным сопротивлением

Аналогичных результатов можно достичь, прибегая к шунтированию индуктивности цепи или всей нагрузки. Однако этот метод имеет недостаток, потому что при включенной цепи через шунт будет

непрерывно протекать ток и в нем возникнут значительные потери. При сопоставлении рассмотренных методов можно заключить, что более рациональным является применение шунтов на выключателях.

Как уже было сказано, критическим можно назвать такой режим, когда характеристика $U_A = f(i)$ делается касательной к внешней характеристике цепи. Длину дуги, при которой наступает такой режим, называют *критической*. При длине, большей критической, дуга всегда гасится, а при меньшей – возможно устойчивое ее горение.

ЛЕКЦИЯ №9

ГОРЕНИЯ И ГАШЕНИЯ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА: В УСЛОВИЯХ АКТИВНОЙ ДЕИОНИЗАЦИИ, ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ, НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

УСЛОВИЯ ГАШЕНИЯ ДУГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Дуга переменного тока обычно гасится легче, чем дуга постоянного тока. Чтобы погасить дугу постоянного тока, надо насильственно свести к нулю ток цепи путем непрерывного увеличения сопротивления дугового столба (практически до бесконечности). При переменном токе этого делать не требуется: здесь через каждый полупериод ток естественным путем проходит через нулевое значение, и надо лишь воспользоваться этим обстоятельством и создать вблизи перехода через нуль такие условия в межконтактном промежутке, чтобы протекание тока цепи вслед за этим переходом не возобновлялось. Поэтому условия гашения дуги переменного тока следует трактовать иначе, чем условия гашения дуги постоянного тока. Исключением может быть лишь открытая дуга переменного тока в установках высокого напряжения, когда определяющим фактором является активное сопротивление сильно растянутого дугового столба. Тогда условия гашения дуги переменного тока по существу становятся близкими к условиям гашения дуги при постоянном токе. В другом крайнем случае сопротивление столба дуги во время ее горения практически не влияет на процесс ее гашения (в условиях активной деионизации),

и тогда при определении условий гашения дуги рассматривается взаимозависимость процессов за переходом тока через нуль. Но существует и третий случай, когда при оценке условий гашения дуги надо считаться как с влиянием активного сопротивления столба дуги, так и учитывать характер протекания процессов за нулем тока.

Перейдем к рассмотрению этих трех случаев.

а) Открытая дуга переменного тока при высоком напряжении источника. Открытая дуга переменного тока в моменты перехода тока через нуль сохраняет высокую проводимость, и поэтому в установках высокого напряжения гашение открытой дуги происходит не вследствие перехода через нуль и образования прочности промежутка, а главным образом вследствие растяжения дугового столба и образования на нем высокого напряжения горения (на всем протяжении полупериода). При таком режиме ток в цепи начинает заметно падать за несколько периодов до полного обрыва дуги и причиной его ограничения является возрастание сопротивления канала дуги.

При определенной длине дуги переменного тока напряжение сети оказывается недостаточным для поддержания горения дуги (критическая длина), наступает нарушение баланса мощностей (подводимой и отдаваемой), и ток цепи довольно быстро уменьшается и, наконец, совсем прекращается.

На рис. 9.1 приведена осциллограмма тока и напряжения на дуге переменного тока, возникшей при размыкании ножа разъединителя высокого напряжения.

В начале процесса, как можно видеть, ток в цепи меняется очень слабо и его величина определяется, главным образом, сопротивлением цепи. По мере же растяжения дуги доминирующим становится сопротивление дуги.

Таким образом, если в основу анализа процесса гашения открытой дуги переменного тока положить условие нарушения баланса напряжений при горении дуги (но не в нулевые переходы тока), то

задача может быть сведена по существу к той же самой, которая возникает и при гашении дуги постоянного тока.

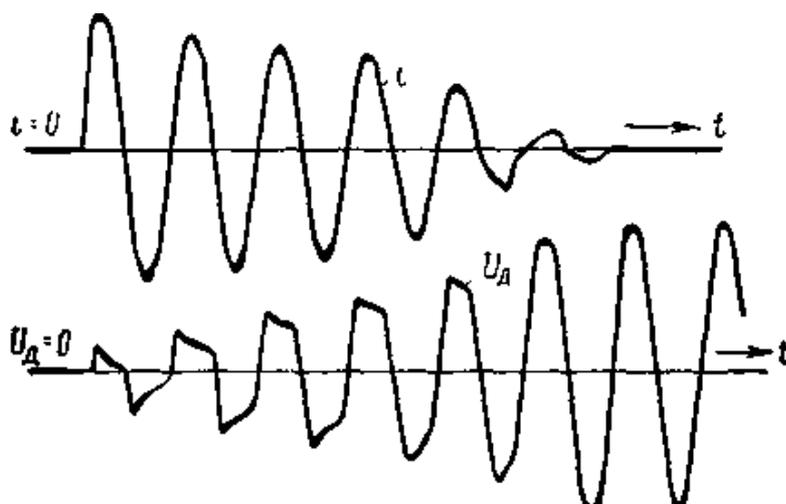


Рис. 9.1. Осциллограмма тока и напряжения открытой дуги при высоком напряжении источника

Для этой цели сделаем допущение, что статическая вольтамперная характеристика дуги при постоянном токе отражает зависимость между напряжением на дуге при переменном токе в момент максимума тока от амплитуды тока (амплитудная характеристика). Также предположим, как это мы делаем в случае постоянного тока, что для цепи переменного тока, содержащего только активное сопротивление, можно принять то же условие устойчивости горения дуги, то есть

$$U_m = I_m R + U_{дм}, \quad (9.1)$$

где U_m – амплитудное значение напряжения источника (сети):

I_m – амплитуда тока в цепи с дугой;

$U_{дм}$ – напряжение на дуге в момент максимума тока.

Если так же, как и ранее, предположить, что напряжение при максимуме тока связывается с амплитудой тока уравнением

$$U_{дм} = C I_m^{-a}, \quad (9.2)$$

то критическая длина дуги может быть представлена следующим образом:

$$i_{кр} = \frac{I_{3м}^a U_m}{C (1+a)^{1+a}},$$

где $I_{эм}$ – амплитудное значение тока в цепи, ограниченного только собственным сопротивлением цепи R (дуговой промежуток замкнут накоротко). Если положить для воздуха и относительно небольших токов, как и ранее, $C = 80$ и $a = 0,5$ и выразить ток и напряжение в действующих значениях, то для цепи, содержащей только активное сопротивление (безындуктивная цепь), получим

$$\begin{aligned} i_{кр} &= 0,33I_3; \\ i_{кр} &= 0,08I_3^a U. \end{aligned}$$

где $I_{кр}$ – действующее значение критического тока, А;

I_3 – действующее значение тока цепи при закороченном дуговом промежутке, А;

U – действующее значение напряжения сети, кВ;

$l_{кр}$ – критическая длина дуги, м.

При растянутой дуге напряжение на дуговом промежутке приближается к синусоидальному, поэтому для ориентировочных расчетов можно сделать допущение о синусоидальности напряжения на дуге, что позволяет баланс напряжений для цепи, содержащей индуктивное сопротивление и сопротивление столба дуги, представить так:

$$U_m^2 = (I_m x)^2 + U_{Дм}^2. \quad (9.3)$$

Снова используя уравнение вольтамперной характеристики дуги и решая задачу в отношении критической длины дуги и критического тока, получим после подстановки для частного случая $C = 80$ и $a = 0,5$:

$$\begin{aligned} I_{кр} &= 0,575 \cdot I_3; \\ l_{кр} &= 0,128 \cdot I_3^{a+3} U. \end{aligned} \quad (9.4)$$

где ток выражен в амперах, напряжение – в киловольтах, $l_{кр}$ – в метрах.

Из сопоставления формул можно видеть, что в цепях с индуктивным сопротивлением критический ток и критическая длина дуги имеют более высокие значения по сравнению со значениями этих величин в цепи с чисто активным сопротивлением.

Приведенные формулы не учитывают ряда факторов, имеющих влияние на процесс гашения дуги (расположение электродов, ветровые условия и пр.), и могут служить лишь для ориентировочных расчетов критических токов и критических длин дуг при их угасании в установках высокого напряжения.

б) Дуга переменного тока в условиях активной деионизации.

Если столб дуги переменного тока подвергается интенсивной деионизации, то в этом случае механизм гашения дуги существенно меняется по сравнению с предыдущим (открытая дуга в цепи высокого напряжения). За счет активного воздействия газовой или жидкой среды диаметр дугового канала сокращается (плотность тока повышается) и изменение его следует почти синхронно с током.

При подходе тока к нулю дуговой столб приобретает весьма малые размеры и благодаря этому быстро распадается после достижения током нулевого значения, теряет свою проводимость и приобретает заметную электрическую прочность. В таком случае восстановление дуги в следующий полупериод связано с пробоем межконтактного промежутка. Эти условия характерны для отключающих аппаратов относительно высокого напряжения.

Таким образом, дуга переменного тока в условиях активной деионизации дугового столба представляет собой такое явление, когда при каждом переходе тока через нуль возникает соревнование двух процессов, а именно: процесса восстановления электрической прочности промежутка и процесса восстановления напряжения на промежутке. Исходя из такой трактовки процесса, нетрудно заключить, что для угасания дуги переменного тока при интенсивной деионизации необходимо обеспечить такой режим, при котором электрическая прочность дугового промежутка после достижения током его нулевого значения нарастала бы достаточно быстро и достигала бы достаточного уровня.

На рис. 9.2 показано изменение тока в цепи и напряжения на дуге, подвергающейся интенсивной деионизации, но все же горячей устой-

чиво в течение нескольких полупериодов. Как видно из этого рисунка, после первого и второго переходов тока через нуль напряжение на дуговом промежутке достигает относительно высоких значений пиков напряжения зажигания U_3 , при которых возникает зажигание дуги в последующий период. В процессе протекания тока наблюдается задержка на нуле (ожидание пробоя). Эти задержки в токе на нуле могут быть большей или меньшей величины в зависимости от существующих условий в цепи (сдвига фаз между током и напряжением, величины напряжения, действующего в цепи, постоянных контура L , C и R).

Если обратиться снова к рис. 9.2, можно установить, что после третьего перехода через нуль прекратилось протекание тока по цепи, т.е. дуга погасла, а на межконтактном промежутке выключателя полностью восстановилось напряжение, развиваемое источником (рис. 9.2, *a*). Сдвиг фаз между током и напряжением при этом принят близким к 90° . Как можно видеть из рисунка, при активной деионизации дуги пики напряжения зажигания ее обычно значительно превосходят по своей величине напряжение горения дуги. Таким образом, в отличие от открытой дуги, напряжение горения U_D не является определяющей величиной при оценке условий угасания дуги.

Из рис. 9.2 также видно, что при первом переходе тока через нуль пик напряжения на дуге несколько меньше напряжения источника, и дуга легко зажигается вновь. При втором переходе тока через нуль, пик напряжения зажигания дуги несколько превышает напряжение зажигания при первом переходе тока через нуль, но все же дуга зажигается. При восстановлении напряжения на промежутке после третьего перехода через нуль возникают колебания, вследствие чего напряжение на нем существенно превосходит напряжение источника (в данном рассмотрении – амплитуду напряжения).

Теоретически, если пренебречь пиком гашения дуги и затуханием колебаний (контур без потерь), амплитудное значение восстанавливающегося напряжения на дуговом промежутке может достигнуть двойной величины. При третьем переходе тока через нуль прочность промежутка достигает такой величины, что пик восстанавливающе-

гося напряжения U оказывается недостаточным, чтобы вызвать повторное зажигание дуги, и цепь обрывается окончательно. Напряжение на промежутке в своем переходном режиме совершает ряд колебаний и далее меняется с рабочей частотой.

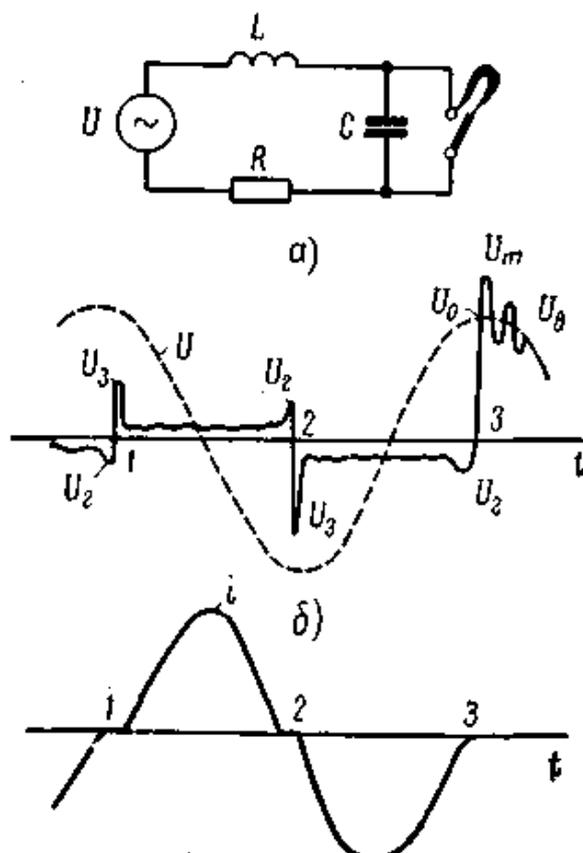


Рис. 9.2. Процессы при гашении дуги переменного тока

При оценке жесткости сети обычно подразумевают идеальный выключатель, т.е. полагают, что напряжение на дуге равно нулю, а после перехода тока через нуль сопротивление промежутка становится сразу равным бесконечности. При таком предположении восстановление напряжения на выключателе начинается с нуля, а не с пика гашения, и на затухание восстанавливающегося напряжения оказывает влияние только сопротивление цепи.

Существенно важной величиной при оценке жесткости сетей является *коэффициент превышения амплитуды*, представляющий собой отношение максимальной величины восстанавливающегося напряжения $U_{вт}$ к мгновенному значению напряжения источника в момент перехода тока через нуль.

Таким образом, условие гашения дуги переменного тока при активной деионизации промежутка может быть сформулировано следующим образом: *если после перехода тока через нуль прочность промежутка нарастает быстрее и остается все время выше, чем восстанавливающееся напряжение на выключателе, то процесс заканчивается угасанием дуги.*

При несоблюдении этого условия наступают повторный пробой и восстановление дуги.

в) Дуга переменного тока в условиях отключения цепей низкого напряжения. В установках низкого напряжения (до 1000 В) электрическое сопротивление столба дуги обычно бывает соизмеримым с сопротивлением отключаемой цепи, а напряжение на дуге – с напряжением источника питания. В таких условиях уже нельзя пренебрегать влиянием напряжения (и сопротивления) дуги, а с другой стороны – нельзя не рассматривать явлений на нуле тока, т.е. не учитывать влияния восстановления прочности при переходе тока через нуль.

Общая картина процессов при отключении цепи переменного тока низкого напряжения представлена на рис. 9.3. До момента размыкания контактов аппарата (МРК) по цепи протекал ток I , определяемый в совокупности величинами $U_{и}$, R и ωL .

В момент t_0 разомкнулись контакты аппарата и начало возрастать сопротивление дугового промежутка $R_{д}$ и напряжение на нем $U_{д}$.

Увеличивающееся при гашении дуги сопротивление $R_{д}$ приводит к некоторому уменьшению амплитудных значений тока (I_1, I_2, I_3) по полупериодам и уменьшению сдвига фаз между током цепи $i_{д}$ и напряжением источника $U_{и}$. Соответствующие углы сдвига фаз, определяемые отрезками времени между моментами перехода через нуль тока дуги и напряжения источника, обозначены через $\varphi(\varphi_3 \langle \varphi_2 \langle \varphi_1)$. Понятие о сдвиге фаз между током и напряжением относится к синусоидальным явлениям. В процессе гашения электрической дуги в установках низкого напряжения синусоида тока искажается вследствие роста сопротивления дуги.

Поэтому понятие о сдвиге фаз здесь носит условный характер. В моменты перехода тока дуги через нуль (точки 1 и 2) не создавалось необходимых условий для окончательного погасания дуги за этими переходами, и она повторно зажигалась вслед за ними. В момент 3-го перехода тока через нуль такие условия создались, дуга погасла и протекание тока по цепи прекратилось. За этим переходом по цепи может протекать лишь небольшой остаточный ток $i_{ост}$, определяемый так называемой остаточной проводимостью межконтактного промежутка аппарата.

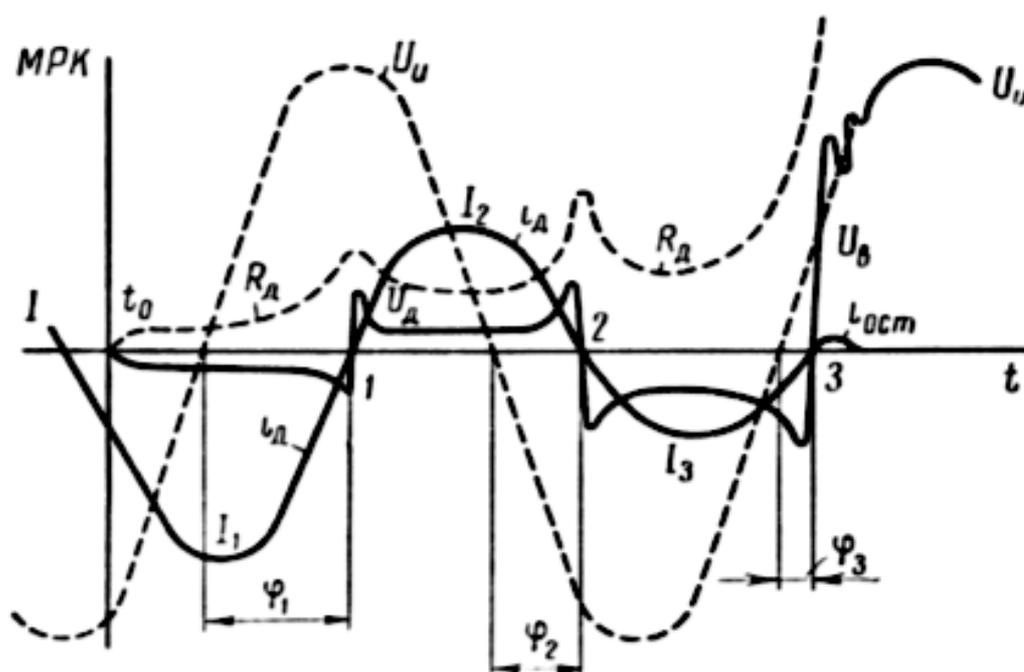


Рис. 9.3. Характер процессов при отключении цепи переменного тока низкого напряжения

При анализе условий возникновения между контактами выключателя электрической прочности, необходимой для гашения дуги, обычно рассматривают отдельно короткие и длинные промежутки с целью наиболее четкого выявления тех особенностей, которые необходимо использовать при конструировании дугогасительных устройств выключателей, предохранителей, контакторов, разрядников и пр.

В действительности, особенно в аппаратах низкого напряжения, имеют место смешанные процессы, т.е. свойственные и коротким, и длинным дугам одновременно.

ЛЕКЦИЯ №10

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ (МУ), ДРОССЕЛЬНЫЙ МУ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ. МУ С САМОПОДМАГНИЧИВАНИЕМ (МУС). ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫЕ СХЕМЫ МУС

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Бесконтактными электроаппаратами называют устройства, предназначенные для включения, выключения или переключения (коммутации) электрических цепей без физического разрыва цепи.

Основой построения бесконтактных электроаппаратов служат различного рода нелинейные элементы. Главными из них являются нелинейные индуктивности – ферромагнетик с обмотками и нелинейные активные сопротивления – полупроводниковые приборы.

Ниже будут рассмотрены выполняемые на базе ферромагнетиков и полупроводниковых приборов некоторые основные элементы (магнитные и полупроводниковые усилители, логические элементы), на базе которых могут быть выполнены различного рода бесконтактные электрические аппараты.

Большинство из рассматриваемых элементов называют усилителями. Блок-схема простейшего усилителя приведена на рис. 10.1, в нем последовательно с напряжением питания включены нагрузка Z_H и управляемое нелинейное сопротивление ($L = \text{var}$, или $R = \text{var}$); эта цепь называется рабочей. Нелинейное сопротивление управляется от специального источника сигнала управления (чаще от источника постоянного напряжения U_y). Цепь, состоящая из источника сигнала управления, сопротивления Z и нелинейного сопротивления, называется цепью управления.

С изменением тока цепи управления i_y меняются параметры нелинейного сопротивления и ток в рабочей цепи i_p . В результате оказывается возможным малыми мощностями в цепи управления управлять большими мощностями в нагрузке. Усиление происходит за счет мощности источника питания.

Если управляемым нелинейным сопротивлением является ферромагнитный сердечник с обмотками ($L = \text{var}$) – усилитель называется магнитным. Если это полупроводниковый прибор ($R = \text{var}$) – усилитель называется полупроводниковым.

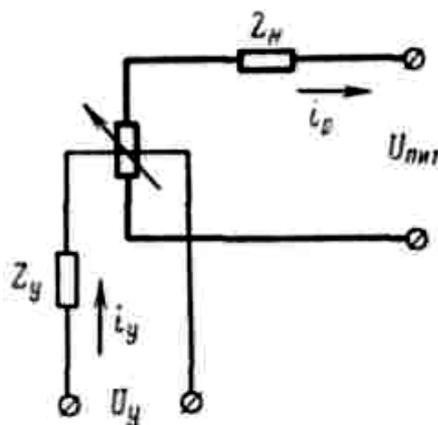


Рис. 10.1. Блок-схема усилителя

Полупроводниковые усилители питаются от источника постоянного или переменного тока. Магнитные усилители – от источника переменного напряжения (иногда импульсного, однополярного).

В то время как принцип работы полупроводникового усилителя весьма прост и достаточно поясняется блок-схемой (рис. 10.1), принцип работы магнитного усилителя требует специального пояснения.

Дело в том, что при перемагничивании ферромагнитного сердечника на его рабочей обмотке (включенной в рабочую цепь) создается противоэ.д.с, препятствующая протеканию тока в рабочей цепи. Если при этом сердечник достиг насыщения (состояния, при котором резко уменьшается магнитная проницаемость ферромагнетика), противоэ.д.с. на его рабочей обмотке резко падает и практически вовсе не препятствует протеканию рабочего тока, т.е. ферромагнитный сердечник играет роль дросселя, заслонка которого то закрыта (сердечник перемагничивается, не достигая насыщения), то открыта (сердечник, перемагничиваясь, достиг насыщения). Причем в течение одного полупериода напряжения питания сердечник может одну часть этого полупериода находиться в «непроводящем состоянии» (перемагничивается, не достигнув насыщения), а другую – в «проводящем» (достигнув насыщения). Ферромагнитный сердечник, работающий в таком режиме, будем

называть *дросселем насыщения* (ДН). В зависимости от того, какую часть полупериода ДН находится в непроводящем состоянии, а какую – в проводящем, будет зависеть величина тока и напряжения на нагрузке. Соотношение проводящих и непроводящих долей полупериода зависит от многих факторов, в частности, от величины напряжения питания и, что весьма существенно, от величины постоянной составляющей тока (или напряжения) на какой-либо из обмоток ДН.

Дроссель насыщения, в котором не предусмотрено протекание по обмоткам постоянной составляющей тока, называется *дросселем насыщения без подмагничивания*, а в котором предусмотрено протекание по какой-либо из обмоток постоянной составляющей тока, называется *дросселем насыщения с подмагничиванием*.

Магнитные усилители выполняются на дросселях насыщения с подмагничиванием: благодаря разной величине постоянной составляющей тока (или напряжения) изменяется соотношение проводящих и непроводящих долей полупериода и изменяется ток (напряжение) в нагрузке.

Магнитные усилители делятся на две основные группы: дроссельные магнитные усилители и магнитные усилители с самоподмагничиванием.

Дроссельным называют магнитный усилитель, по рабочим обмоткам которого протекает переменный ток (иногда их называют ДН с подмагничиванием).

Магнитным усилителем с самоподмагничиванием (МУС) называют усилитель, по рабочим обмоткам которого протекает однополупериодный выпрямленный ток (или однополярный импульсный), т.е. в МУС по рабочим обмоткам проходит постоянная составляющая тока, и его сердечники можно было бы назвать ДН с самоподмагничиванием.

а) Принцип действия. Магнитный усилитель (МУ) – это электрический аппарат, предназначенный для усиления электрического сигнала по току, напряжению или мощности. В схеме простейшего дроссельного МУ (ДМУ), называемого дросселем насыщения (рис. 10.2), используется управляемое индуктивное сопротивление. Замкнутый магнитопровод изготавливается из материала с резко выраженной нелинейностью кривой намагничивания $B=f(H)$. Рабочая обмотка переменного тока w_p включается в цепь нагрузки R_H . В обмотку

управления w_y подается управляющий постоянный ток I_y . Кривая намагничивания материала магнитопровода дана на рис. 10.3. При прохождении переменного тока по обмотке w_p на обмотке w_y наводится э.д.с. Эта э.д.с. будет создавать переменный ток в цепи управления, для ограничения которого включается балластный дроссель X_b .

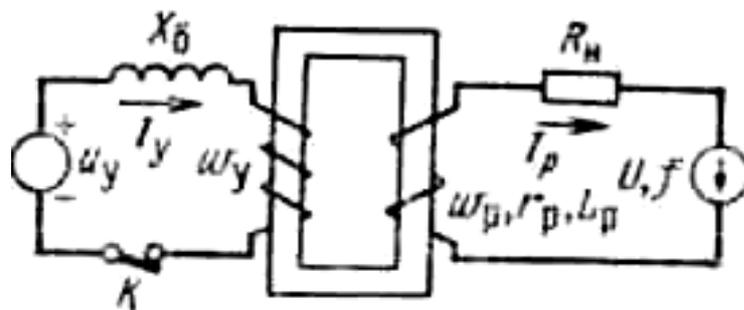


Рис. 10.2. Дроссельный МУ на одном магнитопроводе

При отсутствии тока управления (цепь управления разомкнута) индуктивное сопротивление обмотки w_p

$$X_{p1} = \omega L_{p1} = \omega \frac{w_p \Delta \Phi}{\Delta I} = \omega \mu_{a1} \frac{w_p^2 S}{l}, \quad (10.1)$$

где S – активное сечение магнитопровода;

w_p – число витков рабочей обмотки;

L_{p1} – ее индуктивность;

l – средняя длина магнитной линии в магнитопроводе.

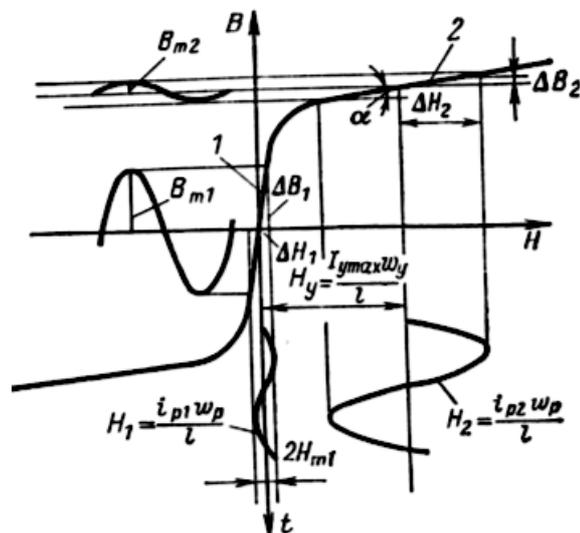


Рис. 10.3. Изменение индукции B , напряженности H и тока I_p

при $I_y = 0$ и $I_y = I_{y\max}$

При неизменных S, w_p, l индуктивность L_{p1} определяется абсолютной магнитной проницаемостью μ_3 . При $I_y = 0$ состояние магнитопровода характеризуется ненасыщенной зоной 1 (см. рис. 10.3). В этой зоне магнитная проницаемость $\mu_{31} = \frac{\Delta B_i}{\Delta H_i}$ велика, и индуктивное сопротивление обмотки w_p

$$X_{a1} = \omega \mu_{a1} \frac{w_p^2 S}{l}$$

максимально.

Обычно $R_H \ll X_{p1}$, поэтому ток в цепи рабочей обмотки определяется только значением X_{a1} , и имеет минимальное значение, равное $I_{H0} = \frac{H_l l}{w_p}$.

Напряженность магнитного поля H_{m1} находится по индукции

$$B_{m1} = U / (4,44 f w_p S) \quad (10.2)$$

Подадим в обмотку управления такой постоянный ток управления $I_{y\max}$, чтобы рабочая зона перешла в область 2. В этой области насыщения материал имеет магнитную проницаемость $\mu_{a2} = \frac{\Delta B_2}{\Delta H_2}$. Индуктивное сопротивление рабочей обмотки X_{p2} резко уменьшается. Значения X_{p2} и R_H выбираются так, что $X_{p2} \ll R_H$. Тогда ток в цепи определяется только сопротивлением нагрузки. При этом все напряжение источника питания приложено к сопротивлению ω_2 нагрузки R_n и активному сопротивлению r_p рабочей обмотки

$$i_p = \frac{U_m \sin \omega t}{R_n + r_p} = \frac{U_m \sin \omega t}{R_p}; \quad (10.3)$$

$$R_p = R_n + r_p.$$

Мы рассмотрели два крайних режима усилителя – режим холостого хода, когда $I_y = 0$ и ток в нагрузке имеет минимальное значение I_{H0} , и режим максимального тока нагрузки. При плавном увеличении тока I_y ток нагрузки плавно увеличивается от I_{H0} до максимального

значения I_{Hmax} за счет уменьшения магнитной проницаемости. Характеристика управления ДМУ приведена на рис. 10.4. По оси абсцисс отложен ток управления, приведенный к рабочей обмотке:

$$I'_y = I_y w_y / w_p. \quad (10.4)$$

Идеальная характеристика управления I является прямой, идущей из начала координат под углом 45° к оси I'_y . Реальная характеристика 2 отличается от идеальной наличием тока холостого хода I_{H0} и плавным переходом от линейной части характеристики к току I_{Hmax} .

В линейной зоне характеристики соблюдается равенство средних значений МДС:

$$I_p w_p = I_p = I'_y. \quad (10.5)$$

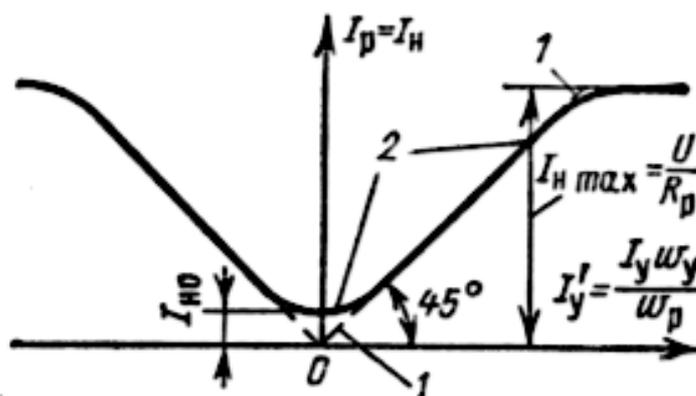


Рис. 10.4. Характеристика управления ДМУ

Равенство (10.2) не зависит от колебаний питающего напряжения, сопротивления нагрузки и частоты источника. Данному значению тока управления всегда соответствует единственное значение тока нагрузки I_H . Таким образом, ДМУ является управляемым источником тока.

Вследствие низких значений коэффициента усиления и большой массы ДМУ в настоящее время применяются редко, в основном как измерительные трансформаторы постоянного тока и напряжения. В первом случае роль обмотки управления w_y выполняет шина, по которой проходит измеряемый постоянный ток I_y . Под воздействием магнитного потока, созданного током I_y , магнитопроводы 1 и 11 насыщаются (рис. 10.5, а). Рабочие обмотки $w_{p1} = w_{p2} = w_p$ подключены

к источнику переменного напряжения u_p и создают магнитные поля с индукцией B_{p1} и B_{p2} . В цепь рабочих обмоток через выпрямительный мост включен измерительный прибор ИП, который является нагрузкой усилителя. Допустим, в рассматриваемый полупериод вектор индукции B_{p1} совпадает по направлению с вектором индукции B_y управляющего поля обмотки w_y , а вектор индукции B_{p2} направлен встречно вектору B_y . В результате магнитопровод 1 насыщен и сопротивление обмотки x_{p1} переменному току равно нулю, а магнитопровод 11, наоборот, далек от насыщения. Материал магнитопроводов 1 и 11 имеет кривую намагничивания, форма которой близка к прямоугольной. Обозначим через B_s значение индукции насыщения материала магнитопровода. В таком материале при суммарном значении магнитной индукции $B \leq B_s$ напряженность поля $H = 0$ и $\mu_a = \infty$. $B > B_s$, $\mu_a = 0$ и, следовательно, $x_p \rightarrow 0$ и не оказывает влияния на полное сопротивление цепи рабочих обмоток. В магнитопроводе 11, где $B < B_s$, $H = 0$ можно записать

$$-i_p w_p + i_y w_y = Hl = 0,$$

или

$$i_p = i_y w_y / w_p. \quad (10.6)$$

Из этого равенства следует, что ток i_p в течение рассматриваемого полупериода повторяет форму тока управления I_y . Так как $i_y = const$, то и ток $i_p = const$ в течение данного полупериода, т.е. принимает прямоугольную форму. В следующий полупериод встречно направлены вектора индукции B_{p1} и B_y в магнитопроводе 1. Ток i_p изменит знак, но сохранит прямоугольную форму. На рис. 10.5, б показаны временные зависимости тока управления I_y , тока в цепи рабочих обмоток i_0 и тока i_H , протекающего через измерительный прибор ИП. Мгновенные значения токов связаны равенством $i_H = i_y \frac{w_y}{w_p}$, которое выполняется и для средних значений $I_H = I_y \frac{w_y}{w_p}$.

Реальная форма кривой намагничивания материала магнитопро-

водов отличается от прямоугольной. Поэтому и форма тока i_p не прямоугольна, а в токе i_n появляются глубокие провалы, что вызывает определенную погрешность измерения.

Рассмотренное устройство может быть использовано и в качестве измерительного трансформатора напряжения постоянного тока. Для этого многовитковая обмотка управления w_y подключается к измеряемому напряжению U через большое добавочное сопротивление $R_{доб}$ (рис. 10.5, в).

Ток в обмотке управления w_y пропорционален напряжению: $i_y = U_{и}/R_{доб}$. Для уменьшения потерь в добавочном сопротивлении ток i_y берется малым – около 10 мА. Измерение этого тока производится так же, как в рассмотренной выше схеме.

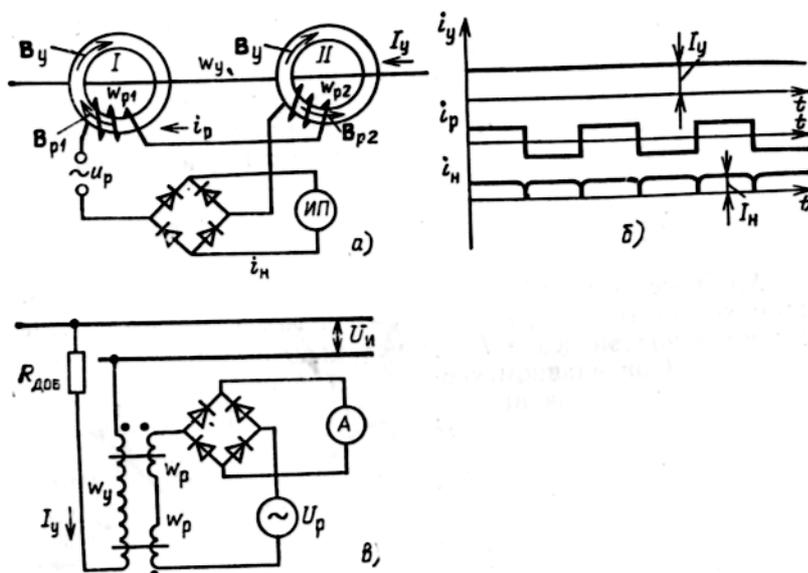


Рис. 10.5. Схема трансформатора постоянного тока (а), изменение токов в его обмотках (б) и измерительный трансформатор постоянного напряжения (в)

УСИЛИТЕЛЬ С САМОНАСЫЩЕНИЕМ (МУС)

Физические процессы. Если в цепь рабочей обмотки МУ включить диод, то под действием постоянной составляющей выпрямленного тока происходит подмагничивание магнитопровода. Такие усилители называются усилителями с самоподмагничиванием или с самонасыщением (МУС). При рассмотрении такого усилителя (рис. 10.6) примем, что обратное сопротивление диода VD равно бес-

конечности, а прямое учитывается сопротивлением R_B . В цепи управления включен балластный дроссель X_B для ограничения переменного тока, создаваемого рабочей обмоткой. Полярность напряжения источника, при которой диод проводит ток, примем за положительную, полупериод, при котором ток проходит через нагрузку, назовем рабочим (РП). Процессы, происходящие в МУС, в основном определяются формой динамической петли гистерезиса материала магнитопровода. Динамической петлей гистерезиса материала называется зависимость $B(H)$ при быстром изменении намагничивающего тока. Вследствие магнитной вязкости и вихревых токов в материале процесс перемагничивания замедляется и ширина динамической петли гистерезиса превышает ширину статической петли. Чем больше dH/dt , тем шире петля гистерезиса. Для материала с высокой степенью прямоугольности кривой намагничивания динамическая петля гистерезиса имеет форму параллелограмма (рис. 10.7).

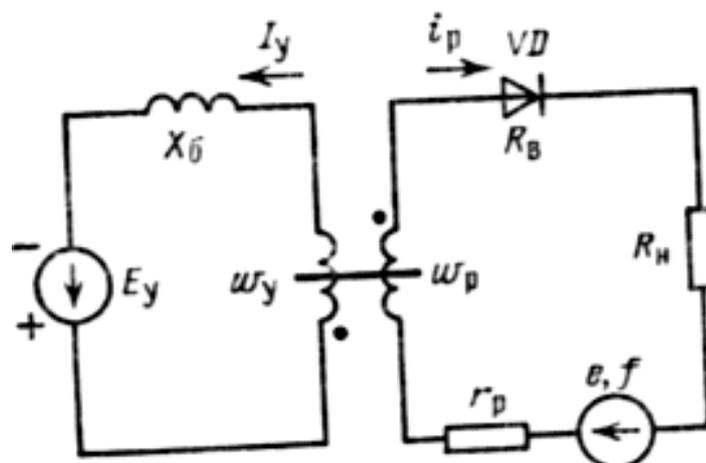


Рис. 10.6. Схема однополупериодного МУС

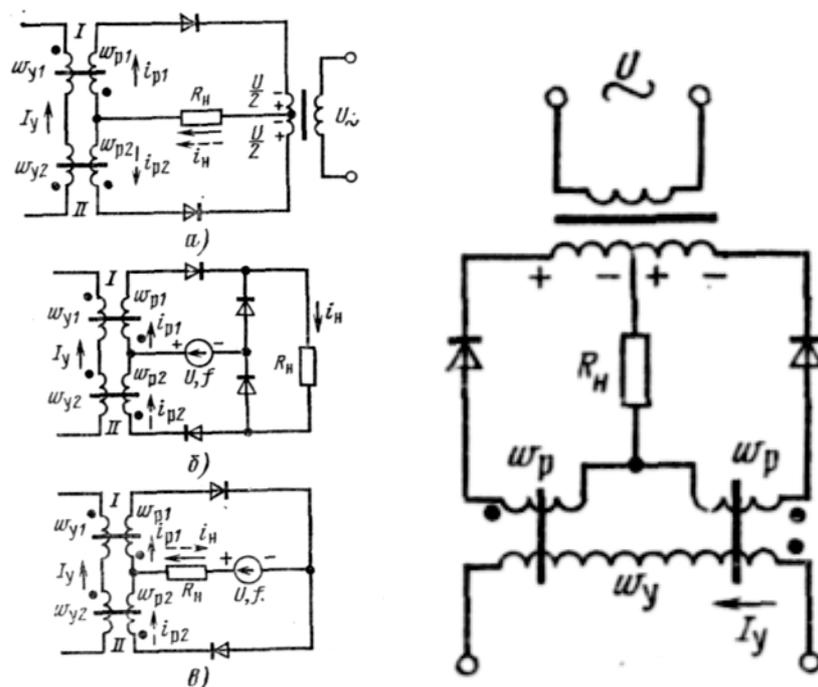
При отсутствии управляющего поля магнитопровод подмагничивается полем, созданным постоянной составляющей тока рабочей обмотки. Под действием этого поля в магнитопроводе устанавливается остаточная индукция $B_1 = B_s$. В рабочем полупериоде рабочая точка, характеризующая состояние магнитопровода, с ростом тока перемещается по участку 1-3. Так как магнитопровод насыщен, индуктивное сопротивление обмотки w_p равно нулю. Все напряжение

Рис. 10.7. Магнитный усилитель с самонасыщением:
динамическая петля гистерезиса

На рис. 10.8 изображены двухполупериодные мостовые схемы усилителя с нагрузкой на постоянном и переменном токе. При полярности вторичной обмотки питающего трансформатора, обозначенной на рис. 10.8, *a*, в верхнем усилителе МУС 1 имеет место рабочий полупериод, а в нижнем МУС 11 – полупериод управления. В следующем полупериоде МУС 11 будет находиться в рабочем полупериоде, а МУС 1 – в полупериоде управления.

При большом сопротивлении в цепи управления переменная составляющая напряжения, наведенная на обмотках w_y обмотками w_p , создает малый переменный ток, которым можно пренебречь. Тогда по цепи управления протекает только ток I_y . Такой режим работы МУС называется режимом вынужденного намагничивания. В этом случае условия работы каждого МУС аналогичны рассмотренным ранее.

Обычно сопротивление цепи управления мало и для компенсации наводимых на обмотках w_y э.д.с. начала и концы обмоток должны соединяться так, как показано на рис. 10.8. Две обмотки управления могут быть заменены одной. При этом для схемы, приведенной на рис. 10.8, *a*, необходимо изменить направление включения рабочих обмоток w_p (см. рис. 10.8).



ПАРАМЕТРЫ МУС

Статические параметры

а) Крутизна характеристики управления. Для МУС характерна зависимость выходного напряжения U_p только от ΔB_y :

$$U_p = U - 2f w_p S \Delta B_y. \quad (10.8)$$

Напряжение на нагрузке

$$U_H = \eta U_p = \eta(U - 2f w_p S \Delta B_y). \quad (10.9)$$

Из (10.8) выходное напряжение U_p не зависит от сопротивления рабочей цепи, и при данном токе управления МУС является управляемым источником напряжения. Если $R_H \gg R_B + r_p$, то U мало зависит от сопротивления нагрузки.

Характеристикой управления МУС называется зависимость выходного напряжения от тока управления $U_p(I_y)$ или напряжения на нагрузке от тока управления $U_H(I_y)$.

Крутизна характеристики управления

$$k_R = \frac{\partial U_H}{\partial I_y} = \frac{\Delta U_H}{\Delta I_y}. \quad (10.10)$$

Подставляя в это выражение значение U_B , получаем

$$k_R = \frac{\partial \eta(U - 2f w_p S \Delta B_y)}{\partial I_y} = -2f \eta w_p S \frac{\partial \Delta B_y}{\partial I_y}. \quad (10.11)$$

Но

$$I_y = H_y l / w_y. \quad (10.12)$$

Следовательно,

$$k_R = -2f \eta w_p w_y \frac{S}{l} \frac{\partial (\Delta B_y)}{\partial H_y}. \quad (10.13)$$

Производная $\partial \Delta B_y / \partial H_y$ характеризует наклон кривой размагничивания магнитопровода МУС и условно может определяться эквивалентной магнитной проницаемостью размагничивания $\mu_p = -\partial \Delta B_y / \partial H_y$. Введем понятие индуктивного сопротивления размагничивания

$$X_p = \omega L_p = \omega \frac{w_p^2 S}{l} \mu_p. \quad (10.14)$$

Тогда имеем

$$k_R = \frac{1}{\pi} \eta X_p \frac{w_y}{w_p}. \quad (10.15)$$

Таким образом,

$$k_R \sim X_p w_y / w_p. \quad (10.16)$$

б) Коэффициент усиления МУС. Коэффициент усиления по току

$$k_I = \frac{\Delta I_H}{\Delta I_Y} = \frac{\Delta I_H R_H}{\Delta I_Y R_H} = \frac{\Delta U_H}{\Delta I_Y R_H} = \frac{k_R}{R_H} = \frac{1}{\pi} \eta \frac{X_p}{R_H} \frac{w_y}{w_p} = \frac{1}{\pi} \frac{X_p}{R_p} \frac{w_y}{w_p}. \quad (10.17)$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$k_U = \frac{\Delta U_H}{\Delta U_Y} = \frac{\Delta U_H}{\Delta I_Y R_Y} = \frac{k_R}{R_Y}. \quad (10.18)$$

Коэффициент усиления по мощности

$$k_P = k_I k_U = \frac{k_R^2}{R_Y R_H}. \quad (10.19)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие науки и техники, научно-технические исследования предполагают развитие и совершенствование методов проектирования и расчета существующих, а также разработку новых электрических и электронных аппаратов. Поэтому соотношения и методы, приведенные в данном курсе, не являются неизменными и установившимися.

Конспект лекций охватывает часть курса электрических и электронных аппаратов и предназначен для изучения основ теории, конструкции, принципа действия, принципиальных схем и основных характеристик электрических аппаратов, проведения практических занятий по дисциплине. Кроме того, предлагаемый материал может

быть использован для самостоятельной работы студентов дневной и заочной форм обучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ОСНОВНОЙ

1. Алиев, И.И. Электрические аппараты: справочник / И.И. Алиев, М.Б. Абрамов. – М.: Радио софт, 2004.
2. Чунихин, А.А. Электрические аппараты / А.А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, CD-ROM, 2005.
3. Родштейн, Л.А. Электрические аппараты / Л.А. Родштейн. – М.: Энергоатомиздат, CD-ROM, 2005.
4. Розанов, Ю.К. Электрические и электронные аппараты / Ю.К. Розанов и др. – М.: Информэлектро, 2001.
5. Буткевич, Г.В. Задачник по электрическим аппаратам / Г.В. Буткевич и др. – М.: Высш. школа, 1977.
6. Буль, Б.К. и др. Основы теории электрических аппаратов: учеб. пособие для электротехнич. специальностей вузов / Под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высш. школа, 1970. – 600 с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ

7. Гольдберг, О.Д. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах, вопросы их проектирования / О.Д. Гольдберг и др. – М.: Высш. школа, 2001.
8. Сахаров, П.В. Проектирование электрических аппаратов / П.В. Сахаров. – М.: Энергия, 1971.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Основы теории электрических аппаратов	5
Лекция № 1. Введение. Предмет и задачи. Литература и ГОСТы, определения и классификация. Состояние и перспективы развития. Области применения, классификация электромагнитов, расчет магнитных полей	5
Лекция №2. Расчет и экспериментальное определение магнитных проводимостей воздушных промежутков.....	32
Лекция №3. Расчет магнитной цепи электромагнитов постоянного тока, обмоточных данных. Магнитные цепи электромагнитов переменного тока. Расчет обмоток	43
Лекция №4. Энергетический баланс электромагнита постоянного тока. Расчет силы тяги, формула Максвелла. Сила тяги электромагнитов переменного тока. Магнитный демпфер.....	62
Лекция №5. Тяговые и механические характеристики электромагнитов постоянного и переменного тока. Динамика электромагнитов, время трогания и движения. Ускорение и замедление срабатывания	73
Лекция №6. Электродинамические усилия (ЭДУ), методы расчета. Электродинамическая устойчивость. Нагрев электроаппаратов. Нормы нагрева, термическая устойчивость.....	94
Лекция №7. Электроконтакты, понятия и теория. Конструкция и выбор коммутирующих контактов	125
Лекция №8. Электрическая дуга, физические явления, основы горения и гашения дуги постоянного тока	149
Лекция №9. Горения и гашения дуги переменного тока: в условиях активной деионизации, высокого напряжения, низкого напряжения	168
Лекция №10. Магнитные усилители (МУ), дроссельный МУ, характеристики и режимы работы. МУ с самоподмагничиванием (МУС). Двухполупериодные схемы МУС	177
Заключение	189
Список литературы	190
Основной.....	190
Дополнительный	190

Учебное издание

*ЧЕБОТКОВ Эдуард Галактионович
ЗУБКОВ Юрий Валентинович*

**Электрические и электронные аппараты
(Ч. I. Основы теории)**

Редактор *Ю.А. Петропольская*
Верстка *И.О. Миняева*
Выпускающий редактор *Н.В. Беганова*

Подписано в печать 13.12.10.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. п. л. 11.16. Уч.-изд. л. 11.13.
Тираж 50 экз. Рег. № 160/10.

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус №8