

Министерство науки и высшего образования РФ
Филиал ФГБОУ ВО "Майкопский государственный
технологический университет" в п. Яблоновском

Р.И. Екутеч, А.А. Паранук, В.А. Хрисониди

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие



п. Яблоновский
2019

УДК 621.3(075)

ББК 32.85

О 28

Рецензенты:

А. А. Схаляхов - д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологий, машин и оборудования пищевых производств, декан технологического факультета ФГБОУ ВО "МГТУ"

Д. В. Ясько - начальник отдела релейной защиты и автоматики Филиала АО "СО ЕЭС" "Региональное диспетчерское управление энергосистемы Краснодарского края и Республики Адыгея (Адыгея)

О 28 Общая электротехника и электроника: Учебное пособие для студентов Высших учебных заведений / Р.И. Екутеч, А.А. Паранук, В.А. Хрисониди – п. Яблоновский, Краснодар – Издательство: Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2019- 371 с.

ISBN 978-5-91221-409-7

В соответствии с программой подготовки студентов не электротехнических специальностей, в книге рассмотрены основные теоретические и прикладные вопросы, касающиеся общей электротехники и электроники: электрические и магнитные цепи; топологические параметры и методы расчета электрических цепей; анализ и расчет линейных цепей переменного тока; анализ и расчет электрических цепей с нелинейными элементами; анализ и расчет магнитных цепей; электромагнитные устройства и электрические машины; трансформаторы; машины постоянного тока; асинхронные машины; синхронные машины; основы электроники и электрические измерения: элементная база современных электронных устройств; источники вторичного электропитания; усилители электрических сигналов; импульсные и автогенераторные устройства; основы цифровой электроники; микропроцессорные средства; электрические измерения и приборы.

Печатается по решению бюро научно-технического совета ФГБОУ ВО "МГТУ" протокол № 4 от 21.12.2017

УДК 621.3(075)
ББК 32.85

©Екутеч Р.И., 2019

©Паранук А.А., 2019

©Хрисониди В.А., 2019

©ФГБОУ ВО "МГТУ", 2019

ISBN 978-5-91221-409-7

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	8
1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ	11
1.1 Основные определения	11
1.2 Электрические цепи	13
1.2.1 Закон Ома	14
1.2.2 Законы Кирхгофа	16
1.2.3 Соединение сопротивлений	18
1.2.4 Соединения индуктивных и емкостных элементов	19
1.3 Классификация цепей и особенности их расчета	22
1.3.1 Принцип суперпозиции и метод наложения	23
1.3.2 Метод контурных токов	24
1.3.3 Метод узловых напряжений	27
1.4 Магнитные цепи	29
1.4.1 Магнитное поле токов	30
1.4.2 Закон Био – Савара - Лапласа	32
1.4.3 Влияние вещества на магнитное поле	33
1.4.4 Правило левой руки	34
1.4.5 Поток магнитной индукции	35
1.4.6 Свойства ферромагнитных материалов	36
1.4.7 Расчет магнитных цепей	37
2 ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК	40
2.1 Электромагнитная индукция	40
2.1.1 Единица измерения потока магнитной индукции	40
2.1.2 Самоиндукция	41
2.1.3 Взаимная индукция	42
2.2 Однофазные цепи переменного тока	43
2.3 Резонансные явления в цепях переменного тока	47
2.4 Методы анализа и расчета электрических цепей переменного тока	48
2.4.1 Метод комплексных амплитуд (символический метод)	48
2.4.2 Свойства комплексных чисел	51
2.4.3 Закон Ома и правила Кирхгофа в комплексной форме	52
2.5 Трехфазные цепи	55
2.5.1 Вращающееся магнитное поле	56
3 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ	59
3.1 Электрические аппараты	59
3.1.1 Назначение и устройство электромагнитных механизмов	59
3.1.2 Маломощные реле постоянного тока	64
3.1.3 Электротепловые и герконовые реле	66
3.1.4 Контактторы	69

3.1.5	Гашение электрической дуги	71
3.1.6	Коммутационные аппараты и плавкие предохранители	74
3.1.6.1	Электромеханические выключатели	74
3.1.6.2	Автоматические выключатели	75
3.1.6.3	Плавкие предохранители	78
3.2	Трансформаторы	81
3.2.1	Устройство, принцип действия и назначение трансформаторов	81
3.2.2	Уравнения первичной и вторичной цепей трансформатора	83
3.2.3	Уравнение намагничивающих сил трансформатора	85
3.2.4	Приведение обмоток трансформатора	85
3.2.5	Опыты холостого хода и короткого замыкания	86
3.2.6	Потери энергии и коэффициент полезного действия трансформатора	88
3.2.7	Трехфазные трансформаторы	90
3.2.8	Автотрансформаторы	91
3.2.9	Измерительные трансформаторы	92
3.2.10	Расчет трансформаторов	93
3.3	Электрические машины	97
3.3.1	Электрические машины постоянного тока	98
3.3.1.1	Назначение, устройство и принцип действия машин постоянного тока. Способы их возбуждения	98
3.3.1.2	Устройство обмоток якоря. Электродвижущая сила и реакция якоря	100
3.3.1.3	Работа машины постоянного тока в режиме двигателя	104
3.3.2	Асинхронные двигатели	110
3.3.2.1	Назначение, устройство и принцип действия асинхронного двигателя	110
3.3.2.2	Электродвижущие силы обмоток статора и ротора	112
3.3.2.3	Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя	113
3.3.2.4	Вращающий момент асинхронного двигателя	114
3.3.2.5	Зависимость вращающего момента от скольжения и механическая характеристика двигателя	114
3.3.2.6	Рабочие характеристики асинхронных двигателей	116
3.3.2.7	Пуск асинхронного двигателя	117
3.3.2.8	Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя	118
3.3.2.9	Однофазные асинхронные двигатели	119
3.3.3	Синхронные машины	120

3.3.3.1	Общие сведения о синхронных машинах и их устройство	120
3.3.3.2	Работа синхронной машины в режиме автономного генератора	124
3.3.3.3	Подключение трехфазной синхронной машины к электрической сети	128
3.3.3.4	Синхронный двигатель	131
3.3.3.5	Регулирование реактивной мощности синхронного двигателя	132
3.3.3.6	Синхронные микродвигатели	132
3.4	Электрический привод	135
3.4.1	Основные понятия и определения электропривода	135
3.4.2	Уравнение движения электропривода	137
3.4.3	Выбор электродвигателя и режимы его работы	140
3.4.4	Управление электроприводом	143
4	ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	148
4.1	Элементная база современных электронных устройств	148
4.1.1	Этапы развития электронных устройств	148
4.1.2	Полупроводниковые диоды	150
4.1.3	Биполярные транзисторы	162
4.1.4	Полевые транзисторы	168
4.1.5	Тиристоры	174
4.1.6	Полупроводниковые приборы как элементы интегральных микросхем	178
4.1.7	Индикаторные приборы	180
4.1.8	Фотоэлектрические и оптоэлектронные приборы	185
4.2	Источники вторичного электропитания	188
4.2.1	Классификация, состав и основные параметры	188
4.2.2	Однофазные выпрямители	190
4.2.3	Трехфазные схемы выпрямителей	194
4.2.4	Инверторы, конверторы и преобразователи частоты	199
4.3	Усилители электрических сигналов	205
4.3.1	Основные определения и область применения усилителей	205
4.3.2	Типы усилительных элементов	207
4.3.3	Основные характеристики усилителей	212
4.3.4	Типовые функциональные каскады полупроводникового усилителя	215
4.3.4.1	Анализ работы транзисторного усилителя. Классы усиления усилительных каскадов	216
4.3.4.2	Понятие о классах усиления усилительных каскадов	220
4.3.4.3	Температурная стабилизация режимов работы транзисторных усилителей	222

4.3.4.4	Избирательные усилители. Усилители мощности. Усилители постоянного тока	225
4.3.4.5	Анализ дифференциального усилителя	228
4.3.4.6	Операционные усилители. Схемы стабилизации и повышения входного сопротивления	230
4.4	Импульсные и автогенераторные устройства	240
4.4.1	Основные характеристики импульсных сигналов	240
4.4.2	Спектральный состав импульсного процесса	242
4.4.3	Электронные ключи и простейшие формирователи импульсных сигналов	250
4.4.4	Транзисторные триггеры	256
4.4.5	Основы теории автогенераторов. Баланс амплитуд и фаз	259
4.4.6	Принципы обеспечения баланса фаз в автогенераторах. Автогенераторы LC и RC типов	262
4.4.7	Блокинг-генераторы и мультивибраторы	265
4.5	Основы цифровой электроники	271
4.5.1	Области применения цифровой техники	271
4.5.2	Основы теории цифровых устройств	274
4.5.2.1	Системы счисления и двоичные коды	274
4.5.2.2	Булева алгебра	276
4.5.2.3	Законы булевой алгебры	277
4.5.2.4	Взаимное соответствие булевых функций и логических схем	280
4.5.2.5	Логическое соглашение	281
4.5.3	Разновидности функциональных схем	283
4.5.3.1	Комбинационные и последовательностные устройства	283
4.5.3.2	Микросхемы с тремя выходными состояниями	285
4.5.3.3	Параметры микросхем	286
4.5.4	Условные обозначения серий цифровых микросхем	289
4.6	Микропроцессорные средства	293
4.6.1	Терминология	293
4.6.2	Классификация микропроцессоров и микропроцессорных комплектов микросхем	295
4.6.3	Однокристалльные микроЭВМ семейства МК48	296
4.6.4	Микроконтроллеры AVR и PIC	299
4.6.5	Пример использования однокристалльной микроЭВМ в таксометре автомобиля	301
4.6.6	Структура и функционирование 32-разрядного микропроцессора	303
4.6.6.1	Регистры микропроцессора i486	306
4.6.7	Обзор современных платформ настольных компьютеров	307
4.6.7.1	Платформа Intel для настольных компьютеров	307

4.6.7.2	Процессоры Intel Core 2 Duo для мобильных платформ	308
4.7	Электрические измерения и приборы	310
4.7.1	Основы теории электрических измерений	310
4.7.2	Магнитоэлектрические и электромагнитные приборы	313
4.7.3	Электродинамические и индукционные приборы	315
4.7.4	Электронные и цифровые приборы	316
4.7.5	Измерение тока и напряжения	317
4.7.6	Измерение мощности и учет электроэнергии	319
4.7.7	Измерение сопротивлений, индуктивности и емкости	320
4.7.8	Электрические измерения неэлектрических величин	323
4.7.8.1	Омические датчики	325
4.7.8.2	Электролитические датчики	332
4.7.8.3	Контактные (релейные) датчики	333
4.7.8.4	Индуктивные, емкостные и магнитоупругие датчики	333
4.7.8.5	Индукционные, термоэлектрические и пьезоэлектрические датчики	338
4.7.8.6	Фотоэлектрические датчики	344
4.7.8.7	Датчик кислорода (лямбда-зонд)	347
5	ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ	350
5.1	Общие сведения	350
5.2	Защитное заземление	351
5.3	Защита от атмосферного электричества	355
5.4	Понятие о шаговом напряжении	357
	ЛИТЕРАТУРА	359
	ПРИЛОЖЕНИЯ	360

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника - отрасль науки и техники, связанная с применением электрических и магнитных явлений для преобразования энергии, получения и изменения химического состава веществ, производства и обработки материалов, передачи информации, охватывающая вопросы получения, преобразования и использования электрической энергии в практической деятельности человека.

Возникновению электротехники предшествовал длительный период накопления знаний об электричестве и магнетизме, в течение которого были сделаны лишь отдельные попытки применения электричества в медицине, а также для передачи сигналов. В XVII...XVIII вв. исследованию природы электрических явлений были посвящены труды М.В. Ломоносова, Т.В. Рихмана, Б. Франклина, Ш.О. Кулона, П. Дивиша и др. Среди попыток практического использования результатов этих достижений наиболее значительными были работы в телеграфии (электромагнитный телеграф П.Л. Шиллинга, 1832), в военном деле (гальваноударные морские мины Б.С. Якоби, 1840-е гг.), в области электрических измерений (индикатор электрического тока, т. н. мультипликатор, австрийского учёного И.К. Швейгера, 1820). Открытие электромагнитной индукции (1831...32) предопределило появление электрических машин - двигателей и генераторов. Поскольку все первые потребители электроэнергии использовали постоянный ток (как наиболее изученный), первые электрические машины были машинами постоянного тока. К 80-м гг. XIX в. электрические машины постоянного тока приобрели основные конструктивные черты современных машин. Их совершенствованию способствовало открытие закона о направлении индукционных токов (правило Ленца), обнаружение и исследование противоЭДС (Б.С. Якоби, 1840) и реакции якоря (Э.Х. Ленц, 1847), разработка методов расчёта электрических цепей (Г.Р. Кирхгоф, 1847) и магнитных цепей (английский учёный Дж. Гопкинсон, нач. 80-х гг.), изучение магнитных свойств железа (А.Г. Столетов, 1871) и др. Наряду с электромашинными генераторами продолжали совершенствоваться химические источники тока. Значительным шагом в этом направлении было изобретение свинцового аккумулятора (французский физик Г. Планте, 1859). Усовершенствованная конструкция этого аккумулятора к 80-м гг. уже имела все основные элементы современных аккумуляторов.

Создание надёжных источников тока сделало возможным удовлетворение возросших потребностей в электрической энергии для практических целей. Первыми электрическими источниками света были разнообразные дуговые угольные лампы, среди которых наиболее дешёвой и простой была «свеча Яблочкова» (П.Н. Яблочков, 1876). В 1870...75 А.Н. Лодыгин разработал несколько типов ламп накаливания, усовершенствованных позднее Т.А. Эдисоном и получивших преимущественное распространение к 90 м гг. 19 в. Достижения в создании и применении электрических источников света оказа-

ли существенное влияние на становление и развитие светотехники. С распространением электрического освещения связано создание электроэнергетических систем. Уже в первых осветительных устройствах Яблочкова имелись все основные элементы энергосистем: первичный двигатель, генератор, линия электропередачи, трансформатор, приёмник энергии.

В 70...80-е гг. XIX в. электроэнергию начали использовать в технологических процессах: при получении алюминия, меди, цинка, высококачественных сталей: для резки и сварки металлов; упрочнения деталей при термической обработке и т. д. В 1878 Э.В. Сименс создал промышленную конструкцию электроплавильной печи. Методы дуговой электросварки были предложены Н.Н. Бенардосом (1885) и Н.Г. Славяновым (1891).

К концу 70-х гг. относятся также первые попытки использования электроэнергии на транспорте, когда Ф.А. Пироцкий провёл испытания вагона, на котором был установлен электрический тяговый двигатель. В 1879 Сименс построил опытную электрическую дорогу в Берлине. В 80-е гг. трамвайные линии были открыты во многих городах Западной Европы, а затем в Америке (США). В России первый трамвай был пущен в Киеве в 1892 г. В 90-е гг. электрическая тяга была применена на подземных железных дорогах (в 1890 в Лондонском метрополитене, в 1896 - в Будапештском), а затем и на магистральных железных дорогах.

М.О. Доливо-Добровольский, который разработал ряд промышленных конструкций трёхфазных асинхронных двигателей и трёхфазных трансформаторов, в 1891 построил трёхфазную линию электропередачи Лауфен - Франкфурт (длина линии 170 км).

Важное направление современной электротехники - разработка теоретических и экспериментальных методов исследований, основывающихся на теории подобия, аналоговом и физическом моделировании, теории планирования эксперимента и позволяющих решать ряд принципиальных научно-технических проблем.

Теоретические и экспериментальные методы электротехники нашли своё развитие в ряде других отраслей науки и техники, связанных, в частности, с исследованием свойств вещества (полупроводников, плазмы), с разработкой и созданием средств электронной, ядерной и лазерной техники, изучением явлений микромира и жизнедеятельности живых организмов, освоением космического пространства.

Электроника - это наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и о методах создания электронных приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется для преобразования электромагнитной энергии, в основном для передачи, обработки и хранения информации. Наиболее характерные виды таких преобразований - генерирование, усиление и приём электромагнитных колебаний с частотой до 10^{12} Гц, а также инфракрасного, видимого, ультрафиолетового и рентгеновского излучений ($10^{12} \dots 10^{20}$ Гц). Преобразование до столь высоких частот возможно благодаря

исключительно малой инерционности электрона - наименьшей из ныне известных заряженных частиц.

Электроника опирается на многие разделы физики - электродинамику, классическую и квантовую механику, физику твёрдого тела, оптику, термодинамику, а также на химию, металлургию, кристаллографию и другие науки. Практические задачи электроники: разработка электронных приборов и устройств, выполняющих различные функции в системах преобразования и передачи информации, в системах управления, в вычислительной технике, а также в энергетических устройствах; разработка научных основ технологии производства электронных приборов и технологии, использующей электронные и ионные процессы и приборы для различных областей науки и техники.

Электроника включает в себя три области исследований: вакуумную, твердотельную и квантовую. Каждая область подразделяется на ряд разделов и ряд направлений. Раздел объединяет комплексы однородных физико-химических явлений и процессов, которые имеют фундаментальное значение для разработки многих классов электронных приборов данной области. Направление охватывает методы конструирования и расчётов электронных приборов, родственных по принципам действия или по выполняемым ими функциям, а также способы изготовления этих приборов.

Электроника находится в стадии интенсивного развития; для неё характерно появление новых областей и создание новых направлений в уже существующих областях.

Постиндустриальная, т.е. информационная цивилизация требует не только развития средств обмена информацией и ее контроля, но и все возрастающего производства электроэнергии, совершенствования электротехнологий и компьютерной техники, которые невозможны без изучения электротехники и электроники.

Владение базовыми знаниями в этих областях позволит специалисту рационально применять электротехнические и электронные устройства на практике.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

1.1. Основные определения

Для работы любого электротехнического устройства необходимо, чтобы через него проходил электрический ток, обязательным условием существования которого является наличие замкнутого контура – электрической цепи.

Основными элементами электрической цепи являются источники и приемники электрической энергии. Кроме этих элементов, электрическая цепь содержит измерительные приборы, коммутационную аппаратуру, соединительные линии, провода.

В источниках электрической энергии различные виды энергии преобразуются в электрическую.

Так, в генераторах электростанций в электрическую энергию преобразуется энергия механическая, в гальванических элементах и аккумуляторах – химическая, в солнечных батареях – световая и т.д.

В приемниках электрическая энергия источников преобразуется в механическую (электрические двигатели), тепловую (нагревательные элементы), световую (электрические лампы), химическую (электролизные ванны).

Все электрические цепи обладают рядом топологических параметров, с помощью которых можно контролировать их работу, такими, как напряжение, ток, сопротивление, мощность, затрачиваемая энергия. Для цепей, включающих нелинейные элементы – индуктивности и емкости и магнитопроводов электрических машин существенными параметрами являются такие величины, как емкость, индуктивность, электрическая проводимость, величины магнитного потока и магнитной индукции. Все электротехнические устройства по назначению, принципу действия и конструктивному оформлению можно разделить на три большие группы:

1. Источники энергии, т.е. устройства, вырабатывающие электрический ток (генераторы, термоэлементы, фотоэлементы, химические элементы).
2. Приемники, или нагрузка, т.е. устройства, потребляющие электрический ток (электродвигатели, электролампы, электрические механизмы и т.д.).
3. Проводники, а также различная коммутационная аппаратура (выключатели, реле, контакторы и т.д.).

Электрическую цепь называют линейной, если ни один параметр цепи не зависит от величины или направления тока, или напряжения, и нелинейной, если она содержит хотя бы один нелинейный элемент. Параметры нелинейных элементов зависят от величины или направления тока, или напряжения.

В соответствии с международной системой единиц СИ (System International), для измерения параметров электрических цепей должны применяться

следующие величины, вошедшие в перечень основных (табл. 1.1) и дополнительных (табл. 1.2) единиц СИ.

Таблица 1.1 - Основные единицы системы СИ

Величина	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
Длина	Метр	м	m
Масса	Килограмм	кг	kg
Время	Секунда	с	s
Сила электрического тока	Ампер	А	A
Термодинамическая температура	Кельвин	К	K
Сила света	Кандела	кд	cd

Производные единицы могут быть выражены через основные с помощью математических операций умножения и деления. Некоторым из производных единиц, для удобства, присвоены собственные названия, такие единицы тоже можно использовать в математических выражениях для образования других производных единиц.

Таблица 1.2 – Производные единицы системы СИ

Величина	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
Температура по шкале Цельсия	Градус Цельсия	°С	degree Celsius, °C
Частота	Герц	Гц	Hz
Сила	Ньютон	Н	N
Энергия	Джоуль	Дж	J
Мощность	Ватт	Вт	W
Давление	Паскаль	Па	Pa
Световой поток	Люмен	лм	lm
Освещённость	Люкс	лк	lx
Электрический заряд	Кулон	Кл	C
Разница потенциалов	Вольт	В	V
Сопротивление	Ом	Ом	Ω
Ёмкость	Фарада	Ф	F
Магнитный поток	Вебер	Вб	Wb
Магнитная индукция	Тесла	Тл	T
Индуктивность	Генри	Гн	H
Электрическая проводимость	Сименс	См	S

Поскольку диапазоны измеряемых величин имеют большой разброс, то для упорядочения обозначений измеряемых диапазонов в пределах от 10^{18} до

10^{-18} приняты кратные и дольные приставки к основным и производным величинам системы СИ (табл. 1.3).

Таблица 1.3 – Кратные и дольные приставки к единицам измерения

Наименование	Русское обозначение	Международное обозначение	Множитель
Экса	Э	E	10^{18}
Пета	П	P	10^{15}
Тера	Т	T	10^{12}
Гига	Г	G	10^9
Мега	М	M	10^6
Кило	к	k	10
Гекто	г	h	10^2
Дека	да	da	10^1
Деци	д	d	10^{-1}
Санتي	с	c	10^{-2}
Милли	м	m	10^{-3}
Микро	мк	μ	10^{-6}
Нано	н	n	10^{-9}
Пико	п	p	10^{-12}
Фемто	ф	f	10^{-15}
Атто	а	a	10^{-18}

1.2. Электрические цепи

Для теоретического анализа какой-либо электрической цепи ее изображают схемой – графическим изображением электрической цепи с помощью условных обозначений.

Приемники электрической энергии по характеру физических процессов, протекающих в них, делятся на три основных вида: резистивные; индуктивные; емкостные.

В реальной цепи электрическим сопротивлением обладают не только реостат или резистор, но и проводники, катушки, конденсаторы и т.д. Общим свойством всех устройств, обладающих сопротивлением, является необратимое преобразование электрической энергии в тепловую. Тепловая энергия, выделяемая в сопротивлении, полезно используется или рассеивается в пространстве. Сопротивление проводника определяется по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.1)$$

где l - длина проводника; S - сечение; ρ - удельное сопротивление.

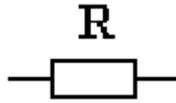


Рис. 1.1. Графическое изображение резистивного элемента

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью.

$$g = \frac{1}{R}. \quad (1.2)$$

Сопротивление измеряется в Омах (Ом), а проводимость - в Сименсах (См).

Сопротивление пассивного участка цепи в общем случае определяется по формуле (1.3):

$$R = \frac{P}{I^2}, \quad (1.3)$$

где P - потребляемая мощность;
 I - ток в цепи.

1.2.1. Закон Ома

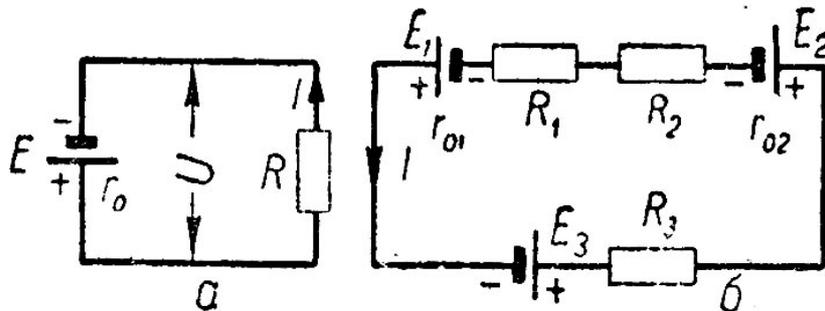


Рис. 1.2. Схемы неразветвленной цепи:

а - с одним источником питания;
б - с тремя источниками

Закон Ома для участка цепи. Величина тока на участке цепи (рис. 1.2.,а) прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.4)$$

откуда

$$U = I \cdot R; R = \frac{U}{I}, \quad (1.5)$$

где I - ток в цепи, А;
 U - напряжение на концах цепи, В;
 R - сопротивление участка цепи, Ом.

Закон Ома для всей цепи. Величина тока в неразветвленной цепи, содержащей один источник тока (рис. 1.2.,а), прямо пропорциональна его электродвижущей силе (ЭДС) и обратно пропорциональна сопротивлению всей цепи:

$$I = \frac{E}{R + r_0}, \quad (1.6)$$

где E - ЭДС Источника, В;
 r_0 - внутреннее сопротивление источника, Ом.

Из (1.6) находим:

$$I \cdot R = E - I \cdot r_0 \text{ или } U = E - I \cdot r_0. \quad (1.7)$$

Следовательно, напряжение на зажимах источника тока меньше его ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении. При разомкнутой внешней цепи напряжение на зажимах источника тока равно его

Ток в неразветвленной цепи (рис. 1.2., б), состоящей из нескольких последовательно соединенных источников тока и нескольких внешних сопротивлений, определяется по формуле:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{k=1}^m R_k + \sum_{i=1}^n r_{0_i}}, \quad (1.8)$$

где $\sum_{i=1}^n E_i = E_1 + E_2 + \dots + E_n$ - алгебраическая сумма ЭДС всех источников питания в цепи;

$\sum_{k=1}^m R_k$ - сумма сопротивлений внешней цепи;

$\sum_{i=1}^n r_{0_i}$ - сумма внутренних сопротивлений источников тока.

1.2.2. Законы Кирхгофа

Первый закон. Сумма токов, приходящих к узловой точке (рис. 1.3, а), равна сумме токов, уходящих от нее:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5 \quad (1.9)$$

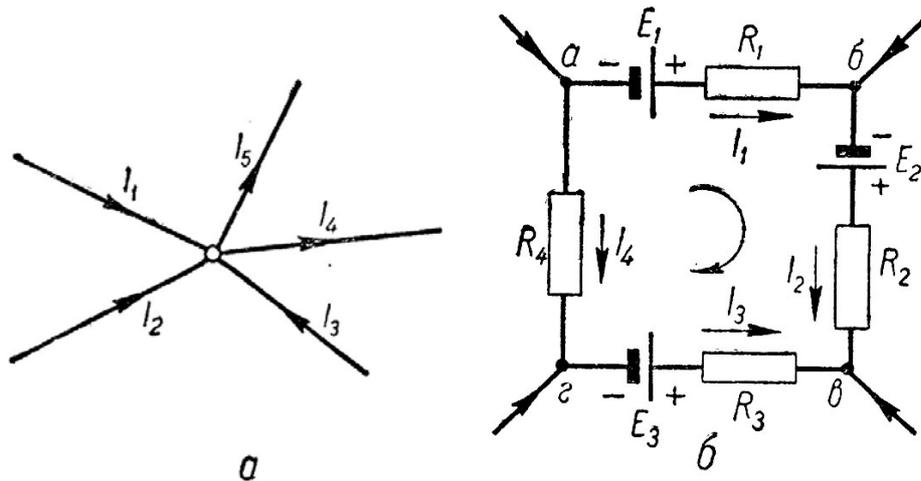


Рис. 1.3. К законам Кирхгофа:

a - узловая точка соединения проводников;
б - замкнутый контур, содержащий несколько ЭДС
и несколько сопротивлений.

Если условно считать токи, приходящие к узловой точке, положительными, а уходящие - отрицательными, то первый закон Кирхгофа можно сформулировать так: алгебраическая сумма токов в узловой точке равна нулю.

$$\sum I = 0. \quad (1.10)$$

Второй закон. Во всяком замкнутом контуре (рис. 1.3, б) алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений:

$$\sum E = \sum I \cdot R. \quad (1.11)$$

При произвольно выбранном направлении обхода контура ЭДС считаются положительными, если их направления совпадают с направлением обхода контура, и отрицательными - если не совпадают. Аналогично падения напряжений считаются положительными, если направление тока в сопротивлениях совпадает с направлением обхода контура, и отрицательным - если не совпадает. Так, для контура *абвг* (рис. 1.3, б), при обходе его по часовой стрелке можем написать:

$$E_1 + E_2 - E_3 = I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_4 R_4. \quad (1.12)$$

На рис. 1.3, б не показаны внутренние сопротивления r_0 источников питания.

Мощность - это работа, произведенная за единицу времени. Электрическая мощность (P , единица измерения ватт), согласно закону Ома:

$$P = UI; \quad P = I^2 R; \quad P = \frac{U^2}{R}. \quad (1.13)$$

Единицы измерения электрической и механической мощности связаны следующими соотношениями:

$$736 \text{ Вт} = 1 \text{ л.с.}; \quad 1000 \text{ Вт} = 1 \text{ кВт} = 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м/с} = 1,36 \text{ л.с.} \quad (1.14)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) - это отношение полезной мощности (P_1) к затраченной (P_2), т.е.

$$\eta = \frac{P_1}{P_2}. \quad (1.15)$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P, \quad (1.16)$$

где ΔP - мощность потерь.

КПД может выражаться в относительных единицах или процентах:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \cdot 100\%. \quad (1.17)$$

Работа, совершаемая электрическим полем при перемещении положительного заряда вдоль участка электрической цепи, не содержащего источников электроэнергии, называется электрической работой. Единица измерения электрической работы - джоуль ($1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вм} \cdot \text{с}$).

$$A = Pt; \quad A = I^2 R t; \quad A = \frac{U^2}{R} t. \quad (1.18)$$

Практической единицей измерения электрической энергии служит киловатт-час ($\text{КВт} \cdot \text{ч}$), т.е. работа, совершаемая при неизменной мощности 1 КВт в течение 1 ч.

При протекании токов на элементах электрической цепи выделяется тепло. На основании закона сохранения энергии количество тепла, выделяющееся в единицу времени в сопротивлениях схемы, должно равняться энергии, доставляемой за то же время источниками питания. Таким образом, в любой электрической цепи должен соблюдаться энергетический баланс мощностей: алгебраическая сумма мощностей всех источников электроэнергии должна быть равна алгебраической сумме мощностей всех приемников электроэнергии.

Уравнение энергетического баланса при питании электрической цепи только от источников ЭДС имеет вид:

$$\sum I^2 R = \sum EI. \quad (1.19)$$

Если направление тока I , протекающего через источник ЭДС E , совпадает с направлением ЭДС, то источник ЭДС доставляет в цепь в единицу времени энергию, равную EI , которое входит с положительным знаком в уравнение (1.16). Если же направление тока I встречное направлению ЭДС E , то источник ЭДС не поставляет электроэнергию, а потребляет его, например, при зарядке аккумулятора, и произведение EI входит в (1.16) с отрицательным знаком.

1.2.3. Соединение сопротивлений

Последовательное соединение (рис. 1.4, а). Величина тока в любой точке неразветвленной цепи одна и та же:

$$I = I_1 = I_2 = I_3. \quad (1.20)$$

Общее (эквивалентное) сопротивление равно сумме всех последовательно соединенных сопротивлений:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i. \quad (1.21)$$

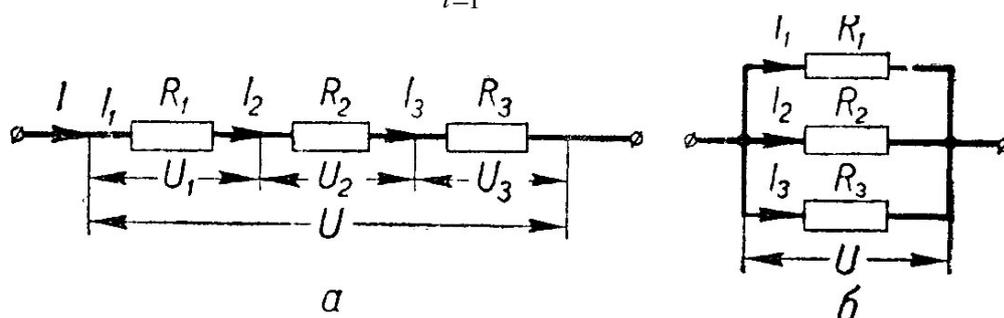


Рис. 1.4. Схемы соединения сопротивлений:
а - последовательное;
б - параллельное.

Общее напряжение (падение напряжения) равно сумме напряжений (падений напряжений) на отдельных участках цепи:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i. \quad (1.22)$$

Напряжения на участках цепи прямо пропорциональны сопротивлениям этих участков

$$U_1 = I \cdot R_1; U_2 = I \cdot R_2; U_3 = I \cdot R_3, \quad (1.23)$$

следовательно,

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3}. \quad (1.24)$$

Параллельное соединение (рис. 1.4, б). Ток в неразветвленной части цепи равен сумме токов в ветвях:

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \quad (1.25)$$

Общая проводимость разветвления равна сумме проводимостей отдельных ветвей:

$$g = g_1 + g_2 + g_3. \quad (1.26)$$

Общее сопротивление равно обратной величине общей проводимости $R = 1/g$ и меньше наименьшего сопротивления. Общее сопротивление определяется из формулы:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (1.27)$$

Ток в каждой ветви определяется согласно закону Ома

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = U \cdot g_1; \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = U \cdot g_2; \quad I_3 = \frac{U}{R_3} = U \cdot g_3. \quad (1.28)$$

Токи в ветвях прямо пропорциональны проводимостям или обратно пропорциональны сопротивлениям ветвей:

$$I_1 : I_2 : I_3 = g_1 : g_2 : g_3. \quad (1.29)$$

или

$$I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}. \quad (1.30)$$

1.2.4. Соединения индуктивных и емкостных элементов

Эти элементы электро- и радиотехнических устройств имеют принципиальное отличие от резистивных элементов в том, что в них не происходит необратимого преобразования электрической энергии в другие виды энергии.

Поэтому, когда сопоставляют элементы по своему характеру, то резистивные элементы называют активными, а индуктивный и емкостный элементы реактивными.

Классическим примером индуктивного элемента является катушка, намотанная проводом на магнитопровод (сердечник). Индуктивностью называется элемент схемы, характеризующий способность цепи накапливать магнитное поле.

Индуктивность, (коэффициент самоиндукции) численно равна ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_L , возникающей в проводнике (катушке) при изменении в нем тока:

$$L = \frac{\mathcal{E}_L}{\frac{dI}{dt}}. \quad (1.31)$$

Индуктивность катушки, измеряемая в генри [Гн], определяется по формуле

$$L = \frac{W \cdot \Phi}{I}, \quad (1.32)$$

где W - число витков катушки; Φ - магнитный поток катушки, Вб, возбуждаемый током I , А.

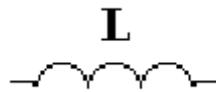


Рис. 1.5. Графическое изображение индуктивного элемента

Общая индуктивность L нескольких последовательно или параллельно соединенных индуктивностей при отсутствии индуктивной связи между ними определяется по формулам, приведенным в табл. 1.4.

Таблица 1.4 - Параллельное и последовательное соединение индуктивностей

Схема соединения	Общая индуктивность
	$L = L_1 + L_2 + L_3$
	$L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$
	$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$

Емкостью называется элемент схемы, характеризующий способность участка электрической цепи накапливать электрическое поле.

Кулон на вольт называется фарадой. Емкость конденсатора, измеряемая в фарадах (Ф), определяется по формуле:

$$C = \frac{q}{U_C}, \quad (1.33)$$

где q - заряд на обкладках конденсатора;

U_C - напряжение на конденсаторе.

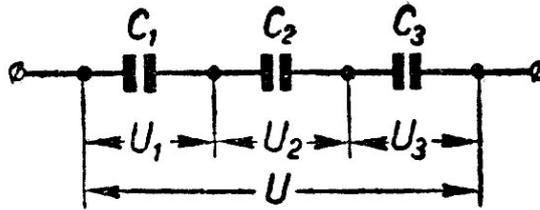


Рис. 1.6. Последовательное соединение конденсаторов

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 1.6), общее напряжение равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах:

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (1.34)$$

Напряжения на конденсаторах обратно пропорциональны их емкостям:

$$U_1 : U_2 : U_3 = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} : \frac{1}{C_3}. \quad (1.35)$$

Общая емкость определяется по формуле:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}, \quad (1.36)$$

и будет меньше емкости наименьшего конденсатора данной цепи. Параллельное соединение конденсаторов (рис. 1.7).

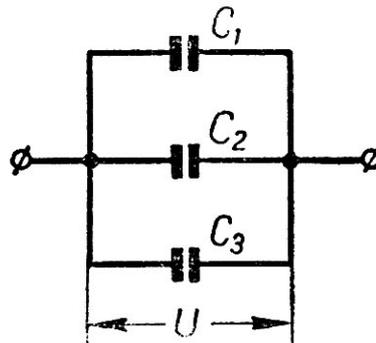


Рис 1.7. Параллельное соединение конденсаторов

Напряжения на каждом конденсаторе одинаковы и равны U . Общая емкость C равна сумме емкостей параллельно соединенных конденсаторов:

$$C = C_1 + C_2 + C_3. \quad (1.37)$$

При параллельном соединении n конденсаторов одинаковой емкости C_i общая емкость:

$$C = C_i \cdot n. \quad (1.38)$$

1.3. Классификация цепей и особенности их расчета

В электротехнике решаются две задачи: - синтез электротехнических устройств и анализ этих устройств.

Задача синтеза решается при создании новых устройств конструкторами. Это – наиболее сложная задача. Анализ работы электротехнических устройств чаще всего необходимо проводить уже при их эксплуатации, поэтому существуют типовые задачи анализа.

Как правило, задача анализа состоит в определении токов и напряжений на всех участках электрической цепи. При этом конфигурация цепи и параметры ее элементов, при этом вольтамперные характеристики (ВАХ) источников и потребителей энергии, электрические сопротивления токонесущих проводов и др., считаются известными.

Как уже отмечалось, при анализе (расчете режима работы) электрической цепи необходимо эту цепь представить и изобразить графически схемой, в которой элементы электрической цепи представлены в виде соединений идеализированных элементов – резистивного R , индуктивного L , и емкостного C , а источники электрической энергии представляются как последовательное соединение их электродвижущих сил (ЭДС) и внутренних сопротивлений этих источников.

Однако при анализе электрических цепей постоянного тока, пассивными элементами схем являются только резистивные элементы, т.к. сопротивления индуктивных элементов постоянному току равны нулю, а сопротивления емкостных элементов при этом равны бесконечности, так что емкостные элементы разрывают электрические цепи постоянного тока.

Линейными называются электрические цепи, которые содержат только линейные элементы. При наличии в цепи хотя бы одного нелинейного элемента цепь относят к нелинейным.

Линейные элементы характеризуются неизменными значениями своих параметров вне зависимости от протекающих через них токов (приложенных к ним напряжений). Этот принцип должен сохраняться и при изменении полярности напряжений и токов. Критерием оценки линейности цепей (систем) служит принцип суперпозиции или наложения.

Цепи классифицируются на линейные, нелинейные, пассивные (не содержат внутренних источников энергии) и активные (содержат внутренние источники энергии).

Цепи подразделяются на простые (один источник питания), сложные, неразветвленные (один контур) и разветвленные (много контуров).

Принцип расчета цепей заключается в описании уравнений, связывающих переменные в цепи, математическими методами (правилами Кирхгофа и др.) и решении этих уравнений относительно искомым электрических величин (токов, напряжений и т.п.). Для записи уравнений требуется показать условно-положительные направления для всех токов и напряжений схемы. Обычно

считаются заданными значения параметров всех источников энергии и элементов цепи. Требуется найти токи ветвей и напряжения на участках цепи. В ряде случаев исходную схему предварительно упрощают, используя эквивалентные преобразования.

1.3.1. Принцип суперпозиции и метод наложения

Принцип суперпозиции: реакция цепи или системы на суммарное воздействие равна сумме реакций на элементарные воздействия

$$f(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_n). \quad (1.39)$$

Принцип суперпозиции применим только к линейным цепям, а потому следующий из него метод наложения используется для анализа простейших линейных цепей с двумя или тремя источниками энергии. (При большем числе источников целесообразно при менять другие методы расчета, приводящие к меньшим временным затратам.)

Метод наложения: ток в любой ветви электрической цепи равен алгебраической сумме токов, создаваемых каждым источником этой цепи в отдельности (рис. 1.8).

Найдем токи ветвей, если известны следующие величины: E_1, E_2, R_1, R_2, R_3

Так как исходная схема содержит два источника ЭДС, то представляем ее в виде совокупности двух схем, оставляя в каждой из них только один источник.

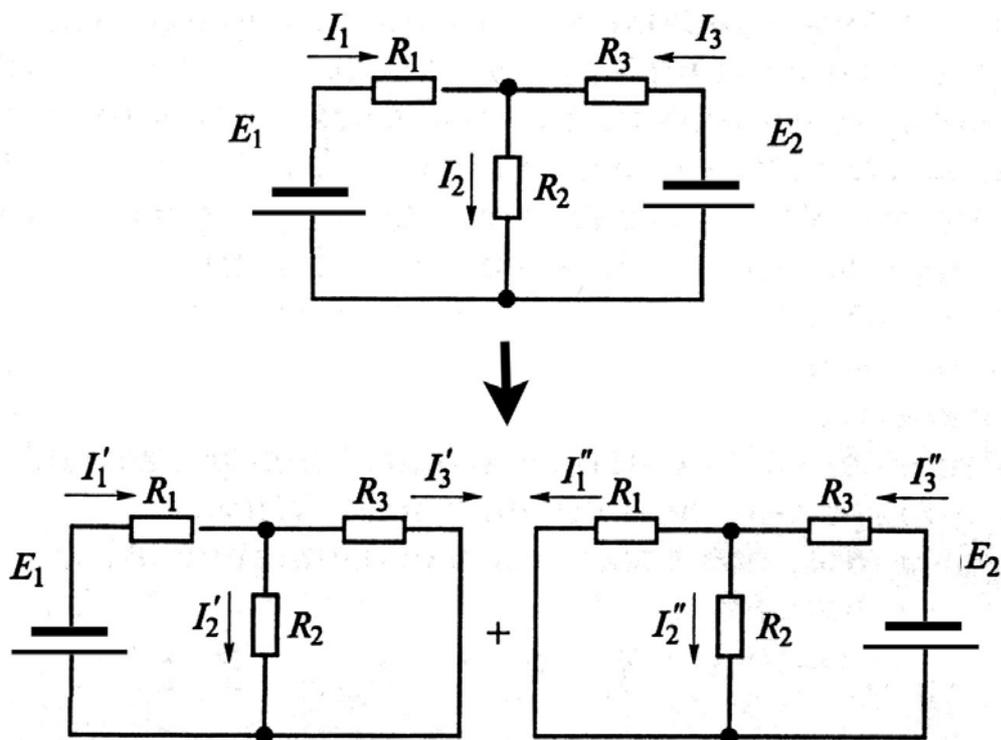


Рис. 1.8. Метод наложения

Для каждой из них любыми способами определяем токи ветвей, а затем находим искомые токи исходной схемы как результат суперпозиции токов, найденных для каждой из схем в отдельности:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_1' + I_1''; \quad I_1' = \frac{E_1}{R_1 + R_{23}}; \quad I_3'' = \frac{E_2}{R_3 + R_{12}}; \\ I_2 &= I_2' + I_2''; \quad I_2' = I_1' \frac{R_3}{R_2 + R_3}; \quad I_2'' = I_3'' \frac{R_1}{R_1 + R_2}; \\ I_3 &= -I_3' + I_3''; \quad I_3' = I_1' + I_2'; \quad I_1'' = I_3'' - I_2''. \end{aligned} \right\} \quad (1.40)$$

1.3.2. Метод контурных токов

Метод контурных токов (МКТ) применяют для расчета цепи, так как он позволяет исключить уравнения, составленные по первому правилу Кирхгофа. Расчетное число уравнений по правилам Кирхгофа равно числу искомых токов в ветвях и определяется числом ветвей цепи $N = B$.

Расчетное число уравнений по МКТ определяется числом взаимно независимых контуров цепи и составляет

$$N_{МКТ} = B - (Y - 1). \quad (1.41)$$

В методе контурных токов реализуется принцип использования промежуточных переменных, число которых меньше, чем число искомых переменных. Осуществляется переход от реальных токов рассчитываемой цепи (их число равно B) к контурным токам. Контурный ток - это условный расчетный ток, имеющий одинаковое значение на всех участках заданного контура. В электрической цепи, содержащей источник тока, последние преобразуют для расчета в источник ЭДС или учитывают как дополнительный контурный ток, не имеющий замкнутого контура. Для контура с источником тока уравнения не составляются. При определении контурных токов составляют уравнения по второму правилу Кирхгофа для каждого взаимно независимого контура и решают их относительно контурных токов. Для перехода от контурных к реальным токам используют уравнения, составленные по первому правилу Кирхгофа, в соответствии со следующим правилом: токи наружных (не имеющих смежных контуров) ветвей равны контурным токам, а токи смежных ветвей равны алгебраической разности контурных токов, проходящих по этим ветвям.

Для рассматриваемой цепи (рис. 1.9, а)

$$B = 5; \quad Y = 3; \quad N = 5; \quad N_{МКТ} = 5 - 2 = 3.$$

Для каждого взаимно независимого контура цепи введем соответствующий контурный ток и выберем в качестве условно-положительного направления токов направление по часовой стрелке.

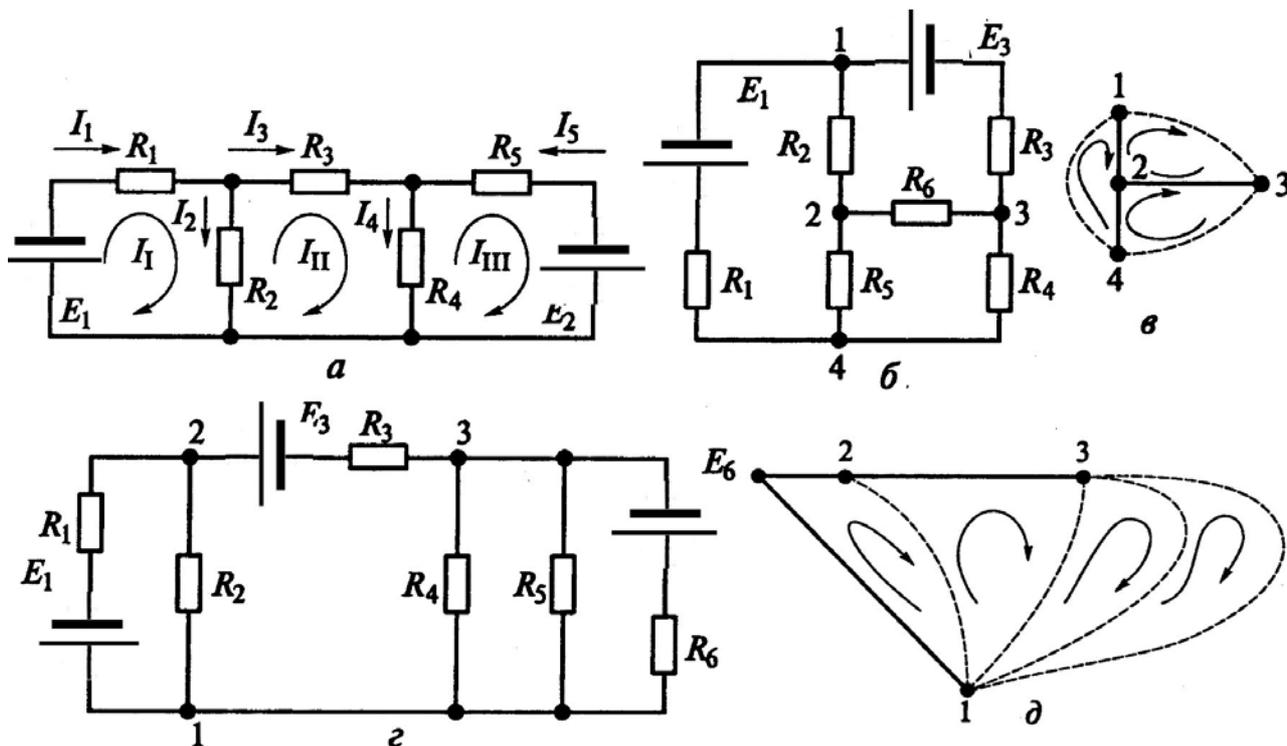


Рис. 1.9. Пример применения метода контурных токов: *а* - схема рассчитываемой цепи; *б* - мостовая схема; *в* - контуры мостовой схемы; *г* - параллельно-последовательная схема; *д* - контуры параллельно-последовательной схемы

По второму правилу Кирхгофа для контурных токов рассматриваемой цепи имеем:

$$\begin{aligned} R_1 I_1 + R_2 (I_1 - I_{11}) &= E_1; \\ R_2 (I_{11} - I_1) + R_3 I_{11} + R_4 (I_{11} - I_{111}) &= 0; \\ R_4 (I_{111} - I_{11}) + R_5 I_{111} &= -E_3. \end{aligned}$$

Правило составления контурных уравнений заключено в том, что алгебраическая сумма ЭДС в контуре равна произведению контурного тока данного контура на сумму всех сопротивлений контура, минус произведения контурных токов соседних контуров на соответствующие сопротивления смежных ветвей.

Для любой электрической цепи, имеющей N контуров, систему уравнений относительно контурных токов можно записать в канонической форме:

$$\begin{aligned} I_1 R_{11} - I_{11} R_{12} - I_{111} R_{13} &= \sum E_1; \\ -I_1 R_{21} + I_{11} R_{22} - I_{111} R_{23} &= \sum E_{11}; \\ -I_1 R_{31} - I_{11} R_{32} + I_{111} R_{33} &= \sum E_{111}; \end{aligned}$$

где R_{jj} - собственное сопротивление j -го контура, $j = 1, 2, 3$;

R_{jk} - взаимные сопротивления j -го и k -го контуров, $k=1, II, III$;

$\sum E_k$ - контурная ЭДС k -го контура.

Контурная ЭДС равна алгебраической сумме ЭДС k -го контура.

Для того чтобы привести систему уравнений, составленную относительно контурных токов, к канонической форме, необходимо выбирать контуры и контурные токи по следующим правилам:

1. Выбирают дерево и мосты.

2. За направления контурных токов принимают положительные направления токов в мостах.

3. Положительные направления обходов контуров (направления токов в мостах) выбираются так, чтобы токи в смежных ветвях контуров (как правило, это токи в ветвях дерева) имели противоположные направления.

4. В частном случае k параллельных мостов уравнение для i -го контура, т.е. первого из параллельных мостов, записывается по второму правилу Кирхгофа. Последующие $(k-1)$ уравнения включают в себя только мосты, при этом направления токов и, следовательно, направления контуров выбираются единообразно по часовой стрелке или против нее, что обеспечивает выполнение п. 3.

Для цепи, приведенной на рис. 1.9, а, определим собственные сопротивления контуров:

$$\begin{aligned}R_{11} &= R_1 + R_2; \\R_{22} &= R_2 + R_3 + R_4; \\R_{33} &= R_5 + R_4,\end{aligned}$$

а также взаимные:

$$\begin{aligned}R_{12} &= R_{21} = R_2; \\R_{13} &= R_{31} = 0,\end{aligned}$$

поскольку нет непосредственного соприкосновения контуров;

$$R_{23} = R_{32} = R_4.$$

Суммарные значения ЭДС контуров составят соответственно

$$\sum E_1 = E_1; \quad \sum E_{11} = 0; \quad \sum E_{111} = -E_2.$$

С учетом изложенных правил уравнения цепи будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} (R_1 + R_2)I_1 - R_3I_{11} - 0 = E_1; \\ -R_2I_1 + (R_2 + R_3 + R_4)I_{11} - R_4I_{111} = 0; \\ 0 - R_4I_{11} + (R_5 + R_4)I_{111} = -E_2. \end{cases} \quad (1.42)$$

Решив систему (1.42), найдем контурные токи:

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad I_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta}; \quad I_{111} = \frac{\Delta_{111}}{\Delta};$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_1 + R_2 & -R_3 & 0 \\ -R_2 & R_2 + R_3 + R_4 & -R_4 \\ 0 & -R_4 & R_5 + R_4 \end{vmatrix}; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} E_1 & -R_1 & 0 \\ 0 & R_2 + R_3 + R_4 & -R_4 \\ -E_2 & -R_4 & R_5 + R_4 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} R_1 + R_2 & E_1 & 0 \\ -R_3 & 0 & -R_4 \\ 0 & -E_2 & R_5 + R_4 \end{vmatrix}; \quad \Delta_{111} = \begin{vmatrix} R_1 + R_2 & -R_3 & E_1 \\ -R_3 & R_2 + R_3 + R_4 & 0 \\ 0 & -R_4 & -E_2 \end{vmatrix}.$$

От контурных токов переходим к реальным искомым токам:

$$I_1 = I_1; \quad I_2 = I_1 - I_{11}; \quad I_3 = I_{11}; \quad I_4 = I_{11} - I_{111}; \quad I_5 = -I_{111}.$$

Для электрических схем рис. 1.9, б, з выделяют соответствующие узлы и контуры в, д.

1.3.3. Метод узловых напряжений

Метод узловых напряжений (МУН) рекомендуется применять для расчета электрических цепей, у которых число узлов меньше числа независимых контуров. Этот метод основан на применении первого правила Кирхгофа и закона Ома. Расчетное число уравнений по МУН определяется числом узлов цепи:

$$N_{МУН} = (Y - 1).$$

Как и в методе контурных токов, здесь также применяют промежуточные переменные, в качестве которых используют узловые напряжения. Узловое напряжение - напряжение между любым узлом схемы и некоторым базисным узлом, потенциал которого принимают равным нулю. Затем записывают уравнения относительно напряжений узлов, число которых для любой схемы равно $(Y - 1)$, и решают их. Искомые токи ветвей определяются из найденных напряжений узлов по закону Ома (рис. 1.10).

Для рассматриваемой цепи $B = 5$, $Y = 3$, $N_{МУН} = (Y - 1) = 2$.

Выберем базисный узел и обозначим его цифрой 0. Два других узла обозначим цифрами 1 и 2. Направим напряжения U_{10} и U_{20} от узлов 1 и 2 к узлу 0. В цепи также имеется напряжение U_{12} между узлами 1 и 2, которое определяется через узловые напряжения по второму правилу Кирхгофа:

$$U_{12} = U_{10} - U_{20}.$$

Запишем уравнения на основании первого правила Кирхгофа для узлов 1 и 2 цепи при выбранных условно-положительных направлениях токов:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0; \quad I_3 - I_4 + I_5 = 0.$$

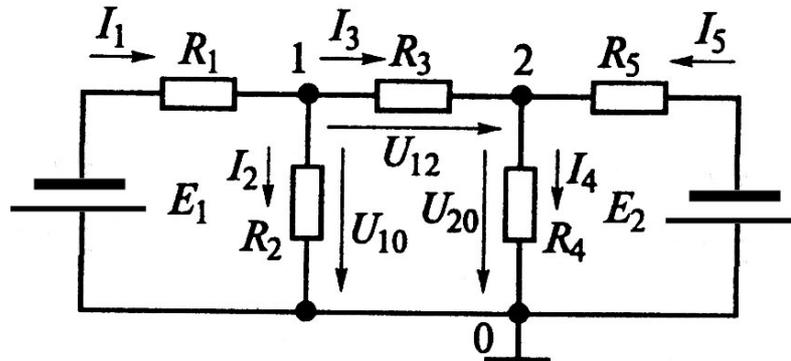


Рис. 1.10. Схема к расчету методом узловых напряжений

Пользуясь законом Ома, выразим токи ветвей через ЭДС и проводимости ветвей, а также через напряжения узлов:

$$I_1 = g_1 E_1 - g_1 U_{10};$$

$$I_2 = g_2 U_{10};$$

$$I_3 = g_3 U_{12} = g_3 (U_{10} - U_{20});$$

$$I_4 = g_4 U_{20};$$

$$I_5 = g_5 E_2 + g_5 U_{20}.$$

Подставляем эти уравнения в выражения для токов узлов:

$$(g_1 + g_2 + g_3) U_{10} - g_3 U_{20} = g_1 E_1;$$

$$-g_3 U_{10} + (g_3 + g_4 + g_5) U_{20} = g_5 E_2.$$

В общем виде эти выражения для трех узлов можно записать так:

$$g_{11} U_{10} - g_{12} U_{20} = \sum I_{y1}$$

$$-g_{21} U_{10} - g_{22} U_{20} = \sum I_{y2}.$$

(1.43)

Собственная проводимость определяется как проводимость всех резисторов, присоединенных к k -му узлу. В рассматриваемом случае

$$g_{11} = g_1 + g_2 + g_3; \quad g_{22} = g_3 + g_4 + g_5.$$

Взаимные проводимости всегда записываются в уравнениях со знаком минус. В рассматриваемом случае $g_{12} = g_{21} = g_3$.

Узловой ток находят как алгебраическую сумму токов, создаваемых каждым источником ЭДС и источниками тока, расположенными в ветвях, замыкающих к j -му узлу:

$$\sum I_{yi} = \sum_{k=1}^n g_k E_k + \sum_{k=1}^m I_k.$$

Слагаемое в узловом токе имеет знак плюс, если соответствующий ему источник направлен к рассматриваемому узлу. Для рассматриваемой схемы

$$\sum I_{y1} = g_1 E_1; \quad \sum I_{y2} = g_5 E_2.$$

Решив уравнения (1.43), получим следующие результаты:

$$U_{10} = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad U_{20} = \frac{\Delta_2}{\Delta},$$

где
$$\Delta = \begin{vmatrix} g_{11} & -g_{12} \\ -g_{21} & g_{22} \end{vmatrix}; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} E_1 g_1 & -g_{12} \\ E_5 g_5 & g_{22} \end{vmatrix}; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} g_{11} & E_1 g_1 \\ -g_{21} & E_5 g_5 \end{vmatrix}.$$

Для окончательного решения требуется найти все токи исходной схемы по закону Ома.

Учитывая относительную сложность расчета RLC-цепей, разработана программа на языке Basic, позволяющая рассчитывать цепи, содержащие до 46 узлов, листинг которой приводится в приложении.

1.4. Магнитные цепи

Магнитной цепью называется совокупность тел или областей пространства, в которых сосредоточено магнитное поле. Магнитные цепи составляют необходимую часть электрических машин и многих электрических устройств.

Интенсивность магнитного поля характеризуется векторной величиной: напряженностью магнитного поля \vec{H} , измеряемой в амперах на метр (А/м). Интенсивность магнитного поля характеризуется также вектором магнитной индукции \vec{B} , измеряемой в теслах (Тл). Напряженность магнитного поля не зависит, а магнитная индукция зависит от свойств окружающей среды.

Магнитный поток в магнитной цепи играет роль, аналогичную силе тока в электрической цепи. Во всех сечениях неразветвленной магнитной цепи магнитный поток Φ_m должен быть одинаковым.

Формула Гопкинсона (закон Ома для замкнутой магнитной цепи):

$$\Phi_m = \frac{\mathcal{E}_m}{R_m}, \quad (1.44)$$

где Φ_m - магнитный поток, постоянный вдоль каждого участка цепи,

\mathcal{E}_m - магнитодвижущая, или намагничивающая, сила,

R_m - полное магнитное сопротивление цепи.

Магнитное сопротивление участка цепи длиной l_i с постоянной площадью поперечного сечения S :

$$R_{mi} = \frac{l_i}{\mu\mu_0 S}, \quad (1.45)$$

где μ - относительная магнитная проницаемость данного участка цепи,
 μ_0 - магнитная постоянная.

Если S не постоянно, то

$$R_{mi} = \int_0^{l_i} \frac{dl}{\mu\mu_0 S}. \quad (1.46)$$

Общее (полное) магнитное сопротивление R_m последовательно соединенных участков магнитной цепи равно

$$R_m = \sum_{i=1}^n R_{mi}, \quad (1.47)$$

где n - число участков цепи.

При параллельном соединении n магнитных сопротивлений полное магнитное сопротивление R_m цепи равно:

$$R_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^n R_{mi}}. \quad (1.48)$$

1.4.1. Магнитное поле токов

Подобно тому, как в пространстве, окружающем электрические заряды, возникает электрическое поле с определенными физическими свойствами, так и в пространстве, окружающем электрические токи, возникает магнитное поле. Электрическое поле обнаруживается по силам, действующим на внесенные в него заряженные тела, а магнитное поле - по отклонению магнитной стрелки компаса или по силам, действующим на внесенные в магнитное поле проводники, по которым протекает ток. Например, два параллельных провода, по которым текут токи одного направления (рис. 1.11), взаимно притягиваются.

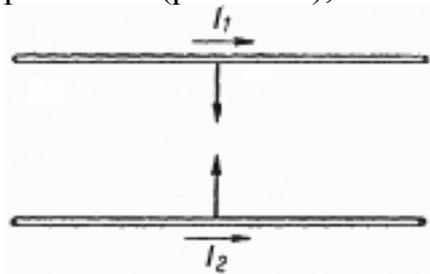


Рис. 1.11. Взаимное притяжение двух проводов с токами одного направления.

Для изучения свойств магнитного поля обычно пользуются магнитной стрелкой или элементарной рамкой. Последняя представляет собой замкнутый плоский контур, по которому течет ток и размеры которого малы по сравнению с расстоянием до проводников, создающих исследуемое магнитное поле.

Магнитное поле оказывает на рамку и магнитную стрелку ориентирующее действие. Например, в поле тока прямого длинного провода рамка располагается в плоскости, проходящей через провод (рис. 1.12); при изменении направления тока в рамке или проводе рамка поворачивается на 180° .

Это обстоятельство используют для характеристики направленности магнитного поля. За направление магнитного поля в месте расположения рамки принимают направление, вдоль которого располагается положительная нормаль к рамке. При этом положительной нормалью N к плоскости рамки считается направление поступательного движения буравчика при вращении его рукоятки в направлении протекания тока рамки.

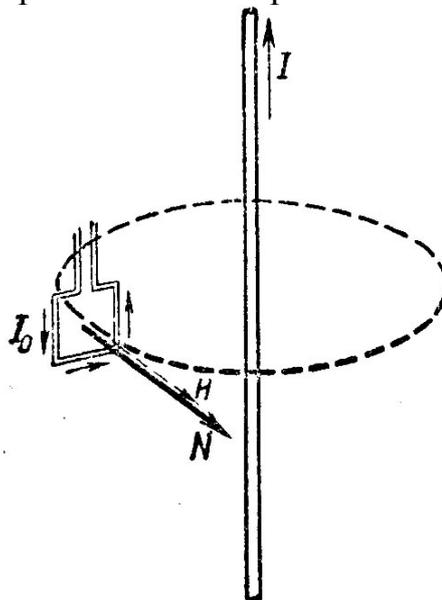


Рис. 1.12. Ориентирование рамки магнитным полем проводника с током

Элементарная рамка полезна и для количественной характеристики магнитного поля. Ориентирование рамки в магнитном поле происходит в результате действия на нее некоторого момента сил M , который достигает своего максимального значения, когда нормаль к рамке ориентирована перпендикулярно к направлению поля. Максимальное значение момента сил M_m , действующих на элементарную рамку, пропорционально площади рамки S , току рамки I_0 и некоторой величине H , характеризующей интенсивность магнитного поля,

$$M_m = HI_0S. \quad (1.49)$$

Данный момент сил называется магнитным моментом. Величину $H = M_m / I_0 S$ называют напряженностью магнитного поля.

Для создания геометрических образов магнитного поля используют линии напряженности магнитного поля, подразумевая под ними такие линии, в каждой точке которых вектор напряженности направлен по касательной. На рис. 1.13...1.17 приведены примеры расположения линий напряженности для некоторых часто встречающихся типов магнитных полей.

Линии напряженности магнитного поля являются замкнутыми кривыми. В этом их отличие от линий напряженности электрических полей, которые не замкнуты.

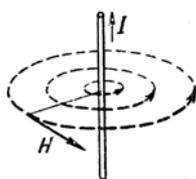


Рис. 1.13.

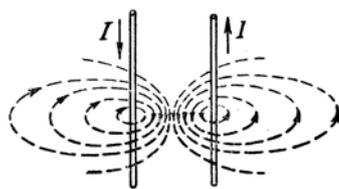


Рис. 1.14.

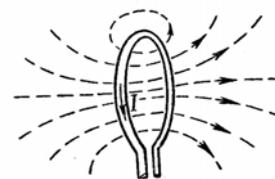


Рис. 1.15.

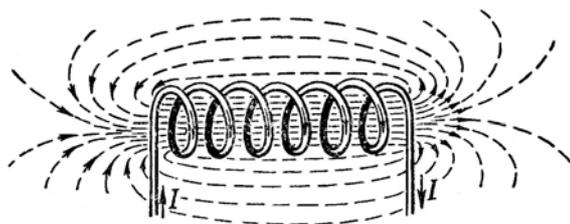


Рис. 1.16.

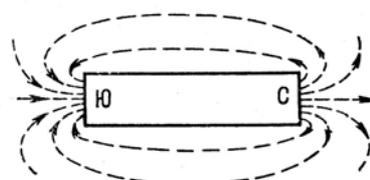


Рис. 1.17.

На рисунках: 1.13 - линии напряженности магнитного поля для прямолинейного проводника; 1.14 - для прямолинейных проводников с токами разных направлений; 1.15 - для кругового проводника; 1.16 - для тока в соленоиде; 1.17 - для постоянного магнита.

1.4.2. Закон Био – Савара - Лапласа

Магнитная индукция - физическая величина, характеризующая наряду с напряжённостями электрического и магнитного полей электромагнитное поле. Напряжённость магнитного поля, создаваемого всем проводником, зависит от размеров и формы этого проводника и определяется путем сложения напряжённостей всех элементарных отрезков dl проводника.

Закон Био - Савара - Лапласа устанавливает величину и направление элементарного вектора магнитной индукции dB в произвольной точке C магнитного поля, создаваемого в вакууме элементом проводника длиной dl с током I и численно равен:

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} d\varphi, \quad (1.50)$$

где dl - вектор элемента проводника, проведенный в направлении тока,

r - радиус-вектор, проведенный из этого элемента проводника в рассматриваемую точку поля,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная вакуума,

$d\varphi$ - угол, под которым виден из рассматриваемой точки поля элемент dl .

Вектор dB перпендикулярен к плоскости, в которой лежат векторы dl и r , и направлен таким образом, чтобы из его конца кратчайшее вращение вектора dl до совмещения с вектором r казалось происходящим против часовой стрелки (рис. 1.18).

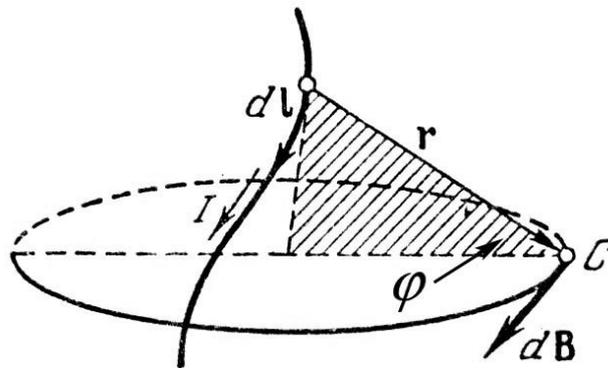


Рис. 1.18. К закону Био – Савара – Лапласа

1.4.3. Влияние вещества на магнитное поле

Вещества, оказывающие влияние на магнитное поле, называются магнетиками. Физической причиной этого влияния являются элементарные магнитные поля, создаваемые круговым движением электронов в атомах и молекулах магнетика. При отсутствии внешнего магнитного поля плоскости этих круговых токов расположены хаотично и суммарное магнитное поле равно нулю. Но при появлении внешнего магнитного поля \bar{H} все круговые токи ориентируются одинаково и создаваемое ими суммарное поле имеет отличную от нуля напряженность \bar{H}' , которая добавляется к напряженности \bar{H} внешнего магнитного поля.

Если проводники с током находятся не в вакууме, а в каком-либо веществе (магнетике), то это вещество намагничивается и магнитная индукция результирующего поля равна:

$$B = B_0 + B_{\text{внутр}}, \quad (1.51)$$

где B_0 - магнитная индукция внешнего намагничивающего поля,

$B_{\text{внутр}}$ - магнитная индукция поля, создаваемого намагниченным веществом.

В результате напряженность магнитного поля в магнетике $\bar{H} + \bar{H}'$ отличается от напряженности \bar{H} магнитного поля в вакууме, воздухе или другом немагнитном веществе.

В зависимости от величины относительной магнитной проницаемости μ , все вещества делятся на три группы.

1. Диамагнетики, вещества, у которых $\mu < 1$;
2. Парамагнетики, вещества с $\mu > 1$.
3. Ферромагнетики, вещества с $\mu \gg 1$.

К ферромагнетикам принадлежат железо, никель, кобальт и многие сплавы из неферромагнитных веществ. Для всех веществ, за исключением ферромагнитных, добавочная напряженность поля \bar{H}' пропорциональна напряженности \bar{H} внешнего магнитного поля и поэтому результирующая напряженность поля в веществе также пропорциональна напряженности \bar{H} :

$$\bar{H} + \bar{H}' = \mu' \bar{H} \quad (1.52)$$

Коэффициент пропорциональности μ' называется относительной магнитной проницаемостью вещества. Эта величина показывает, во сколько раз напряженность поля в данной магнетике больше, чем в вакууме. В парамагнетиках $\mu' > 1$, в диамагнетиках $\mu' < 1$. В вакууме и немагнитных веществах $\mu' = 1$.

В практике магнитное поле в веществе принято характеризовать не вектором $\mu' \bar{H}$, а вектором \bar{B} , называемым магнитной индукцией, в μ раз большим по модулю:

$$\bar{B} = \mu' \mu_0 \bar{H} \quad (1.53)$$

Величина $\mu = \mu' \mu_0$ носит название магнитной проницаемости и является важнейшим параметром вещества. Она является коэффициентом пропорциональности между \bar{B} и \bar{H} :

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (1.54)$$

1.4.4. Правило левой руки

Магнитное поле не оказывает действия на покоящиеся электрические заряды, но действует на движущиеся заряды. Сила F , действующая на участок проводника с током, помещенный в магнитное поле, пропорциональна величине тока I , длине проводника l и составляющей магнитной индукции B , перпендикулярной к току:

$$F = IlB \sin \alpha \quad (1.55)$$

Направление силы F определяется правилом левой руки (рис. 1.19): если нормальная к проводнику составляющая магнитной индукции B_n входит в ладонь левой руки, а четыре вытянутых пальца направлены вдоль тока I , то

отставленный большой палец указывает направление силы F в магнитном поле.

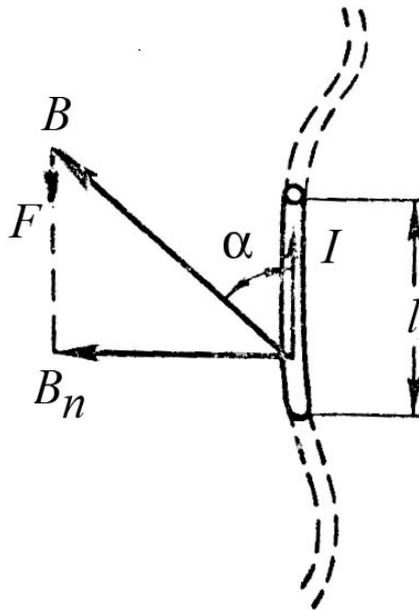


Рис. 1.19 Правило левой руки

1.4.5. Поток магнитной индукции

Для создания геометрических образов магнитного поля в веществе вводят понятие линий магнитной индукции, подразумевая под ними такие линии, в каждой точке которых вектор магнитной индукции B направлен по касательной к линии.

Линия магнитной индукции может дать представление лишь о направлении вектора B в различных точках пространства. Чтобы дать количественную характеристику поля в этих точках, через единицу поверхности, нормальной к вектору магнитной индукции B , проводят число линий индукции, равное численному значению индукции в пределах данной поверхности. В результате, чем больше магнитная индукция, тем гуще располагаются линии индукции.

В интегральной записи поток вектора магнитной индукции через поверхность S :

$$\Phi = \int_S \bar{B} d\bar{S}. \quad (1.56)$$

Магнитный поток измеряется в веберах (Вб). Скалярная запись выражения (1.56) определяет поток магнитной индукции через площадку S_n (рис. 1.20):

$$\Phi = BS_n = BS \cos \alpha = B_n S, \quad (1.57)$$

где α - угол между вектором B и нормалью n к площадке S ;

B_n - проекция вектора B на нормаль n к площадке S .

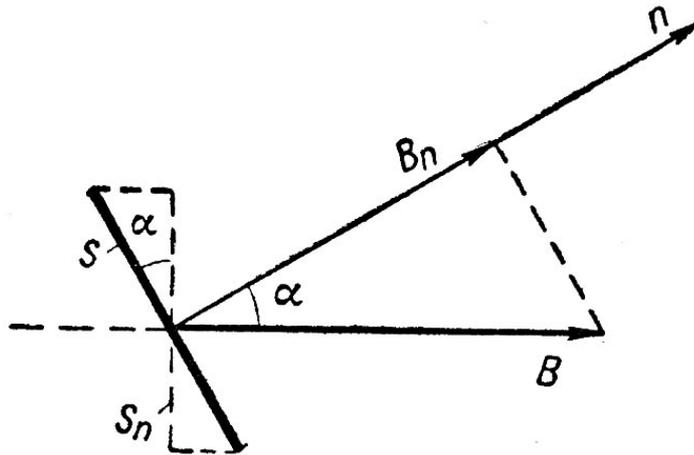


Рис. 1.20. К определению потока магнитной индукции через площадку S

1.4.6. Свойства ферромагнитных материалов

Поместим ферромагнитный материал внутри катушки с током. Сначала, с увеличением напряженности намагничивающего поля, магнитная индукция быстро возрастает. Затем, из-за насыщения материала, при дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля магнитная индукция почти не меняется. При уменьшении напряженности намагничивающего поля кривая размагничивания не совпадает с кривой намагничивания из-за явления гистерезиса. Явление гистерезиса заключается в том, что изменение магнитной индукции запаздывает от изменения намагничивающего поля. Кривая зависимости $B = f(H)$, получающаяся при циклическом перемагничивании ферромагнитного материала, называется петлей гистерезиса. Семейство таких кривых изображено на рис. 1.21. Чем больше площадь петли, тем больше потери на перемагничивание, нагревающие материал.

Значение магнитной индукции при напряженности намагничивающего поля, равном нулю, называется остаточной магнитной индукцией B_r , или остаточной намагниченностью. Напряженность магнитного поля H_c при $B = 0$ называется коэрцитивной силой. Ферромагнитные материалы с большим значением коэрцитивной силы ($H_c > 4000 \text{ A/м}$) называются магнитотвердыми. Из этих материалов изготавливают постоянные магниты. Ферромагнитные материалы с малым значением коэрцитивной силы ($H_c < 200 \text{ A/м}$) называются магнитомягкими. Эти материалы используют в магнитопроводах электрических машин и трансформаторов.

Таким образом, зависимости $B = f(H)$ у ферромагнитных материалов нелинейные. Эти зависимости приводятся в справочниках в табличной форме или в виде кривых, называемых кривыми намагничивания.

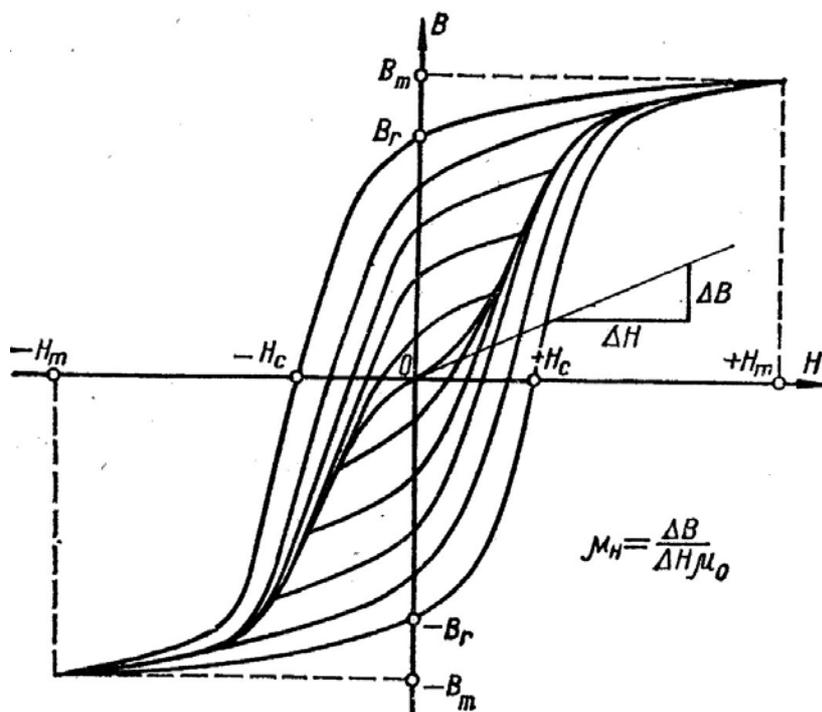


Рис. 1.21. Семейство петель гистерезиса

1.4.7. Расчет магнитных цепей

Основным законом, используемым при расчетах магнитных цепей, является закон полного тока.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I. \quad (1.58)$$

Он формулируется следующим образом: линейный интеграл вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру равен алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром. Если контур интегрирования охватывает катушку с числом витков W , через которую протекает ток I , то алгебраическая сумма токов $\sum I = I \cdot W = F$, где F - магнитодвижущая сила.

Обычно контур интегрирования выбирают таким образом, чтобы он совпадал с силовой линией магнитного поля, тогда векторное произведение в формуле (1.58) можно заменить произведением скалярных величин $H \cdot dl$. В практических расчетах интеграл $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l}$ заменяют суммой $\sum H_k \cdot l_k$ и выбирают отдельные участки магнитной цепи таким образом, чтобы H_1, H_2, \dots вдоль этих участков можно было считать приблизительно постоянными. При этом (1.58) преобразуется в

$$H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + \dots + H_n \cdot l_n = \sum I \cdot W = F, \quad (1.59)$$

где l_1, l_2, \dots, l_n - длины участков магнитной цепи;

$H_1 \cdot l_1, H_2 \cdot l_2, \dots, H_n \cdot l_n$ - магнитные напряжения участков цепи. Магнитным сопротивлением участка магнитной цепи называется отношение магнитного напряжения рассматриваемого участка к магнитному потоку в этом участке:

$$R_M = \frac{H \cdot l}{\Phi} = \frac{H \cdot l}{H \cdot \mu \cdot S} = \frac{l}{\mu \cdot S}, \quad (1.60)$$

где S - площадь поперечного сечения участка магнитной цепи,
 l - длина участка.

Второй закон Кирхгофа для разветвленных магнитных цепей: в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной магнитной цепи, алгебраическая сумма произведений магнитных потоков Φ_{mi} на магнитные сопротивления R_{mi} соответствующих участков цепи равна алгебраической сумме приложенных в этом контуре магнитодвижущих сил \mathcal{E}_{mi} :

$$\sum_{i=1}^k \Phi_{mi} R_{mi} = \sum_{i=1}^k \mathcal{E}_{mi}, \quad (1.61)$$

где k - число участков магнитной цепи, составляющих замкнутый контур, а Φ_{mi} и \mathcal{E}_{mi} считают положительными, если направления линий индукции соответствующих им магнитных полей совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура.

Рассмотрим расчет магнитной цепи, изображенной на рис. 1.22. Ферромагнитный магнитопровод имеет одинаковую площадь поперечного сечения S , l_{cp} - длина средней силовой линии магнитного поля в магнитопроводе; δ - толщина воздушного зазора. На магнитопроводе размещена обмотка, по которой протекает ток I .

Прямая задача расчета магнитной цепи заключается в том, что задан магнитный поток Φ и требуется определить магнитодвижущую силу F . Определим магнитную индукцию в магнитопроводе:

$$B = \frac{\Phi}{S}. \quad (1.62)$$

По кривой намагничивания найдем значение напряженности магнитного поля H , соответствующее величине B . Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре:

$$H_1 = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{4\pi \cdot 10^{-7}}. \quad (1.63)$$

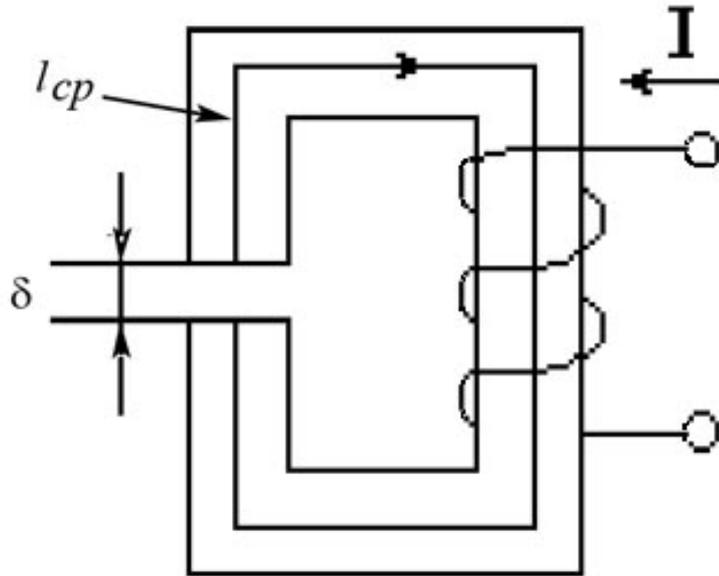


Рис. 1.22. К расчету магнитной цепи

Магнитодвижущая сила обмотки

$$F = H \cdot l_{cp} + H_1 \cdot \delta. \quad (1.64)$$

При обратной задаче расчета магнитной цепи по заданному значению магнитодвижущей силы требуется определить магнитный поток. Расчет такой задачи выполняется с помощью магнитной характеристики цепи $F = f(\Phi)$.

Для построения такой характеристики необходимо задаться несколькими значениями Φ и найти соответствующие значения F . С помощью магнитной характеристики по заданной магнитодвижущей силе определяется магнитный поток.

2. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

2.1. Электромагнитная индукция

При движении проводника в магнитном поле в проводнике возникает электродвижущая сила индукции, а если при этом контур проводника замкнут, то в нем появляется электрический ток индукции. Это явление электромагнитной индукции возникает всегда при пересечении движущимся проводником магнитных силовых линий, а также при любом изменении потока магнитной индукции через контур проводника. ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения числа линий магнитной индукции, охватываемых контуром проводника, т. е. пропорциональна скорости изменения потока магнитной индукции через контур проводника:

$$E = \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.1)$$

где Φ - магнитный поток.

Таким образом, для электромагнитной индукции необходимо пересечение проводником линий магнитной индукции; при движении проводника вдоль линий магнитной индукции ЭДС индукции равна нулю.

Направление индукционного тока может быть определено по следующему правилу: индукционный ток имеет такое направление, при котором он создает через площадь, ограниченную контуром, собственный поток магнитной индукции, стремящийся компенсировать то изменение потока магнитной индукции, которое его вызывает.

2.1.1. Единица измерения потока магнитной индукции

Если замкнутый проводник, в котором возникла ЭДС индукции E , имеет сопротивление R , то

$$I \cdot R = \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.2)$$

или

$$d\Phi = I \cdot R dt = q \cdot R. \quad (2.3)$$

На этом основании за единицу потока магнитной индукции принимают такой поток через контур проводника, при убывании которого до нуля через поперечное сечение проводника, имеющего сопротивление 1 Ом, протекает количество электричества, равное 1 Кл. Эта единица носит название вебер (Вб).

Практическая единица магнитной индукции в системе СИ есть тесла, т.е. вебер на квадратный метр (Тл).

2.1.2. Самоиндукция

Электромагнитная индукция вызывается изменением потока магнитной индукции через контур проводника. При этом безразлично, чем обусловлено это изменение. Оно, к примеру, может быть вызвано непостоянством тока, текущего через проводник. Если по проводу течет непостоянный ток, то магнитное поле этого тока также непостоянно. Следовательно, меняется поток магнитной индукции через контур проводника, что ведет к возникновению в контуре ЭДС индукции. Таким образом, изменение тока в контуре является причиной возникновения ЭДС индукции в этом же самом контуре. Это явление называется явлением самоиндукции.

Проводники различной формы обладают различной способностью обнаруживать явление самоиндукции. Наиболее характерно это явление протекает в катушках индуктивности, которые представляют собой провода, намотанные в виде витков. Способность контура к самоиндукции характеризуется коэффициентом самоиндукции, который может быть определен следующим образом.

Согласно закону Био – Савара - Лапласа ток, протекающий по витку проводника, создает магнитное поле, напряженность и индукция которого пропорциональны току I . Следовательно, поток магнитной индукции Φ , пронизывающий виток, пропорционален току, текущему по витку:

$$\Phi = L \cdot I. \quad (2.4)$$

Коэффициент пропорциональности L между током в проводнике и величиной магнитного потока, созданного этим током, называется коэффициентом самоиндукции.

Чем больше коэффициент самоиндукции, тем больше величина ЭДС самоиндукции:

$$E = \frac{d\Phi}{dt} = L \frac{dI}{dt}. \quad (2.5)$$

Величина коэффициента самоиндукции определяется геометрической формой и размерами проводника.

Практическая единица коэффициента самоиндукции, или индуктивность катушки, в системе СИ называется генри (Гн) и равна коэффициенту самоиндукции такого контура, который пронизывается потоком магнитной индукции в 1 Вб при токе в нем 1 А.

2.1.3. Взаимная индукция

Взаимной индукцией называется возникновение ЭДС в одном проводнике вследствие изменения величины тока в другом проводнике или вследствие изменения взаимного расположения проводников. Это явление объясняется тем, что при изменении тока в одном из проводников или при изменении их взаимного расположения происходит изменение потока магнитной индукции, созданного током первого проводника и проходящего через контур второго

проводника, что вызывает возникновение ЭДС индукции во втором проводнике.

Обозначим через Φ_1 весь поток магнитной индукции, создаваемый током контура 1, а через $\Phi_{1,2}$ - часть этого потока, пронизывающую контур 2 (рис. 2.1, а). Поток $\Phi_{1,2}$ создан током I_1 и поэтому пропорционален этому току:

$$\Phi_{1,2} = M_{1,2} I_1. \quad (2.6)$$

Коэффициент пропорциональности $M_{1,2}$ называется коэффициентом взаимной индукции; он численно равен потоку магнитной индукции, который создается током в 1 А одного из контуров и пронизывающим другой контур.

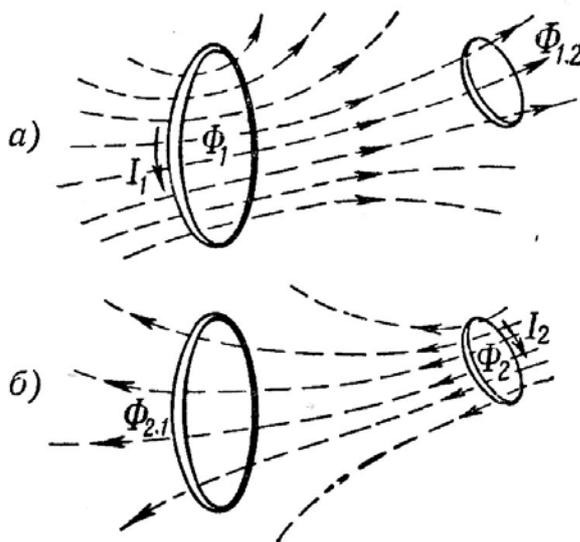


Рис. 2.1. Взаимоиндукция двух контуров

Изменение тока I_1 приводит к изменению потока $\Phi_{1,2}$ и появлению ЭДС взаимной индукции во втором контуре величиной

$$E = \frac{d\Phi_{1,2}}{dt} = M_{1,2} \frac{dI_1}{dt}. \quad (2.7)$$

Если за основной контур, создающий магнитное поле, считать контур 2 (рис. 2.1, б), то контур 1 пронизывается потоком

$$\Phi_{2,1} = M_{2,1} I_2, \quad (2.8)$$

изменение которого вызывает появление в контуре 1 ЭДС взаимной индукции

$$E_1 = \frac{d\Phi_{2,1}}{dt} = M_{2,1} \frac{dI_2}{dt}. \quad (2.9)$$

В теоретической электротехнике доказывается, что

$$M_{1,2} = M_{2,1} = M. \quad (2.10)$$

Величина коэффициента взаимной индукции M двух контуров определяется геометрической формой, размерами и относительным положением этих контуров.

Единица измерения коэффициента взаимоиндукции аналогична единице измерения коэффициента самоиндукции.

2.2. Однофазные цепи переменного тока

Переменный ток имеет огромное практическое значение. Почти вся электроэнергия вырабатывается в виде энергии синусоидального переменного тока.

Переменный ток возникает в результате действия наведенной переменной ЭДС и имеет переменные величину и направление. Переменная ЭДС возникает в результате изменения направления движения провода в магнитном поле, но, в общем, она получается при движении провода по окружности между полюсами.

Частота тока (рис. 2.2)

$$f = \frac{1}{T}, \text{Гц}. \quad (2.11)$$

где T - период, с.

Угловая частота

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.12)$$

В электрических машинах, ротор которых имеет p пар полюсов, частота тока будет определяться по формуле:

$$f = \frac{\pi n}{60}, \text{Гц}, \quad (2.13)$$

где n - частота вращения ротора, об/мин.

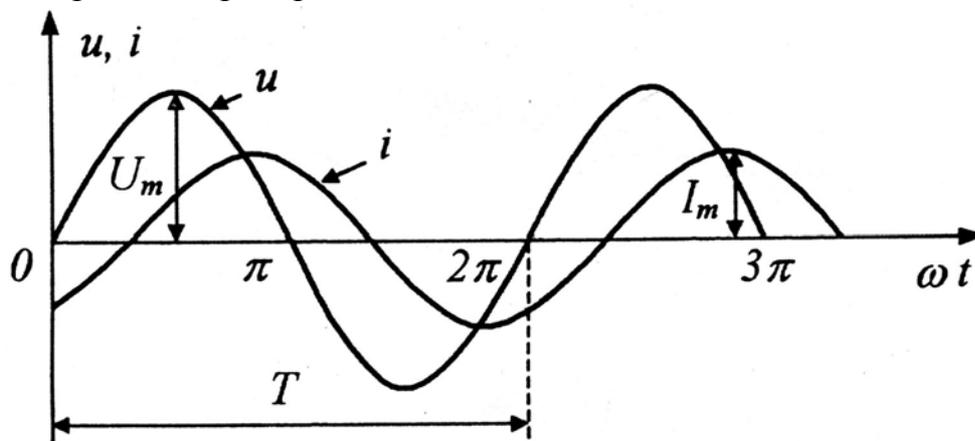


Рис. 2.2. Временные диаграммы синусоидального напряжения и тока

Значения синусоидального тока и напряжения в любой момент времени называют мгновенным, и определяют по формулам:

$$i = I_m \sin \omega t, \quad u = U_m \sin \omega t, \quad (2.14)$$

где I_m и U_m - амплитудные значения тока и напряжения.

Действующее значение синусоидального тока и напряжения

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.15)$$

Среднее значение синусоидального тока и напряжения

$$I_{cp} = \frac{2I_m}{\pi}, \quad U_{cp} = \frac{2U_m}{\pi}. \quad (2.16)$$

Индуктивное сопротивление

$$x_L = 2\pi fL = \omega L, \quad \text{Ом}, \quad (2.17)$$

где L - индуктивность, Гн.

Емкостное сопротивление

$$x_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}, \quad \text{Ом}, \quad (2.18)$$

где C - емкость, Ф.

Активная мощность P физически представляет собой энергию, которая выделяется в единицу времени, как правило, за период, в виде теплоты на участке цепи с активным сопротивлением R :

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R, \quad \text{Вт}. \quad (2.19)$$

Реактивная мощность Q пропорциональна среднему за четверть периода значению энергии, которая отдается источником питания на создание переменной составляющей электрического и магнитного поля индуктивности и емкости. За один период переменного тока электрическая энергия дважды отдается генератором в цепь и дважды он получает ее обратно, т.е. реактивная мощность является энергией, которой обмениваются генератор и потребитель

$$Q = (U_L - U_C) = UI \sin \varphi = I^2 x, \quad \text{ВАр}. \quad (2.20)$$

Полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI, \quad \text{ВА} \quad (2.21)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (2.22)$$

В цепи переменного тока практически постоянно существует сдвиг фаз между напряжением и током, так как к ней подключены индуктивные (дроссели, трансформаторы, электрические машины и главным образом асинхронные двигатели) и емкостные (конденсаторы, кабели и др.) элементы.

При наличии в цепи индуктивных элементов общий ток цепи i_L отстает от напряжения u (рис. 2.3, угол φ_1), если же в цепи имеются только емкостные элементы, тогда общий ток цепи i_C опережает напряжение (рис. 2.3, угол φ_2). При наличии в цепи только элементов с активным сопротивлением, соответственно ток и напряжение цепи совпадают по фазе.

В те части периода, когда реактивный ток цепи нарастает, увеличивается и магнитная энергия. В это время электрическая энергия превращается в магнитную энергию. Когда же реактивный ток цепи уменьшается, магнитная энергия превращается в электрическую и возвращается в питающую сеть. В активных элементах цепи, т.е. элементах, которые имеют активное сопротивление R , электрическая энергия переходит в тепло или свет, а в двигателе она преобразуется в механическую энергию. Таким образом, элементы с активным сопротивлением и двигатели преобразуют электрическую энергию в тепловую, и соответственно механическую. Индуктивные и емкостные элементы не потребляют электрическую энергию, так как в момент свертывания магнитного и электрического полей она возвращается в питающую сеть.

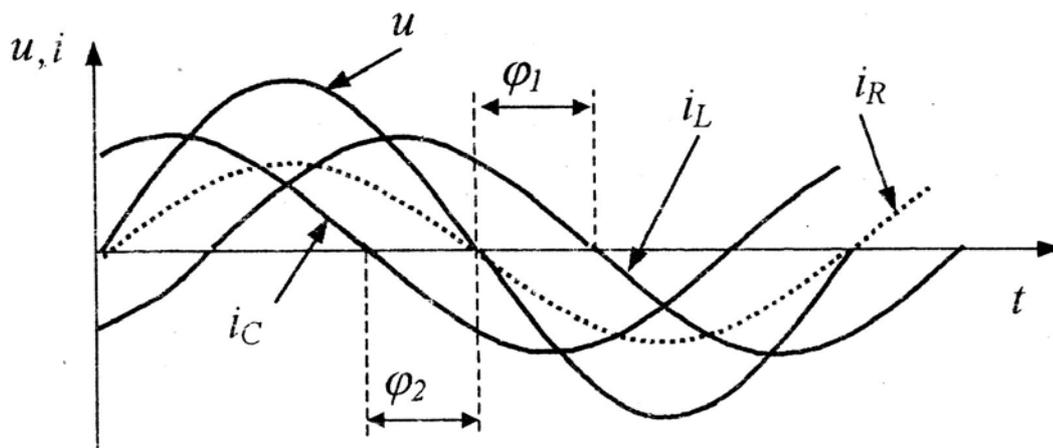


Рис. 2.3. Графики мгновенных значений напряжения и токов

Чем больше индуктивность цепи, тем больше ток i_L и сдвиг по фазе. При большом фазовом сдвиге меньше коэффициент мощности $\cos \varphi$ и активная (полезная) мощность ($P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi$).

При одинаковой, полной мощности S , которую, например, генератор отдает в сеть, активная мощность P будет меньше при большом угле φ , т.е. при меньших значениях коэффициента мощности $\cos \varphi$. Уменьшение угла сдвига фаз, и соответственно результирующего тока цепи, осуществляется за счет параллельного соединения, конденсаторов к индуктивным элементам цепи.

Простейшей цепью переменного тока является цепь, содержащая активное сопротивление (рис. 2.4, а). Ток в такой цепи определяется по формуле:

$$i_R = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t. \quad (2.23)$$

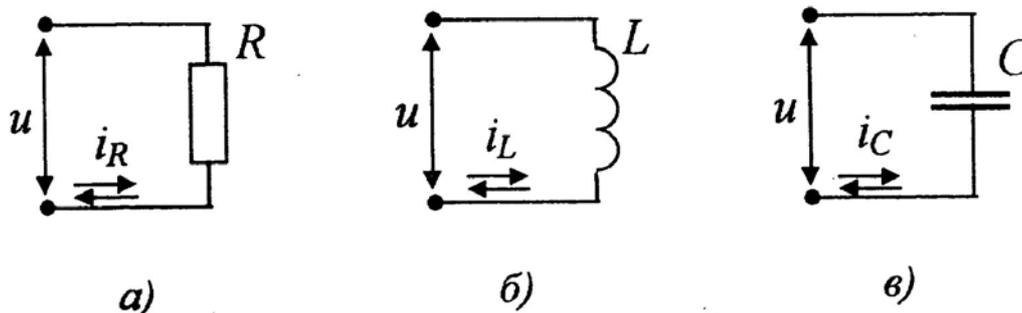


Рис. 2.4. Простейшие электрические цепи переменного тока

Ток и напряжение в цепи с активным сопротивлением совпадают по фазе (рис. 2.3). Активная мощность цепи вычисляется так же, как и мощность постоянного тока, т.е. используются действующие значения напряжения и тока:

$$P = UI = I^2 R, \text{ Вт}. \quad (2.24)$$

В цепи переменного тока практически постоянно существует сдвиг фаз между напряжением и током, так как к ней подключены индуктивные (дроссели, трансформаторы, электрические машины и главным образом асинхронные двигатели) и емкостные (конденсаторы, кабели и др.) элементы.

При наличии в цепи индуктивного элемента (рис. 2.4, б) общий ток цепи i_L отстает от напряжения и (рис. 2.3, угол φ_1).

Индуктивное сопротивление цепи определяется по (2.17).

Когда ток i_L и напряжение u совпадают по фазе (рис. 2.3), т.е. при положительном значении мощности, то она потребляется индуктивностью, при отрицательном отдается обратно источнику. Такое состояние цепи характеризуется так называемой реактивной мощностью, величина которой определяется по формуле:

$$Q_L = I^2 \omega L = U_L I. \quad (2.25)$$

Если же в цепи имеется только емкостной элемент (рис. 2.4, в), тогда общий ток цепи i_C опережает напряжение (рис. 2.3, угол φ_2).

Емкостное сопротивление цепи определяется по (2.18), а реактивная мощность такой цепи определяется по формуле

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega C} = U_C I. \quad (2.26)$$

Энергетическое состояние цепи, содержащей емкость, характеризуется обменом энергии между конденсатором и источником.

Таким образом, индуктивное и емкостное сопротивления называют реактивными. В связи с различием фазовых сдвигов тока и напряжения на ин-

дуктивности и емкости условно принято считать индуктивное сопротивление потребителем, а емкостное - генератором реактивной мощности.

2.3. Резонансные явления в цепях переменного тока

Для последовательного соединения резистора, катушки индуктивности и конденсатора (рис. 2.5, а) справедливы зависимости:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} = IZ. \quad (2.27)$$

В рассматриваемой цепи при равенстве реактивных сопротивлений x_L и x_C имеет место так называемый резонанс напряжений. Так как эти сопротивления зависят от частоты, резонанс наступает при некоторой резонансной частоте ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.28)$$

Общее сопротивление цепи в этом случае минимальное и чисто активное $Z = R$. При $\omega < \omega_0$ нагрузка имеет активно-емкостный характер, при $\omega > \omega_0$ - активно-индуктивный.

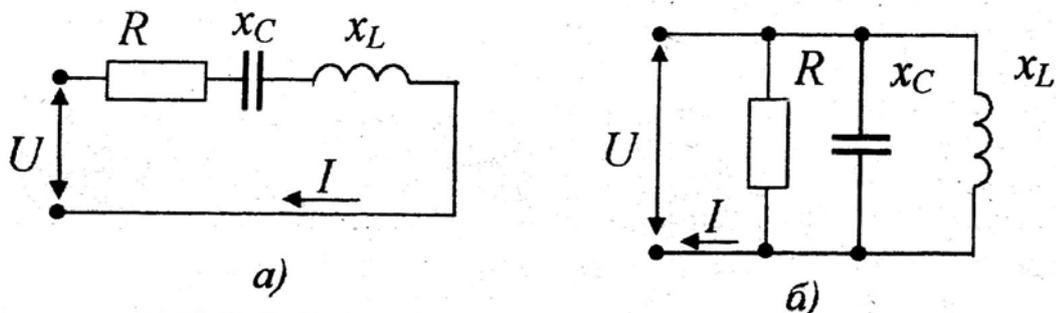


Рис. 2.5. Последовательное (а) и параллельное (б) соединение элементов

Следует отметить, что резкому увеличению тока в цепи при резонансе соответствует возрастание U_L и U_C . Эти напряжения могут стать значительно больше напряжения U , приложенного к зажимам цепи, поэтому резонанс напряжений - явление, опасное для электроэнергетических установок.

Токи в ветвях параллельно соединенных элементов цепи (рис. 2.5, б) имеют соответствующий фазовый сдвиг по отношению к общему напряжению цепи. Поэтому общий ток цепи равен сумме токов отдельных ее ветвей с учетом фазовых сдвигов и определяется по формуле:

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}. \quad (2.29)$$

При равенстве реактивных сопротивлений x_L и x_C в цепи с параллельным соединением элементов возникает резонанс токов. Ток при резонан-

се достигает максимального значения, а коэффициент мощности максимального ($\cos \omega = 1$). Значение резонансной частоты определяется по формуле:

$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.30)$$

Токи в ветвях, содержащих L и C при резонансе могут быть больше общего тока цепи. Индуктивный и емкостной токи противоположны по фазе, равны по значению и по отношению к источнику электроэнергии взаимно компенсируются. Т.е. в цепи происходит обмен энергией между индуктивной катушкой и конденсатором.

Режим, близкий к резонансу токов, широко используется для повышения коэффициента мощности потребителей электроэнергии. Это дает значительный экономический эффект из-за разгрузки проводов, снижения потерь, экономии материалов и электроэнергии.

2.4. Методы анализа и расчета электрических цепей переменного тока

2.4.1. Метод комплексных амплитуд (символический метод)

Сущность комплексного метода. Комплексный метод основывается на исчислении комплексных чисел и соответствующей замене мгновенных значений синусоидальных величин комплексами. При этом осуществляется переход от дифференциальных уравнений, составленных для рассматриваемой цепи по закону Ома и правилам Кирхгофа, к алгебраическим уравнениям для комплексных величин. Полученная система алгебраических уравнений решается относительно неизвестных комплексных параметров, на пример комплексов токов. Затем осуществляется переход от комплексных величин к соответствующим им мгновенным значениям. Таким образом, сложная проблема решения дифференциальных уравнений заменяется более простой задачей решения алгебраических уравнений, а расчет линейных электрических схем гармонического тока в установившемся режиме становится аналогичен расчету электрических схем постоянного тока. Комплексное представление синусоидальных электрических величин сочетает наглядность векторных диаграмм с возможностью проведения точных аналитических расчетов цепей и поэтому наиболее часто применяется на практике.

Рис. 2.6, а показывает, что синусоидальная ЭДС может быть изображена в виде вектора длиной E_m , вращающегося против часовой стрелки с угловой скоростью ω , рад/с. При этом угол между вектором и вертикальной осью равен ωt , а проекции вектора на вертикальную ось:

$$E = E_m \cos \omega t, \quad (2.31)$$

соответствуют мгновенным значениям синусоидальной ЭДС.

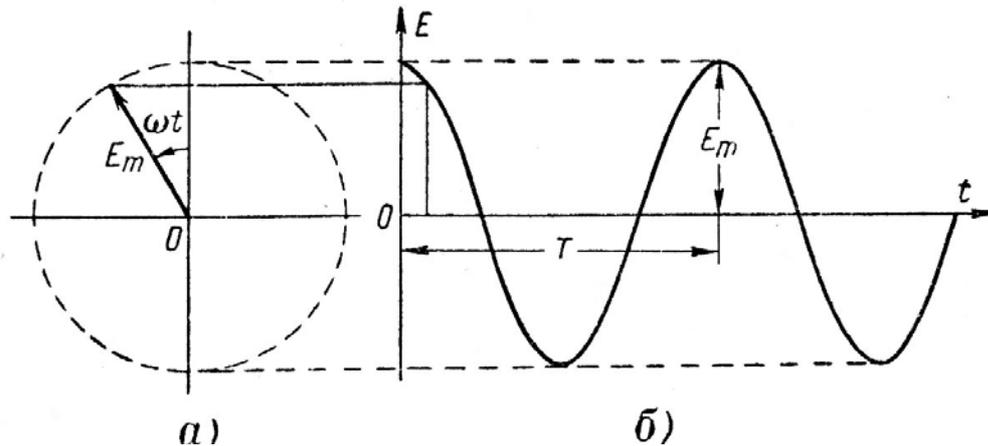


Рис. 2.6. Графическое изображение синусоидальной ЭДС

Это позволяет принять вертикальную ось за действительную ось комплексной плоскости, а горизонтальную ось - за мнимую ось и представить вектор синусоидальной ЭДС в виде комплексного числа:

$$\dot{E} = E_m e^{j\omega t} = E_m (\cos \omega t + j \sin \omega t), \quad (2.32)$$

где $j = \sqrt{-1}$ называется мнимой единицей.

Модуль этого комплексного числа $|\dot{E}| = E_m$ определяет амплитуду колебания ЭДС, а аргумент ωt - фазу колебания, которая измеряется в радианах, градусах или долях периода колебаний и определяет состояние колебательного процесса в данный момент времени.

Ток I , протекающий по цепи под действием ЭДС E , также может быть представлен комплексным числом:

$$\dot{I} = I_m e^{j(\omega t - \varphi)}, \quad (2.33)$$

с аргументом, отличающимся на угол φ , поскольку в общем случае ЭДС и ток в цепи переменного тока могут изменяться не синфазно, а быть сдвинутыми по фазе на угол φ .

Если в комплексах \dot{E} и \dot{I} опустить множитель $e^{j\omega t}$, то они будут называться комплексными амплитудами. Точка над буквой ставится для того, чтобы отличить комплексные амплитуды от обычных амплитудных значений.

Переход от комплексных амплитуд к мгновенным значениям, как это следует из предыдущего, сводится к добавлению множителя $e^{j\omega t}$ и к определению действительной части полученного комплекса:

$$E = \operatorname{Re}(\dot{E}). \quad (2.34)$$

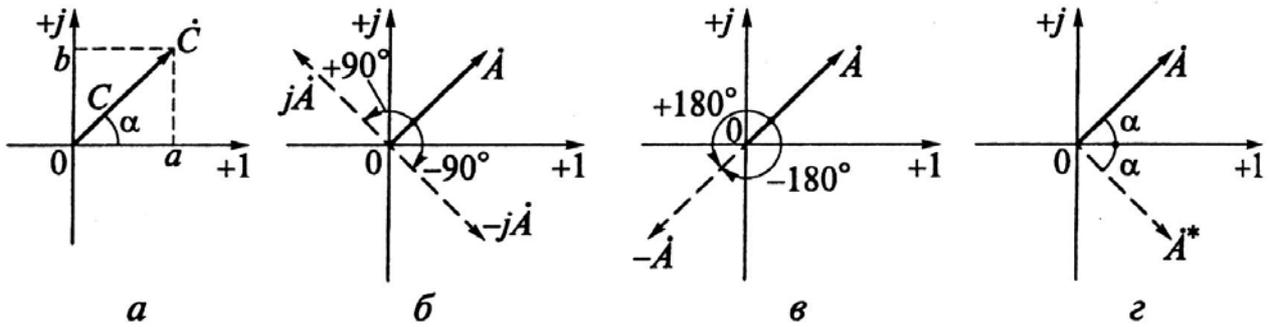


Рис. 2.7. Свойства комплексных чисел:

a - представление комплексного числа;

б - умножение на j ;

в - умножение на (-1) ;

г - умножение на сопряженное комплексное число

Комплексным числом называют сумму действительного и мнимого чисел, например $a \pm jb$, где a и b - действительные числа; j - мнимая единица.

Комплексное число можно представить в виде вектора на комплексной плоскости (рис. 2.7, *a*), ось абсцисс которой называется действительной осью, а ось ординат - мнимой. При этом действительная ось обозначается через сокращение Re (от англ. real - реальный), а мнимая - Im (от англ. imaginary - мнимый).

Существует показательная, тригонометрическая и алгебраическая формы аналитической записи комплексного числа:

$$C = Ce^{j\alpha} = C(\cos \alpha + j \sin \alpha) = a + jb. \quad (2.35)$$

Модуль комплексного числа C равен корню квадратному из суммы квадратов действительной и мнимой частей:

$$C = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (2.36)$$

а аргумент комплексного числа (угол наклона вектора к мнимой оси на комплексной плоскости) равен арктангенсу отношения мнимой части к действительной:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{b}{a}. \quad (2.37)$$

Показательная и алгебраическая формы являются основными, а тригонометрическая - вспомогательной, обеспечивающей переход от одной основной формы к другой. Для удобства перехода используют формулу Эйлера:

$$Ce^{\pm j\alpha} = C(\cos \alpha \pm j \sin \alpha). \quad (2.38)$$

2.4.2. Свойства комплексных чисел

1. Умножение комплекса на j означает поворот соответствующего ему вектора на комплексной плоскости на угол $\pi/2$ против часовой стрелки (рис. 2.7, б):

$$\dot{A}j = \dot{A}e^{j\frac{\pi}{2}}. \quad (2.39)$$

Пользуясь формулой Эйлера, получим

$$e^{j\frac{\pi}{2}} = \cos\frac{\pi}{2} + j\sin\frac{\pi}{2} = j. \quad (2.40)$$

Следствие. Умножение комплекса на $-j$ соответствует повороту на угол $-\pi/2$.

2. Умножение комплекса на -1 означает поворот соответствующего ему вектора на комплексной плоскости на угол π (направление поворота безразлично) (рис. 2.7, в):

$$-\dot{A} = \dot{A}e^{\pm j\pi}. \quad (2.41)$$

Пользуясь формулой Эйлера, имеем

$$e^{\pm j\pi} = (\cos\pi \pm j\sin\pi) = -1. \quad (2.42)$$

3. Умножение комплекса на сопряженный комплекс (рис. 2.7, г). Если $\dot{A} = a + jb$, то сопряженным ему называется комплекс $\dot{A}^* = a - jb$. Следовательно, $\dot{A} \cdot \dot{A}^* = a^2 + b^2$.

Следует отметить, что при операциях сложения (вычитания) комплексных чисел необходимо использовать алгебраическую форму записи для слагаемых. Соответственно при операции умножения комплексных чисел целесообразно применять показательную форму:

$$\dot{A}_1 \cdot \dot{A}_2 = A_1 e^{j\alpha_1} \cdot A_2 e^{j\alpha_2} = A_1 A_2 e^{j(\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (2.43)$$

При расчете цепей переменного тока комплексным методом мгновенные значения источников ЭДС, токов и напряжений в цепи заменяют соответствующими комплексными значениями:

$$\begin{aligned} e &= E_m \sin(\omega t + \varphi) \rightarrow \dot{E}_m = E_m e^{j\varphi}; \\ u &= U_m \sin(\omega t + \beta) \rightarrow \dot{U}_m = U_m e^{j\beta}; \\ i &= I_m \sin(\omega t + \alpha) \rightarrow \dot{I}_m = I_m e^{j\alpha}. \end{aligned} \quad (2.44)$$

В электротехнических расчетах часто применяют комплексы действующих величин и полярную форму записи комплексных чисел:

$$\dot{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \varphi. \quad (2.45)$$

В этом случае результаты расчетов напряжений, токов и мощностей непосредственно сравнивают с показаниями приборов.

Для примера, синусоидальные функции переводят в изображающие их комплексы следующим образом:

$$u = 150 \sin(\omega t + 240^\circ) \rightarrow \dot{U}_m = 150 e^{j240^\circ} = -150 e^{j60^\circ};$$

$$i = 5 \sin \omega t \rightarrow \dot{I} = \frac{5}{\sqrt{2}} e^0 = \frac{5}{\sqrt{2}}.$$

Для перехода от комплексов к соответствующим мгновенным значениям необходимо выполнить следующие операции:

$$\dot{U} = 70,7 e^{j75^\circ} \rightarrow u = 70,7 \sqrt{2} \sin(\omega t + 75^\circ);$$

$$\dot{I} = 10 e^{-j35^\circ} \rightarrow i = 10 \sqrt{2} \sin(\omega t - 35^\circ).$$

Комплексные напряжения реактивных элементов. При расчете цепей переменного тока также возникает необходимость описывать комплексы падения напряжения на элементах L и C .

Для катушки индуктивности L имеем:

$$U_L = L \frac{di}{dt},$$

а для конденсатора

$$U_C = \frac{1}{C} \int idt.$$

Для соответствующих комплексов U_L и U_C получаем:

$$\dot{U}_L = Lj\omega\dot{I} = jx_L\dot{I} \rightarrow U_L = L \frac{di}{dt}; \quad (2.46)$$

$$\dot{U}_C = \frac{1}{Cj\omega}\dot{I} = \frac{1}{j}x_C\dot{I} = -jx_C\dot{I} \rightarrow U_C = \frac{1}{C} \int idt, \quad (2.47)$$

где $jx_L = j\omega L$ и $jx_C = -j \frac{1}{\omega \cdot C}$ - реактансы индуктивности и емкости соответственно.

2.4.3. Закон Ома и правила Кирхгофа в комплексной форме

При расчете цепей переменного тока с одним источником удобно применять закон Ома. Можно сразу записать решения для искомым токов. Однако закон Ома применим в цепях как для амплитудных и действующих величин, так и для мгновенных значений напряжений и токов. При использовании комплексной формы записи закон Ома также применим, и позволяет легко вычислять токи и напряжения в символической форме.

Рассмотрим это на примере (рис. 2.8).

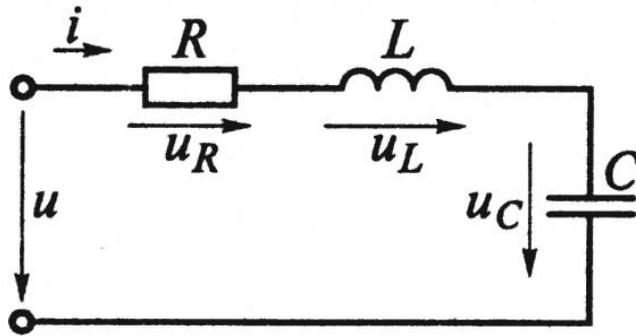


Рис. 2.8. К закону Ома в комплексной форме

Пусть к последовательно соединенным элементам цепи R , L , C приложено напряжение $u = U_m \sin \omega t$; $x_L = \omega L$; $x_C = \frac{1}{\omega C}$. Найдём значение тока в цепи.

По второму правилу Кирхгофа:

$$u = u_R + u_L + u_C,$$

где $u_R = iR$; $u_L = L \frac{di}{dt}$; $u_C = \frac{1}{C} \int idt$.

Выполнив преобразования, получаем

$$U_m \sin \omega t = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt. \quad (2.48)$$

Зададим ток в цепи

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.49)$$

и перейдем от мгновенного значения тока в формуле (2.49) к соответствующему комплексному значению

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\varphi}.$$

Подставим комплексное значение тока в выражение (2.48) и выполним преобразования:

$$\begin{aligned} R\dot{I}_m + jx_L\dot{I}_m - jx_C\dot{I}_m &= \dot{U}_m; \\ \dot{I}_m(R + jx_L - jx_C) &= \dot{U}_m. \end{aligned}$$

Отсюда искомое комплексное значение тока:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{R + j(x_L - x_C)} = \frac{\dot{U}_m}{Z},$$

где комплекс полного сопротивления RLC - цепи:

$$\dot{Z} = R + j(x_L - x_C) = R + jx.$$

На рис. 2.9 представлены векторные диаграммы на комплексной плоскости, иллюстрирующие рассматриваемый случай.

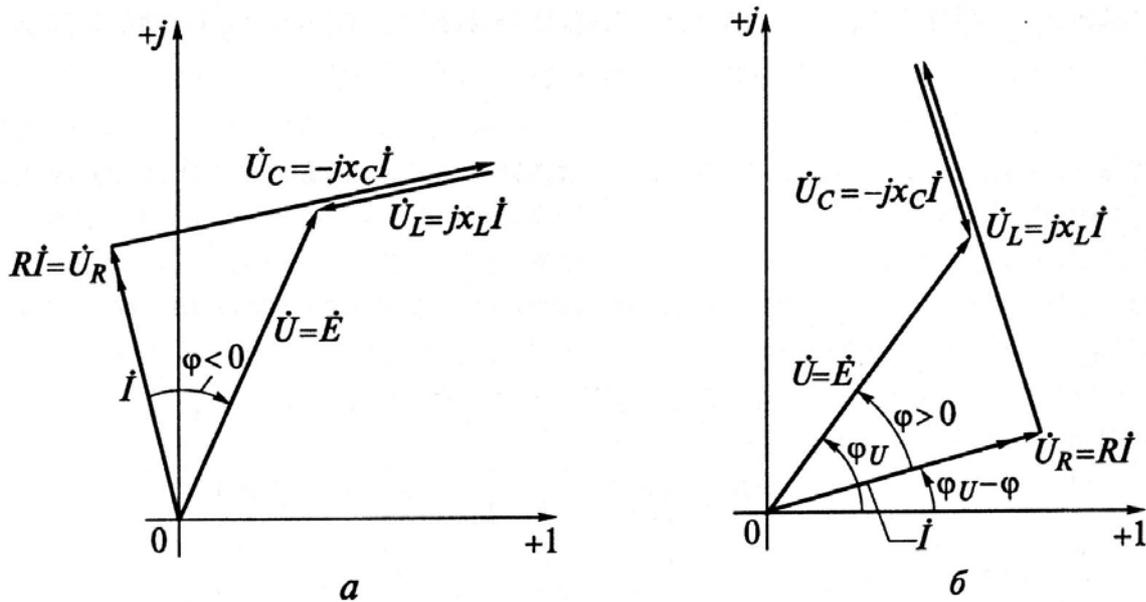


Рис. 2.9. Векторные диаграммы для последовательной RLC - цепи:
 a - при $x < 0$; b - при $x > 0$

Закон Ома в комплексной форме для комплексов амплитудных значений можно представить в следующем виде:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{Z}}. \quad (2.50)$$

Аналогично записывают закон Ома для комплексов действующих значений: $\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{Z}}$.

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}}. \quad (2.51)$$

Комплексный метод позволяет использовать все средства анализа и расчета синусоидальных цепей. Особая роль отводится правилам Кирхгофа из-за их универсальности.

Первое правило Кирхгофа: в любом узле k электрической цепи алгебраическая сумма n комплексов токов равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0. \quad (2.52)$$

Правило знаков: втекающие в узел токи в алгебраической сумме берутся со знаком (+), вытекающие токи - со знаком (-).

Второе правило Кирхгофа: в любом контуре цепи алгебраическая сумма t комплексов ЭДС равна алгебраической сумме t комплексов падений напряжений вдоль этого контура:

$$\sum_m \dot{E}_k = \sum_n \dot{I}_k \dot{Z}_k. \quad (2.53)$$

Правило знаков: если направление ЭДС и падения напряжения совпадает с заданным направлением обхода, то в алгебраической сумме они берутся со знаком (+), в противном случае - со знаком (-).

2.5. Трехфазные цепи

В системе производства и потребления электроэнергии широкое распространение получила трехфазная система переменного тока. Она обеспечивает экономичную передачу электроэнергии, позволяет создавать и использовать надежные в работе и простые по устройству электродвигатели, генераторы и трансформаторы.

Трехфазная электрическая цепь представляет собой совокупность трех однофазных электрических цепей. Трехфазную цепь называют симметричной, если амплитудные и действующие значения напряжений и токов во всех фазах равны и сдвинуты по фазе друг относительно друга на угол 120° , и несимметричной, если хотя бы одно из приведенных условий не выполняется (рис. 2.10).

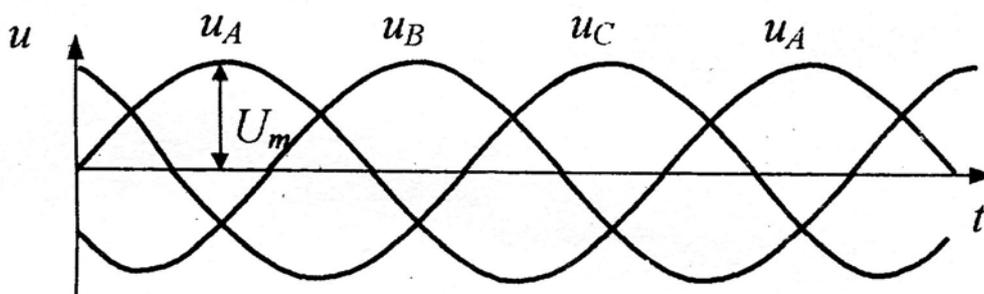


Рис. 2.10. Трёхфазная симметричная система напряжений

Фазное напряжение U_ϕ - напряжение между началом (ну левым проводом N) и концом фазы (выводы А, В и С на рис. 2.11).

Фазный ток I_ϕ - ток в фазе трехфазной цепи (I_A, I_B, I_C Рис.2.11)

Линейное напряжение U_L - напряжение между разными фазами (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} рис 2.11)

Линейный ток I_L - ток в линейных проводах (I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} рис. 2.11).

При соединении потребителей электроэнергии по схеме «звезда» (на рис. 2.11 по схеме «звезда» соединены обмотки источника электроэнергии) линейные и фазные напряжения трех фазной цепи находятся в следующей зависимости

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi . \quad (2.54)$$

При соединении потребителей электроэнергии по схеме «звезда» трехфазная система бывает четырехпроводной (для включения осветительной нагрузки, бытовых приборов и т.д.). Для такой системы, где потребители вклю-

чены между нейтральным проводом и одним из линейных проводом фазные и линейные токи равны, т.е.

$$I_L = I_\phi. \quad (2.55)$$

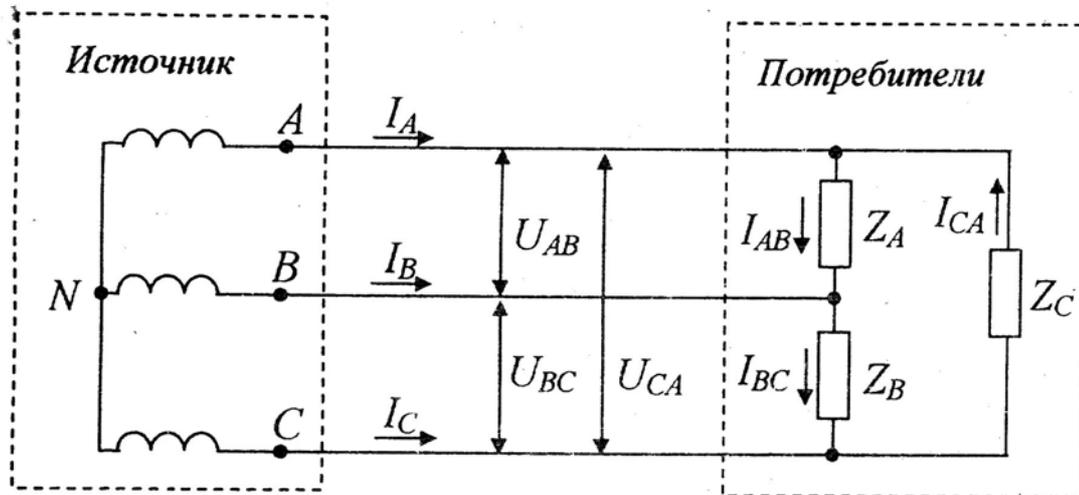


Рис. 2.11. Трехфазная электрическая цепь

При этом мгновенное значение тока в нейтральном проводе равно сумме мгновенных токов каждой фазы.

При соединении потребителей электроэнергии по схеме «треугольник» (рис. 2.11)

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi. \quad (2.56)$$

Мощность трехфазной цепи при симметричном режиме:

$$\left. \begin{aligned} S &= 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_L I_L, \\ P &= 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi, \\ Q &= 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

2.5.1. Вращающееся магнитное поле

Важной чертой многофазной системы является ее способность создавать вращающееся магнитное поле, которое создает постоянный по амплитуде вектор магнитного поля, вращающийся при постоянной угловой скорости. Направление вращения магнитного поля зависит от направления токов в данный момент времени. Одна обмотка создает пульсирующее магнитное поле, а группа обмоток, расположенных и питаемых током должным образом, вращающееся магнитное поле (рис. 2.12).

В этом случае векторы магнитной индукции обмоток будут направлены следующим образом:

$$\begin{aligned}
B_A(t) &= B_m \sin \omega t \leftrightarrow \dot{B}_{Am} = B_m \angle 0^\circ; \\
B_B(t) &= B_m \sin(\omega t - 120^\circ) \leftrightarrow \dot{B}_{Bm} = B_m \angle -120^\circ; \\
B_C(t) &= B_m \sin(\omega t + 120^\circ) \leftrightarrow \dot{B}_{Cm} = B_m \angle 120^\circ.
\end{aligned} \quad (2.58)$$

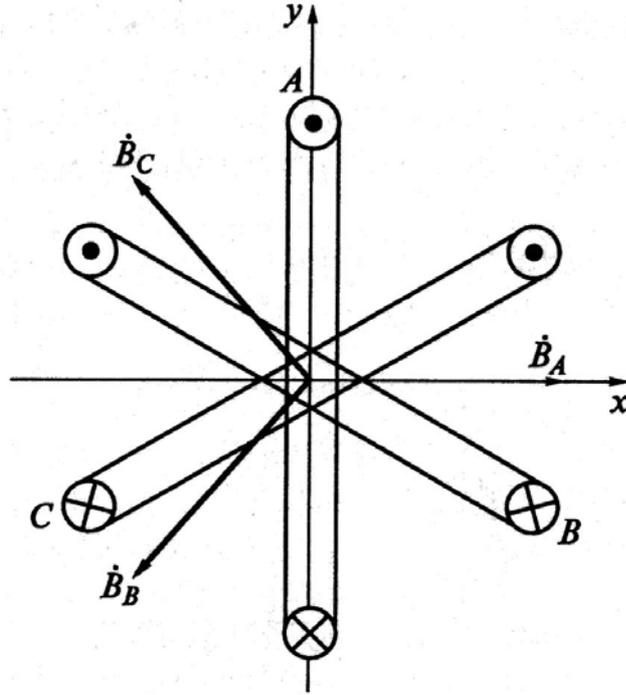


Рис. 2.12. Схема магнитных полей генератора

Дополнительно учтем, что мы имеем функцию двух координат, т.е. поля смещены по оси времени и одновременно в пространстве.

Тогда:

$$\begin{aligned}
\dot{B}(t) &= \dot{B}_A(t) + (-0,5 - j0,865)\dot{B}_B(t) + (-0,5 + j0,865)\dot{B}_C(t) = \\
&= 1,5B_m(\cos \omega t - j \sin \omega t) = 1,5\dot{B}_m = 1,5B_m e^{-j\omega t},
\end{aligned}$$

$$\dot{B}_A(t) = B_m \sin \omega t \angle 0^\circ;$$

где $\dot{B}_B(t) = B_m \sin \omega t \angle -120^\circ;$

$$\dot{B}_C(t) = B_m \sin \omega t \angle 120^\circ.$$

Способы повышения коэффициента мощности симметричных трехфазных приемников. Мощность в электрической цепи имеет две составляющие: активную и реактивную. Режим работы цепи наиболее выгоден, когда совершаемая работа максимальна, т.е. мощность в цепи равна активной мощности P . При этом суммарная реактивная мощность $Q = 0$.

Доля активной мощности в цепи определяется коэффициентом мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}. \quad (2.59)$$

Любая практическая электрическая цепь содержит все три вида пассивных элементов: резистор, индуктивность и емкость. Составляя эквивалентные схемы реальных устройств, как правило, учитывают только те элементы, которые дают наибольший вклад при данных режимах работы. Так, в схемах замещения электромашинных генераторов или двигателей учитывают в первую очередь потери (резистор) и индуктивность. То же делается и для трансформаторов. Очевидно, что параллельное подключение конденсаторов позволяет повысить значение коэффициента мощности в цепях содержащих резисторы, и индуктивности.

Использование компенсации уменьшает ток, потребляемый двигателем из линии (для генератора уменьшается ток, отдаваемый в линию, и следовательно, установленная мощность). Техничко-экономические расчеты показывают, что во многих случаях целесообразно устанавливать батареи конденсаторов для повышения коэффициента мощности цепи.

При финансовых расчетах промышленных потребителей энергии с энергосистемой оплата зависит не только от количества потребленной энергии, но и от коэффициента мощности, при котором работает потребитель. Потребление электрической энергии составляет примерно 70 % на промышленные нужды и 30 % - для бытового применения. Порядка 70 % промышленной нагрузки приходится на асинхронные двигатели, потребляющие из сети активную и реактивную энергию. Трансформаторы и другие промышленные нагрузки также потребляют реактивную энергию. На асинхронные двигатели и трансформаторы расходуется 80...90% потребляемой реактивной энергии.

Очевидно, что загрузка линий передачи и трансформаторов потоками реактивной энергии не экономична и приводит к дополнительным потерям напряжения. Повышение коэффициента мощности промышленных предприятий и энергосистем осуществляется за счет организационных мероприятий по упорядочению работы оборудования предприятий, рационального использования мощности и электротехнических устройств, искусственных мер повышения коэффициента мощности с помощью компенсирующих устройств - синхронных компенсаторов и статических конденсаторов. Применение синхронных компенсаторов экономически оправдано при мощностях компенсирующего устройства более 10 ($U_{\text{Л}} = 10$ кВ) или 5 Мвар ($U_{\text{Л}} = 6$ кВ). Каждому предприятию в соответствии с нормативами по компенсации реактивной мощности устанавливается экономически обоснованное среднее значение реактивной

энергии, разрешенной к потреблению, т.е. $\text{tg } \varphi = \frac{Q_{\text{ср}}}{P_{\text{ср}}}$

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

3.1. Электрические аппараты

Электрические аппараты - это электротехнические устройства, которые используются для включения и отключения электрических цепей, контроля, измерения, защиты и управления электроустановками предназначенных для производства, передачи, преобразования, распределения и потребления электрической энергии.

Важными элементами электрических аппаратов являются электромагнитные механизмы, служащие приводами электрических аппаратов, реле, контакторов, автоматических выключателей и г.д.

3.1.1. Назначение и устройство электромагнитных механизмов постоянного тока

В комплексах современных систем электроснабжения широкое применение нашли самые разнообразные электрические аппараты. Электромагнитные механизмы являются приводами электрических аппаратов: реле, контакторов, автоматических выключателей и т.д. Магнитные цепи электрических аппаратов являются основой электромагнитных механизмов.

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

Электромагнитные реле классифицируются:

По назначению - (табл. 3.1);

по способу действия: удерживающие и притягивающие;

по способу включения: с параллельной катушкой и с последовательной катушкой:

по роду тока: постоянного и переменного;

по характеру движения якоря - (рис.3.2);

по мощности управления - (табл. 3.2);

по быстродействию - (табл. 3.3).

Классифицировать реле можно по разным признакам. Наиболее целесообразно классифицировать их по воздействующей величине, т.е. по физической величине, на которую реле должно реагировать. Соответственно этому различают реле: тока, напряжения, мощности, тепловые и т.д.

По принципу взаимодействия отдельных частей электрических реле различают электромеханические и статические. Работа электромеханических реле основана на использовании относительного перемещения их механических элементов под воздействием электрического тока, протекающего по обмотке электромагнита. Принцип работы статических реле не связан с перемещением

механических элементов, и они выполняются на базе полупроводниковых приборов.

В зависимости от того, на каком принципе устроена работа воспринимающей части электромеханических реле различают электромагнитные, индукционные, электротепловые и другие реле. Соответственно этому различают реле, которые имеют различную конструкцию, но выполняют одну и ту же функцию, например, реле тока электромагнитное, реле тока индукционное или реле времени электронное, реле времени электромагнитное и т.д.

Кроме того, в зависимости от выполняемых функций электромеханические реле подразделяются на логические и измерительные.

Электромеханические логические реле предназначены для срабатывания при изменении входной воздействующей величины и подразделяются на промежуточные реле, предназначенные для размножения и усиления, поступающих к ним сигналов; указательные реле - для указания срабатывания и возврата других коммутационных аппаратов; реле времени - для создания выдержки времени.

Электромеханические измерительные реле предназначены для срабатывания с определенной точностью при заданном значении контролируемой величины (к ним относятся реле напряжения, реле тока и т.д.).

Различают максимальные и минимальные измерительные реле. Максимальные реле, срабатывают при значениях контролируемого параметра, больших заданной установки, а минимальные реле - срабатывают при значениях контролируемого параметра, меньших заданной установки.

По способу включения воспринимающей части различают реле первичные и вторичные. Воспринимающий элемент первичных реле включается непосредственно в контролируемую цепь, а у вторичных реле через измерительные трансформаторы (шунты).

В зависимости от способа воздействия исполнительной части реле на электрическую цепь различают реле прямого и косвенного действия. Реле прямого действия своими контактами коммутирует электрическую цепь, а реле косвенного действия - управляет цепью электрического аппарата осуществляющего коммутацию электрической цепи.

В зависимости от того, возвращается ли реле после срабатывания в исходное положение или нет, различают реле одностабильные, двухстабильные и поляризованные. Одностабильные – реле, у которых осуществляется самовозврат в исходное положение после отключения воздействующей величины. Двухстабильные - реле, не осуществляющие самовозврата, для их возврата в исходное положение требуется приложение другого воздействия. Поляризованные - электрические реле постоянного тока, изменение состояния которых зависит от полярности их входной воздействующей величины. Нейтральные - реле, работа которых не зависит от полярности входного сигнала.

Основная характеристика реле - статическая (характеристика управления), выражающая зависимость выходной величины y от входной x .

Статическая характеристика реле приведена на рис.3.1.

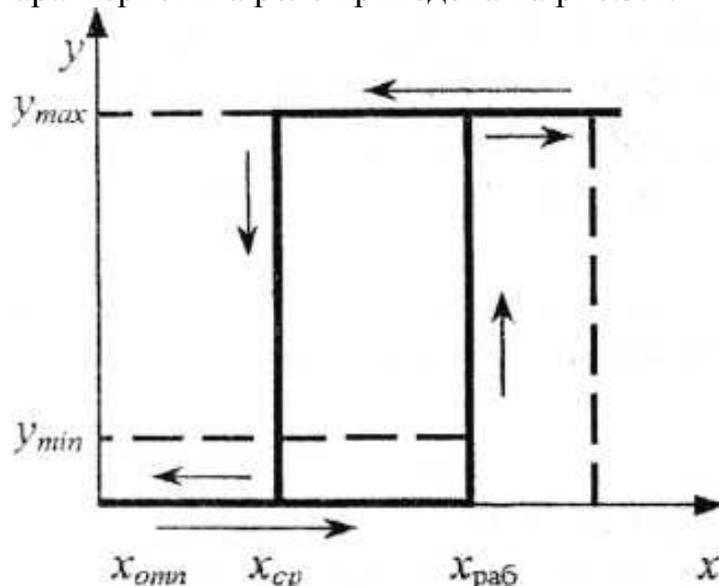


Рис. 3.1. Статическая характеристика реле

Значение входного параметра x (напряжения, тока и т.д.), при котором происходит срабатывание реле, называется параметром срабатывания. До тех пор, пока $x < x_{ср}$, выходной параметр y равен нулю либо своему минимальному значению y_{min} (для бесконтактных аппаратов). При $x = x_{ср}$ выходной параметр скачком меняется от y_{min} до y_{max} . Происходит срабатывание реле. Если после срабатывания уменьшать значение входного параметра, то при $x \leq x_{отп}$ происходит скачкообразное возвращение выходного параметра от значения y_{max} до нуля или y_{min} - отпускание реле.

Значение входного параметра, при котором происходит скачкообразное отпускание реле, называется параметром отпускания. Значения параметров срабатывания или отпускания, на которые отрегулировано реле, называются установкой по входному параметру.

При выборе типа реле принимают во внимание все указанные характеристики и параметры, отдавая предпочтение тем, которые в наибольшей степени удовлетворяют требованиям разрабатываемого устройства и условиям его эксплуатации.

Важным элементом электромагнитных механизмов реле являются контакты, от которых зависит качество контактного соединения, и определяются надежность и ресурс работы коммутационных ЭА.

Контактом называют зону перехода тока из одной токоведущей части в другую. Соприкасающиеся поверхности контакта называются контактными поверхностями.

Основным показателем контактов является значение переходного (контактного) сопротивления R_K , которое в номинальных условиях находится в

пределах от десятых до тысячных долей Ом. Чем меньше переходное сопротивление, тем меньше нагрев контактов. В общем случае переходное сопротивление зависит от силы контактного нажатия, состояния и материала контактов и от температуры.

Основная особенность контактной поверхности - ее шероховатость и наличие оксидной пленки. Наиболее тяжелый режим работы контактов - процесс размыкания. Это объясняется тем, что разрываема цепь обладает индуктивностью, и при размыкании контактов ток в цепи измениться скачкообразно не может согласно, закона коммутации. При размыкании контактов может возникнуть газовый разряд - электрическая дуга.

Таблица 3.1. - Классификация электромагнитных реле по назначению

Вид реле	Назначение
Пусковое (контактор, пускатель магнитный)	Ввод в действие различных устройств с помощью кнопок, расположенных на пульте управления
Максимальное	Отключение контролируемой цепи, когда ток или напряжение становятся больше заданного значения
Минимальное	Отключение контролируемой цепи при значениях тока или напряжения меньше определенной величины
Выдержки времени	Создание необходимой выдержки времени при включении различных электрических цепей

Таблица 3.2. - Классификация реле по мощности управления

Вид реле	$P_y, Вт$
Маломощные	<1
Средней мощности	1 - 10
Мощные	>10

Минимальные значения напряжения и тока, необходимые для поддержания дугового разряда, для разных материалов различны, для цепей постоянного тока находятся в пределах 15...20В и 0,05...0,9А.

Для повышения надежности работы контактов в ЭА с большими токами (как правило, более 10 А) применяются дугогасительные устройства. Основными способами гашения дуги, в которых, являются ее растягивание, дробление, охлаждение и т.д.

Таблица 3.3. - Классификация реле по времени срабатывания

Вид реле	$t_{cp}, мс$
Безынерционные	<1
Быстродействующие	5...50
Нормальные	50...150
Замедленные	150...1000

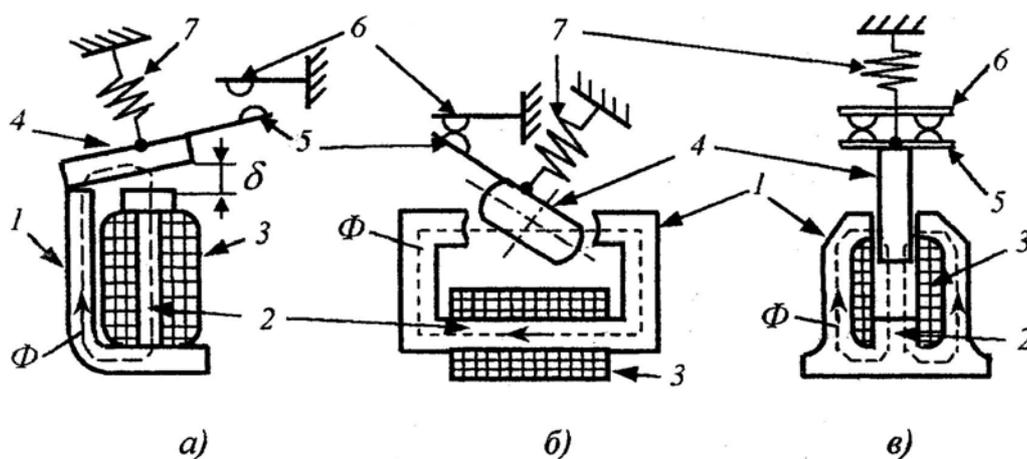


Рис. 3.2. Электромагнитные механизмы: клапанного типа (а), с поворотным (б) и прямоходовым (в) якорем

Основными элементами магнитной цепи электромагнитных механизмов являются: ярмо 1, сердечник 2, обмотка 3 и якорь 4 (рис.3.2). Важными элементами электромагнитных механизмов являются подвижный и неподвижный контакты 5 и 6 соответственно и возвратная пружина 7 (рис.3.2).

Принцип работы. При прохождении тока по катушке создается МДС, под действием которой возбуждается магнитный поток Φ (рис. 3.2, а). Этот поток замыкается через воздушный зазор 8, что приводит к притягиванию якоря к сердечнику, и соответственно, замыканию контактов. В исходное положение якорь возвращает пружина.

Воздушный зазор, изменяющийся при перемещении якоря, называется рабочим, как и рабочий, называется магнитный поток, замыкающийся через воздушный зазор. Магнитные потоки, не замыкающиеся через воздушный зазор, называются потоками рассеяния.

Электромагнитная сила, создающая тяговое усилие электромагнитного механизма постоянного тока, для равномерного поля в зазоре и ненасыщенной магнитной системе определяется по формуле Максвелла:

$$P_{\text{Э}} = \frac{B_{\delta}^2 S_{\delta}}{2\mu_0}, \quad (3.1)$$

или по эмпирической формуле:

$$P_{\text{Э}} \approx \frac{4\pi \cdot 10^{-7} (Iw)^2 S_{\delta}}{2\delta^2}, \quad (3.2)$$

где B_{δ} - магнитная индукция в воздушном зазоре; S_{δ} - площадь поперечного сечения воздушного зазора. μ_0 - магнитная проницаемость воздуха; I - ток катушки; w - число витков катушки; δ - длина воздушного зазора.

3.1.2. Маломощные реле постоянного тока

Маломощные электромагнитные реле (рис. 3.4) состоят из сердечника, обмотки, корпуса, якоря со штифтом отлипания и контактных пружин с контактами.

Качество работы реле в значительной степени определяется надежностью и долговечностью работы контактов. В зависимости от разрываемой контактом мощности (величины тока) выбирается форма и материал контактов, а также расстояние между ними. Наиболее часто встречающиеся формы контактов приведены на рис. 3.3.

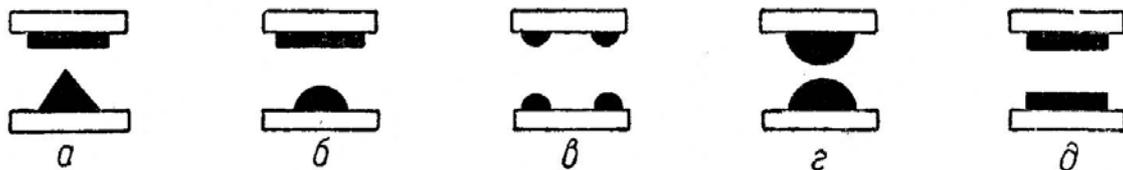


Рис. 3.3. Формы контактов реле:

a - плоскоострые; *б* - плоскосферические; *в* - двойные сферические; *г* - сферические; *д* - плоскостные

Широкое распространение получили два типа конструкции контактов: рычажные (рис.3.2, а, б) и мостиковые (рис.3.2, в).

Контакты изготавливаются из латуни, бронзы, серебра, нейзильбера, вольфрама. Если контакты рассчитаны на небольшие токи, то их рекомендуются делать из серебра, а при больших токах - из вольфрама.

При напряжениях в коммутирующей цепи до 100 в допустимое значение тока (A) через контакты маломощных реле составляет:

для плоскоострых	0,3
» плоскосферических	0,3
» двойных сферических	0,5
» сферических	0,5
» плоскостных	2,0

Если коммутируемая цепь содержит только активную нагрузку, то допустимое значение тока через контакты может быть увеличено примерно в два раза.

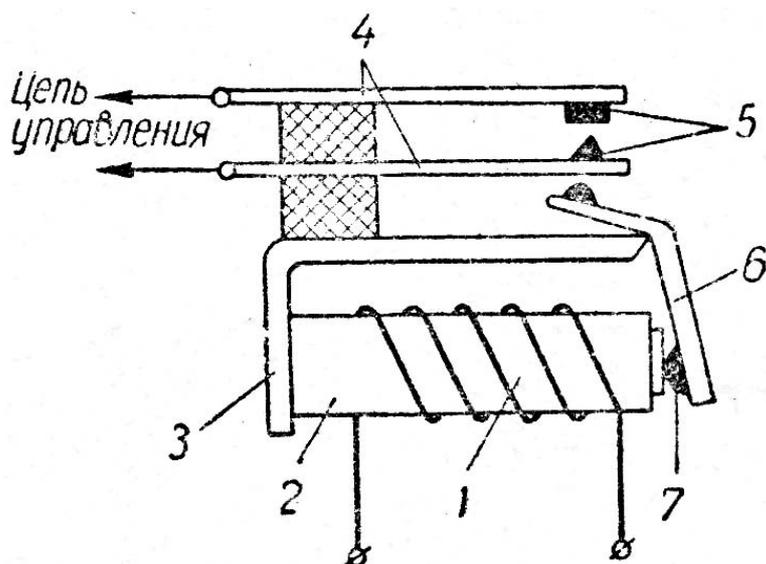


Рис. 3.4. Маломощное нейтральное электромагнитное реле:
 1 - обмотка; 2 - сердечник; 3 - корпус; 4 - контактные пружины;
 5 - контакты; 6 - якорь; 7 - штифт отлипания.

Контакты реле, работающих в цепях с индуктивной нагрузкой, при больших токах и значительной частоте срабатываний должны защищаться искрогасящими контурами, чтобы не обгорали контакты вследствие искрения.

Схемы искрогасящих контуров приведены на рис. 3.5. Наилучшие результаты дает контур, состоящий из последовательно соединенных сопротивления и емкости. Величины элементов искрогасящих контуров зависят от многих факторов, в частности от сопротивления и индуктивности обмоток реле.

В табл. 3.4 приведены основные типы контактных групп. Для коммутации в сложных электрических цепях применяются комбинированные многоконтактные группы, состоящие из простейших контактных групп.

Таблица 3.4 - Основные типы контактных групп

Наименование контактной группы	Положение покоя	Промежуточное положение	Рабочее положение
Замыкание			
Размыкание			
Переключение			
Плавное переключение			

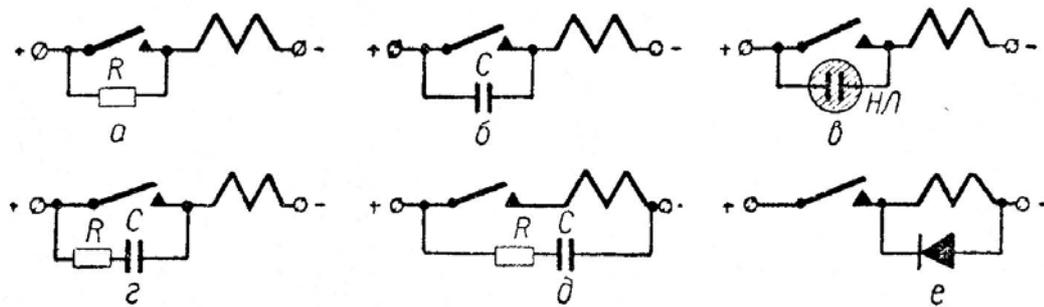


Рис. 3.5. Схемы искрогасящих контуров

3.1.3. Электротепловые и герконовые реле

Электротепловые реле, выполненные на базе биметаллической пластины, иначе называют биметаллическими реле. Они нашли широкое применение в автоматических выключателях и магнитных пускателях и предназначены для защиты электрических цепей от токов перегрузки.

Конструктивно биметаллическая пластина состоит из слоев двух металлов с разными температурными коэффициентами линейного расширения. Слой биметаллической пластины с меньшим значением коэффициента линейного расширения называется инертным (пассивным) и изготавливается из инвара (36% никеля и 64% железа) или других сплавов. Слой пластины с большим значением коэффициента линейного расширения называется активным и изготавливается из константана, латуни или немагнитной стали.

К примеру, для латуни коэффициент линейного расширения в 20 раз больше, чем для инвара. Поэтому при увеличении температуры слой латуни удлиняется больше, чем слой инвара. Эти слои жестко соединены (сваркой или пайкой). Вся биметаллическая пластина при нагреве изгибается в сторону инвара (рис.3.5). Поскольку один конец биметаллической пластины закреплен, то механическое усилие, развиваемое пластиной при изгибании, используется для приведения в действие исполнительного элемента реле - контактов.

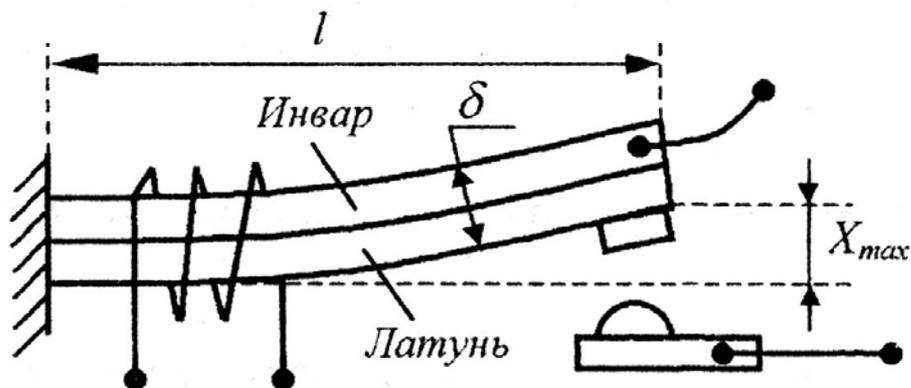


Рис.3.5. Биметаллическая пластина электротепловых реле

Максимальный прогиб биметаллической пластины X_{max} (рис.3.5):

$$X_{\max} = \frac{3}{4}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{l^2 \tau}{\delta}, \quad (3.3)$$

где α_1 и α_2 - активный и пассивный коэффициенты линейного расширения;

δ - суммарная толщина биметаллической пластины;

l - длина биметаллической пластины;

τ - превышение температуры биметаллической пластины относительно температуры окружающей среды.

Незакрепленный конец биметаллической пластины развивает усилие:

$$P = \frac{3}{16}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{b \delta^2}{l} E \tau, \quad (3.4)$$

где b - ширина биметаллической пластины;

$E = \frac{E_1 + E_2}{2}$ - средний модуль упругости биметаллической пластины.

Для получения большого прогиба необходима пластина большой длины и малой толщины. В то же время при необходимости получения большого усилия целесообразно иметь широкую пластину с малой длиной и большой толщиной.

Конструктивные формы биметаллических пластин разнообразны. Кроме того, нагрев биметаллических пластин может осуществляться током цепи, как это показано на рис. 3.5, (ток протекает непосредственно через пластины)- прямой нагрев. При косвенном нагреве ток цепи протекает по нагревательному элементу и теплота от нагревательного элемента передается пластине. При комбинированном способе нагрева ток цепи протекает по пластине и нагревательному элементу соответственно.

Основными недостатками электротепловых реле являются зависимость работы от температуры окружающей среды и низкая точность. Кроме того, из-за инерционности теплового процесса они непригодны для защиты цепей от токов короткого замыкания.

Наименее надежным узлом электромагнитных реле является контактная система. Электрические дуга или искра, образующиеся при размыкании и замыкании контактов, приводят к быстрому их разрушению. Этому также способствуют окислительные процессы и загрязнение контактных поверхностей. Существенным недостатком электромагнитных реле является наличие трущихся механических деталей, износ которых также сказывается на их работоспособности.

Работа в направлении устранения перечисленных недостатков электромагнитных реле привела к созданию магнитоуправляемых контактов.

Магнитоуправляемым контактом называется контакт электрической цепи, изменяющий состояние электрической цепи посредством механического замыкания или размыкания ее при воздействии управляющего магнитного поля на его элементы, совмещающие функции контактов и участков электриче-

ских и магнитных цепей. Магнитоуправляемый контакт, помещенный в герметизированный баллон, называется герметичным магнитоуправляемым контактом или герконом.

Простейшее герконовое реле с замыкающим контактом показано на рис. 3.6. 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 с азотом с небольшой (около 3 %) добавкой водорода. Давление газа внутри баллона геркона составляет $(0,4...0,6) \cdot 10^5$ Па. Инертная среда предотвращает окисление контактов. Баллон устанавливается в обмотке управления 4.

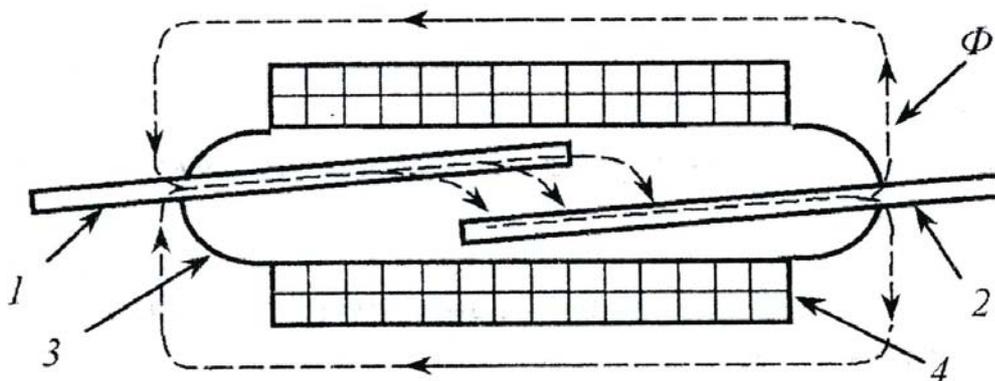


Рис.3.6. Герконовое реле с замыкающим контактом

Принцип работы. При протекании тока по обмотке герконового реле возникает магнитный поток Φ , который проходит по КС 1 и 2 через рабочий воздушный зазор между ними и замыкается по воздуху вокруг обмотки 4. Поток Φ при прохождении через рабочий зазор создает тяговую электромагнитную силу, которая, преодолевая упругость КС, соединяет их между собой.

Для уменьшения переходных сопротивлений поверхности покрываются тонким слоем (2...50 мкм) золота, палладия, серебра и др.

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, а КС одновременно выполняют функции магнитопровода, токопровода и пружины.

Основные преимущества реле с герконами:

- 1) простота конструкции, малые масса и габариты;
- 2) низкое переходное сопротивление на контактах (0,01...0,001 Ом);
- 3) гальваническая развязка цепей нагрузки и управления;
- 4) высокое быстродействие (время срабатывания и отпускания 1...3 мс), что позволяет использовать герконы при частоте коммутаций до 1000 раз в секунду;
- 5) надежность работы в широком диапазоне температур от -60° до $+120^{\circ}\text{C}$;
- 6) повышенная механическая износостойкость (до 10^9 циклов);

7) простота и удобство эксплуатации и обслуживания.

В то же время реле с герконами имеют следующие недостатки:

1) восприимчивость к внешним магнитным полям требует специальных мер по защите от их воздействия;

2) малая мощность коммутируемых цепей;

3) невозможность регулировки;

4) хрупкость стеклянного баллона, чувствительность к ударам и вибрациям, что требует принятия дополнительных мер по их защите;

5) возможность самопроизвольного размыкания контакта при больших токах;

б) значительный технологический разброс параметров. Преимущества и недостатки герконов предопределили их область применения. Они широко используются в схемах автоматики и защиты как логические элементы, как электромеханические усилители сигналов между полупроводниковыми устройствами и силовыми ЭА.

Основные технические данные герконов: максимальная коммутируемая мощность 0,3...30 Вт; максимальное коммутируемое напряжение 30...250 В; общая длина 30...80 мм; диаметр баллона 10...50 мм.

3.1.4. Контактторы

Контактор - это электрический аппарат дистанционного действия, предназначенный для частых включений и отключений электрических цепей в нормальных режимах работы.

Электромагнитные контакторы различаются по роду тока. Контактторы постоянного тока предназначены для коммутации цепей постоянного тока и, как правило, приводятся в действие электромагнитом постоянного тока. Соответственно контакторы переменного тока предназначены для коммутации цепей переменного тока. Электромагниты этих контакторов могут быть как постоянного, так и переменного тока. Современные контакторы коммутируют цепи с токами от единиц до нескольких сотен ампер. При этом время включения не превышает 0,4 с, а отключения - 0,25 с.

В зависимости от нормального положения главных контактов различают контакторы с замыкающими, размыкающими и смешанными контактами. Нормальным считается положение контактов, когда втягивающая катушка контактора не подключена к источнику и освобождены все имеющиеся защелки.

Основными элементами контакторов являются (рис. 3.7): электромагнитная система 1, подвижные и неподвижные главные контакты 3 и 4 соответственно, 2 возвратная (рабочая) пружина, гибкая медная связь 5, дугогасительная система 6.

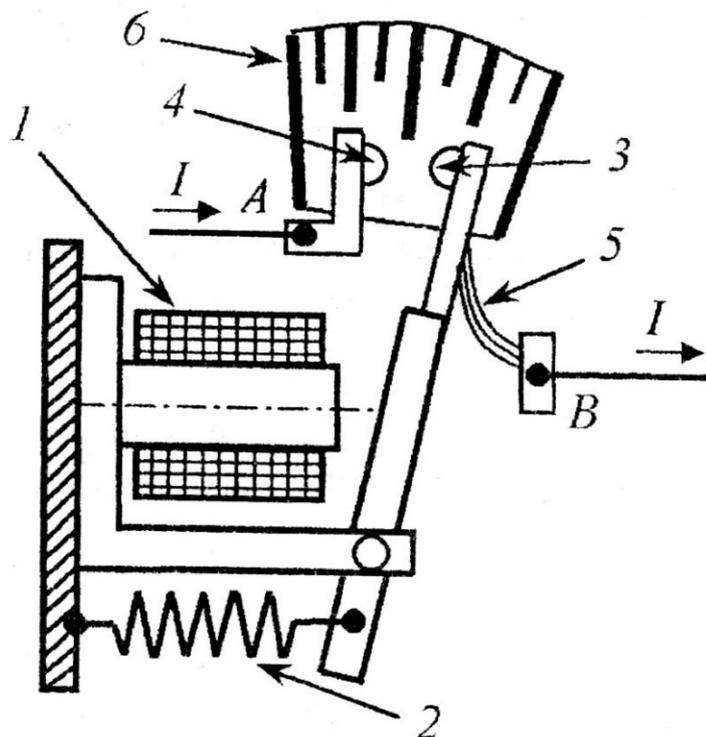


Рис. 3.7. Конструкция контактора постоянного тока

Главные контакты могут выполняться рычажного или мостикового типа. Контакторы могут выполняться одно-, двух- и трехполюсными.

Контакторы могут содержать вспомогательные контакты на токи до 5 А, которые производят переключения в цепях управления, сигнализируя о состоянии контактора. Электромагнитная система контактора может рассчитываться на включение якоря и удержания его в замкнутом положении или только на включение якоря. Удержание якоря в последнем случае осуществляется специальной защелкой (на рис. 3.7 не показано).

Если электромагнитная система рассчитана только на включение якоря, то отключение контактора происходит после обесточивания катушки под действием рабочей пружины 2. При наличии в составе контактора защелки, в его конструкции имеется вторая маломощная электромагнитная система, осуществляющая отключение контактора, т.е. освобождение подвижной системы от действия защелки.

Принцип работы. Для включения контактора подается напряжение на выводы обмотки электромагнита. Якорь притягивается к сердечнику электромагнита, замыкая контакты 3 и 4, и ток I от вывода A , неподвижного контакта 4, через подвижный контакт 3 и гибкую связь 5 будет протекать к выводу B контактора. Для отключения контактора с его обмотки снимается напряжение, рабочая пружина 2 возвращает якорь в исходное положение, размыкая контакты 3 и 4. При возникновении дуги она гасится в дугогасительной камере 6.

Способы гашения дуги и конструкция дугогасительной камеры определяется родом тока силовой цепи и режимом работы контактора. Дугогаситель-

ная камера контакторов постоянного тока, в основном, выполняется в виде камеры с продольными щелями, куда дуга втягивается с помощью магнитной системы (на рис. 3.7 не показано). Дугогасительная камера контакторов переменного тока, как правило, имеет вид камеры со стальными пластинами и двойным разрывом дуги в каждой фазе.

Особенностью работы электромагнитных механизмов переменного тока является то, что в их конструкции предусмотрены устройства для устранения вибрации якоря. Контактторы являются основными дистанционными аппаратами, обеспечивающими коммутацию электрических цепей в нормальных режимах работы. Рассматриваемые способы и устройства гашения электрической дуги расширяют представление о сложности коммутации электрической цепи.

3.1.5. Гашение электрической дуги

Гашение электрической дуги является одной из актуальных проблем ЭА, предназначенных для коммутации электрических цепей. Надежность работы ЭА, как и их конструктивные области применения определяются способами и устройствами гашения дуги.

Основные требования к дугогасительным устройствам - погасить дугу в малом объеме (желательно замкнутом), за малое время, при малом износе частей аппаратов, при малых звуковых и световых эффектах.

Механическое растягивание дуги является простейшим способом гашения электрической дуги. Механическое растягивание дуги осуществляется перемещением контактов с определенной скоростью при отключении относительно небольших токов. В этом случае энергия, поступающая в дугу от источника, рассеивается в основном путем теплопроводности через боковую поверхность ствола дуги.

При механическом растягивании опорные точки дуги стоят неподвижно на контактах, что приводит к обгоранию их. Для уменьшения обгорания контактов необходимо обеспечить большие скорости расхождения, что требует мощных отключающих пружин.

Электрическая дуга является своеобразным проводником с током, который может взаимодействовать с магнитным полем. Гашение дуги в магнитном поле обеспечивается силой взаимодействия между током дуги и магнитным полем, которая перемещает дугу в нужном направлении так называемым магнитным дутьем.

Внешнее магнитное поле для перемещения электрической дуги может быть получено при помощи дугогасительной катушки. Дугогасительное устройство с магнитным дутьем показано на рис. 3.8. Магнитное поле создается катушкой 2, включенной последовательно с коммутируемой цепью. Внутри катушки имеется сердечник 1, соединенный с ферромагнитными полюсами в виде пластин 3, которые охватывают пространство контактов 6, где горит ду-

га 5. Взаимодействуя с магнитным полем катушки, дуга перемещается вправо, растягивается и, после достижения критической длины, гаснет в дугогасительной камере 4.

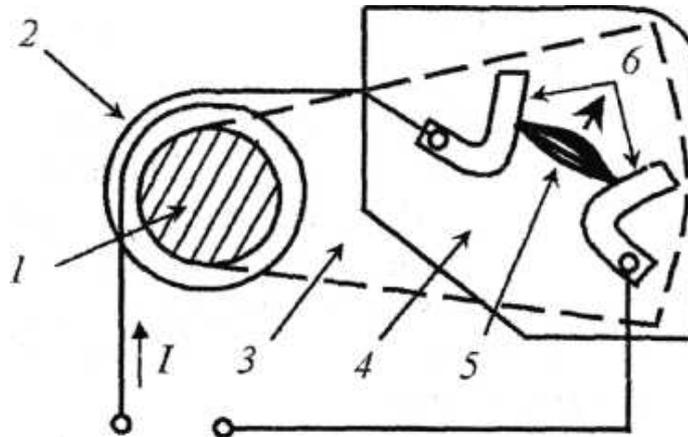


Рис. 3.8. Дугогасительное устройство с магнитным дутьем

Широкое распространение получили дугогасительные устройства, камеры которых имеют продольные щели. Продольной называют щель, ось которой совпадает по направлению с осью ствола дуги. Стенки камеры изготовлены с использованием керамических материалов. По обе стороны камеры расположены полюса электромагнитной системы (наподобие камеры 4 рис. 3.8), создающей магнитное поле, с помощью которого дуга затягивается внутрь узкой части камеры. На рис. 3.9 схематично изображены характерные формы продольных щелей. В продольных щелях основное воздействие осуществляется на ствол дуги. Охлаждение ствола дуги (отбор энергии) происходит за счет движения дуги через неподвижный воздух и охлаждающего действия стенок камеры.

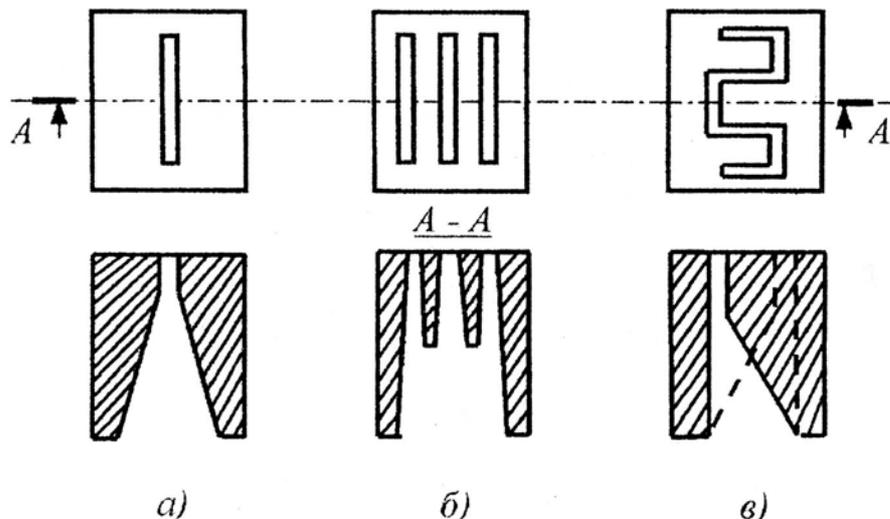


Рис. 3.9. Характерные формы продольных щелей дугогасительных камер

В верхней части камеры (рис. 3.9, а) имеется одна прямая продольная щель с плоскопараллельными стенками. В камере на рис. 3.9, б - несколько прямых параллельных щелей, аналогичных щели в камере на рис. 3.9, а. Не-

сколько параллельных щелей применяют при отключении больших токов. Параллельные дуги весьма неустойчивы, и все, кроме одной, последней, быстро погасают. Условия гашения оставшейся дуги такие же, как в камере с одной щелью.

На рис. 3.9, в показана камера с одной продольной щелью, имеющая извилистую форму. При такой форме представляется возможным в камере небольших размеров уместить длинную дугу.

Гашение дуги в дугогасительной решетке. Рассмотренные выше способы гашения электрической дуги сводились к воздействию на ее ствол. Дугу можно также гасить, используя околоэлектродное падение напряжения. Над контактами 1 и 2 ЭА (рис. 3.10) устанавливаются неподвижные, изолированные друг от друга металлические пластины 5, образующие дугогасительную решетку. Возникающая при отключении дуга 3 загоняется в эту решетку, где разбивается на ряд последовательно включенных коротких дуг 4. У каждой пластины возникает околоэлектродное падение напряжения. Гашение дуги происходит за счет суммы околоэлектродных падений напряжений, т.е. за счет ее дробления на мелкие дуги.

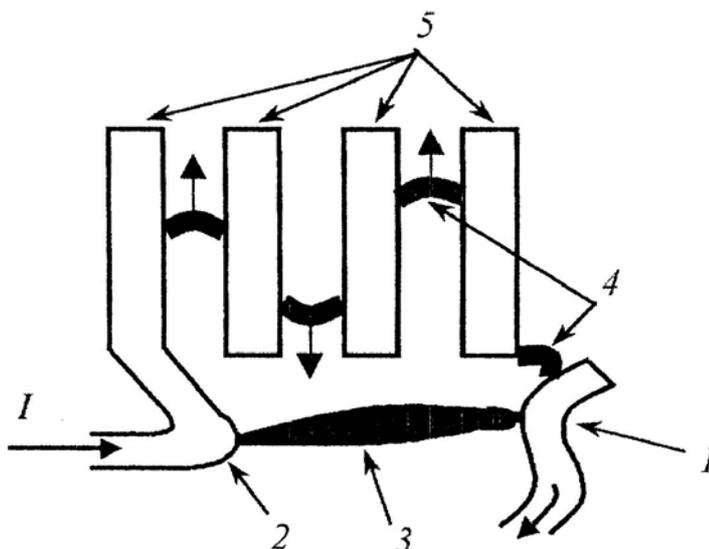


Рис. 3.10. Движение дуги в дугогасительной решетке

Для погасания дуги переменного тока число пластин существенно меньше, чем для погасания дуги постоянного тока. Дугогасительная решетка в цепях переменного тока действует намного эффективнее, чем в цепях постоянного тока. Этим и объясняется широкое ее применение на переменном токе и ограниченное применение на постоянном.

Дугогасительная решетка позволяет значительно сократить размеры дуги и гасить ее в ограниченном объеме при малых световом и звуковом эффектах. Дугогасительная решетка широко применяется в дугогасительных устройствах контакторов и автоматических выключателей.

3.1.6. Коммутационные аппараты и плавкие предохранители

3.1.6.1. Электромеханические выключатели

Простейшими неавтоматическими коммутационными аппаратами являются электромеханические выключатели - рубильники, переключатели и пакетные выключатели, предназначенные для ручного (неавтоматического) включения и отключения электрических цепей с номинальным напряжением до 660 В переменного тока и 440 В постоянного тока.

Рубильники (рис. 3.11) в системах электроснабжения в основном используются для включения и отключения обесточенных электрических цепей и включаются последовательно с другими автоматическими коммутационными аппаратами, которые осуществляют включение и отключение цепей под нагрузкой. Рубильники в этом случае устанавливаются перед этими аппаратами (со стороны источника питания) и используются для снятия напряжения с этих аппаратов для производства работ (технического обслуживания, ремонта, мены), и, кроме того, обеспечивают видимый разрыв цепи.

Конструктивно рубильники выполняются одно- двух- или трехполюсными. Они соответственно имеют подвижные контакт (ножи) и неподвижные контакты 2 (контактные стойки), а также ручной привод (рукоятку) 3 (рис. 3.11). Подвижные контакты соединены между собой перемычкой из изоляционного материала 4, к которой прикрепляется рукоятка рубильника или ручной рычажной привод. Рукоятка может быть как центрального, так и бокового исполнения (на рис. 3.11 трехполюсный рубильник с рукояткой центрального исполнения). Чаще всего в рубильниках используются пружинящие контакты рубящего типа. К этой же группе аппаратов относятся и переключатели рубящего типа. От рубильников они отличаются тем, что имеют добавочный комплект контактных стоек и могут переключать две разные цепи.

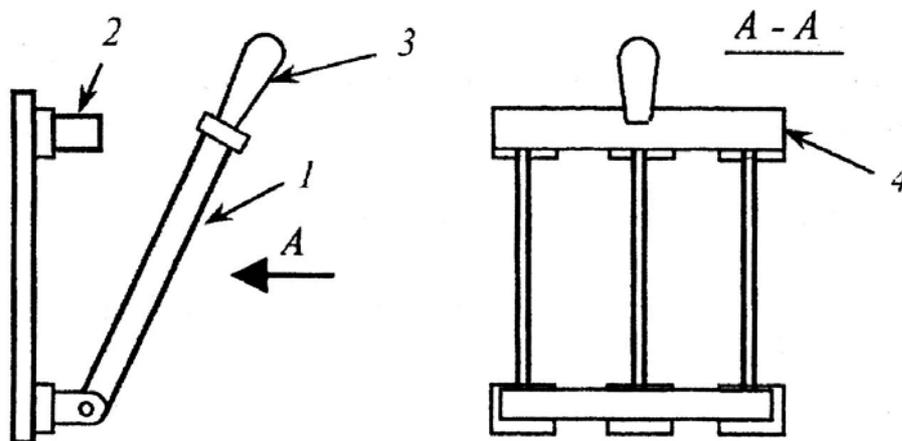


Рис. 3.11. Устройство рубильника

Выполняются рубильники и переключатели в основном на токи 80...1000 А, с коммутационной износостойкостью 2500...5000 циклов, механической износостойкостью до 10000 операций.

Для рубильников и переключателей с боковой рукояткой или рычажным приводом отношение отключаемого тока к номинальному составляет 0,2 при постоянном токе напряжением 220 В и 0,3 при переменном токе напряжением 380 В. При этом рубильники и переключатели с центральной рукояткой применяются для отключения обесточенных цепей.

При необходимости отключения цепей под нагрузкой, дуга не должна воздействовать на руку, поэтому в этом случае применяются аппараты с боковой рукояткой или с рычажным приводом. Для увеличения отключающей способности рубильник снабжается дутогасительной решеткой. Гашение электрической дуги постоянного тока при малых токах (до 75 А) происходит за счет ее механического растягивания.

3.1.6.2. Автоматические выключатели

Автоматические выключатели (АВ) предназначены для оперативных нечастых отключений электрической цепи в нормальных режимах работы а также для автоматического отключения цепи в аварийных режимах работы: при возникновении токов короткого замыкания, перегрузке и при понижении напряжения.

По назначению и принципам конструирования автоматические выключатели разделяются на выключатели общего назначения и быстродействующие.

Быстродействующие АВ выполняются в основном постоянного тока, предназначены для защиты полупроводниковых преобразователей, электрических машин и линий электропередачи. Время срабатывания выключателей находится в пределах 0,002...0,008 с.

АВ общего назначения по роду тока главной цепи выполняются переменного (напряжением до 1000 В) и постоянного (напряжением до 440 В) от 6 до 6300 А. Время срабатывания находится в пределах 0,02...0,08 с.

На рис. 3.12 приведена конструктивная схема АВ, которая содержит: неподвижный и подвижный контакты 1 и 2 соответственно; дутогасительную камеру 5; медную гибкую связь 4; отключающую пружину 5; механизм свободного расцепления 6; защёлку 7, упор 8, рукоятку 9; электромагнит с прямоходовым якорем 10; траверсу 11.

Принцип работы. Для включения автомата взводится рукоятка 9 (вверх в положение «Вкл»), механизм свободного расцепления 6 перемещает траверсу 11 вокруг оси О (рис. 3.12) против часовой стрелки. Замыкаются неподвижный контакт 2 с подвижным контактом 1. Защёлка 7 входит в зацепление с упором 8, и фиксирует замкнутое состояние контактов 1 и 2, при этом взводится отключающая пружина 5. Ток контролируемой цепи I_n (ток нагрузки) будет

протекать через автомат от вывода *A* до вывода *B*, через контакты 1 и 2, гибкую связь 4 и катушку электромагнита 10.

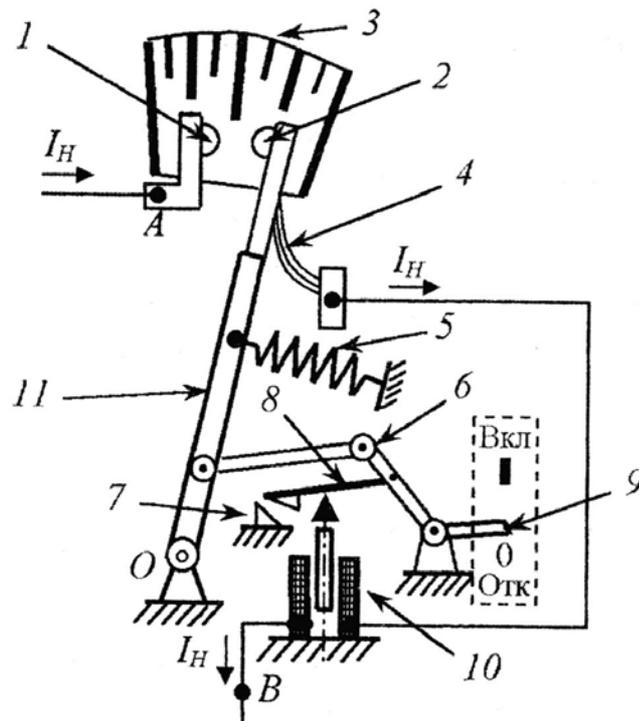


Рис. 3.12. Конструкция автоматических выключателей

При перегрузках и коротких замыканиях в контролируемой цепи будет протекать ток в несколько раз превышающий номинальный. В этом случае якорь электромагнита 10 воздействует на защелку 7 и выводит ее с зацепления с упором 8, под действием отключающей пружины 5 контакты 1 и 2 автомата размыкаются. Электрическая дуга гасится в дугогасительной камере 3.

При срабатывании АВ от аварийного режима рукоятка 9 зафиксирована в среднем положении между «Вкл» и «Отк». Для повторного включения автомата необходимо рукоятку 9 опустить до отказа вниз (в положение «Отк»), а затем взвести ее вверх (в положение «Вкл»).

Широкое распространение в АВ получили камеры с дугогасительными решетками и камеры с узкими щелями. Как правило, магнитное поле дугогашения (магнитное дутье) в выключателях создается самим контуром силового тока.

Включение АВ может осуществляться автоматически по команде оператора или системы автоматического управления. В этом случае в конструкции АВ предусмотрен дополнительно электромагнитный механизм дистанционного управления.

В действительности механизм свободного расцепления (расцепляющее устройство) представляет собой сложную систему шарнирно-связанных рычагов, соединяющих привод включения с системой подвижных контактов, которые соединены с отключающей пружиной. Расцепляющее устройство предна-

значено таким образом для обеспечения быстрого отключения АВ и для удержания контактов во включенном состоянии.

В конструкции АВ могут быть вспомогательные контакты (блок-контакты), предназначенные для осуществления переключений в цепях управления, блокировки и сигнализации в зависимости от коммутационного положения выключателя. Они выполняются в виде отдельного блока, встроенного в АВ и связаны с его подвижной системой.

Основными параметрами АВ являются: собственное и полное время отключения, номинальные значения тока и напряжения, предельный ток отключения.

Собственное время отключения автомата это время от момента, когда ток достигает значения тока срабатывания $I_{ср}$, до начала расхождения его контактов. После расхождения контактов возникающая электрическая дуга должна быть погашена за наименьшее время с перенапряжением, не представляющим опасности для электрооборудования.

Большое разнообразие автоматических выключателей делает их выбор достаточно сложным и трудоемким. АВ выбираются по следующим основным техническим параметрам: по роду тока и по числу полюсов; по номинальному напряжению и номинальному току: кратности установки тока отсечки (тока срабатывания в аварийных режимах); механической и коммутационной износостойкости, климатическому исполнению, категории размещения и степеней защиты.

Номинальные значения напряжения $U_{ном.а}$ и тока $I_{ном.а}$ автоматического выключателя, тока нагрузки I_n и напряжения сети U_c при выборе автомата должны удовлетворять соотношениям:

$$U_{ном.а} \geq U_c; I_{ном.а} \geq I_n. \quad (3.5)$$

Для АВ, осуществляющих защиту двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, номинальный ток электромагнитного расцепителя принимается равным току двигателя. Для АВ, защищающих двигатели с короткозамкнутым ротором, ток установки электромагнитного расцепителя:

$$I_{уст.эмп} \geq (1,5 \dots 1,8) I_n, \quad (3.6)$$

где I_n - пусковой ток двигателя.

Для двигателя с фазным ротором:

$$I_{уст.эмп} \geq (2,5 \dots 3,0) I_{ном.дв}. \quad (3.7)$$

Для группы короткозамкнутых двигателей:

$$I_{уст.эмп} \geq (1,5 \dots 1,8) [\sum I_{ном.дв} + (I_n - I_{ном.дв})], \quad (3.8)$$

где разность $(I_n - I_{ном.дв})$ берется для двигателей, у которых она наибольшая.

Для группы двигателей с фазным ротором:

$$I_{уст.эмп} \geq (1,5 \dots 2) I_{ном.дв.п} + \sum I_{ном.дв}, \quad (3.9)$$

где $I_{ном.дв.п}$ - ток двигателя с наибольшим пусковым током.

Выбор автоматов по току КЗ:

для АВ с электромагнитным расцепителем:

$$\frac{I_{кз}}{I_{уст.эмп}} \geq 1,25 \dots 1,4. \quad (3.10)$$

для АВ с комбинированным расцепителем:

$$\frac{I_{кз}}{I_{ном.расц}} \geq 3. \quad (3.11)$$

Предельный ток отключения АВ должен быть не менее $I_{кз}$.

3.1.6.3. Плавкие предохранители

Предохранитель - это коммутационный электрический аппарат, предназначенный для защиты электрических цепей от токов перегрузки и короткого замыкания.

Достоинства плавких предохранителей (ПП): простота устройства, небольшая стоимость, малые габариты и масса, высокая отключающая способность, обеспечили широкое их применение в системах электроснабжения.

Предохранители низкого напряжения изготавливаются на токи от миллиампер до тысяч ампер.

Основным недостатком ПП является то, что после отключения цепи необходимо заменить перегоревшую вставку. Эта операция производится вручную или автоматически с заменой всего предохранителя. И в первом и во втором случаях необходимо осуществлять отключение источника питания.

Основными элементами плавкого предохранителя (ПП) являются (рис. 3.13) корпус 1, плавкая вставка 2, включаемая последовательно с защищаемой цепью посредством контактных элементов латунных колпачков 3 и контактных ножей 4.

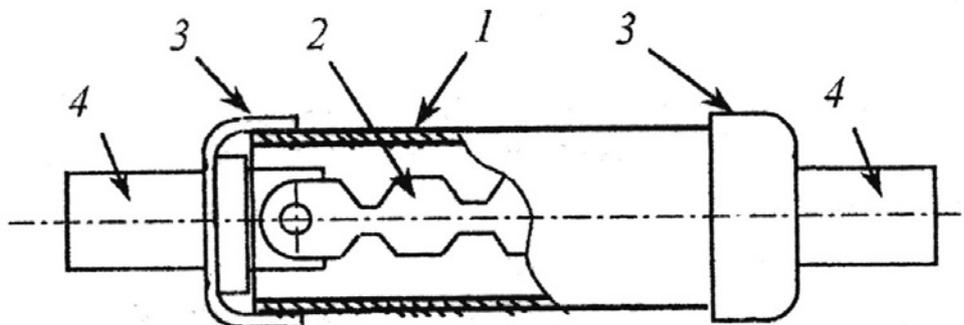


Рис. 3.13. Конструкция плавкого предохранителя

Процесс срабатывания ПП делится на несколько этапов: нагревание плавкой вставки до температуры плавления; плавление и испарение вставки; возникновение и гашение электрической дуги с восстановлением изоляционных свойств образующегося воздушного промежутка.

ПП работают в двух резко отличающихся режимах: в номинальных условиях и в условиях перегрузок и коротких замыканий. В первом случае нагрев вставки имеет характер установившегося процесса, при котором вся выделяемая в ней теплота отдается в окружающую среду. При этом кроме вставки нагреваются до установившейся температуры и все другие детали предохранителя. Эта температура не должна превышать допустимых значений.

Ток, на который рассчитана плавкая вставка для длительной работы, называют номинальным током плавкой вставки. Номинальный ток плавкой вставки может быть отличным от номинального тока самого предохранителя. Обычно в один и тот же ПП можно вставлять плавкие вставки на различные номинальные токи. Номинальный ток предохранителя, указанный на нем, равен наибольшему из номинальных токов плавких вставок, предназначенных для данной конструкции предохранителя.

Номинальным напряжением ПП называется напряжение, при котором предохранитель должен продолжительно работать. Напряжение защищаемой цепи не должно превышать номинального напряжения ПП более чем на 10%.

Защитные свойства ПП при перегрузках нормируются. Для предохранителей задаются условным током не плавления – ток, при протекании которого в течение определенного времени плавкая вставка не должна перегореть, и условный ток плавления - ток, при протекании которого в течение определенного времени плавкая вставка должна перегореть. Например, для предохранителя с плавкими вставками на номинальные токи 63...100 А плавкие вставки не должны перегорать при протекании тока $1,3 I_{ном}$ в течение одного часа, а при токе $1,6 I_{ном}$ должны перегореть за время до одного часа.

Ток, при котором плавкая вставка сгорает при достижении установившейся температуры, называется пограничным током $I_{погр}$. Для того, чтобы ПП не срабатывал при номинальном токе необходимо, чтобы отношение $\frac{I_{погр}}{I_{ном}} > 1$. Для улучшения защиты значение пограничного тока должно быть ближе к номинальному.

Для снижения температуры плавления вставки при ее изготовлении применяются легкоплавкие материалы и сплавы, приведенные в табл. 3.5.

Гашение электрической дуги, возникающей при перегорании плавкой вставки, должно быть осуществлено в короткое время. Время гашения дуги зависит от конструкции предохранителя и принятого способа гашения. Наибольший ток, который ПП может отключить без каких-либо повреждений или

деформаций, препятствующих его дальнейшей исправной работе после смены плавкой вставки, называют предельным током отключения предохранителя.

Таблица 3.5 - Материалы плавких вставок предохранителей

Металл вставки	Удельное сопротивление, $\rho \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$	Температура °С	
		Допустимая	Плавления вставки
Медь	0,0154	250	1083
Серебро	0,0147	-	961
Цинк	0,06	200	419
Свинец	0,21	150	327

В современных ПП с закрытыми патронами без наполнителя дуга гасится за счет высокого давления, возникающего в патроне вследствие взаимодействия дуги с газом, выделяемым фибровым материалом корпуса предохранителя. В предохранителях с наполнителем возникающая при плавлении вставок дуга соприкасается с мелкими зернами наполнителя (кварцевого песка и примесей на его основе), интенсивно охлаждается, деионизируется и быстро гасится.

Применение параллельных плавких вставок (при больших токах) позволяет при одном и том же суммарном поперечном сечении их получить большую поверхность охлаждения вставок и лучше использовать объем наполнителя (в ПП с наполнителем).

В установках низкого напряжения наибольшее распространение получили предохранители с закрытыми патронами с фибровыми разборными патронами (серии ПР) и предохранители с кварцевым наполнителем (серии ПН). Такие предохранители позволяют осуществлять замену плавких вставок и изготавливаются на напряжение до 500 В и токи до 1000А.

Предохранители работают бесшумно, практически без выброса пламени и газов, что позволяет устанавливать их на близком расстоянии друг от друга.

Предохранитель не должен отключать установку при перегрузках, которые являются эксплуатационными. Так, пусковой ток асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может достигать $7I_{ном}$. По мере разгона пусковой ток падает до значения, равного номинальному току двигателя. Длительность пуска зависит от характера нагрузки. Экспериментально установлено, что старение плавкой вставки не происходит при токах, равных половине тока плавления.

Номинальный ток предохранителя должен быть больше или равен номинальному току сети.

Номинальный ток плавкой вставки выбирается по пусковому току двигателя

$$I_{в.ном} = (0,4...0,5)I_n. \quad (3.12)$$

Если предохранитель стоит в цепи, питающей несколько двигателей, плавкую вставку рекомендуется выбирать по формуле

$$I_{в.ном} = 0,4 \left[I_p + (I_n - I_{ном.дв}) \right] \quad (3.13)$$

где I_p - расчетный номинальный ток в цепи; $(I_n - I_{ном.дв})$ - наибольшая разность для одного из двигателей.

Наряду с проверкой вставки по условиям пуска или кратковременной перегрузки необходимо проводить проверку ПП по условиям КЗ:

1) При $\frac{I_{кз}}{I_{в.ном}} \geq 10...15$, время перегорания вставки не превышает 0,15-

0,2с и на этом времени мало сказывается разброс характеристик вставок.

2) При кратностях $\frac{I_{кз}}{I_{в.ном}} \geq 3...4$ время отключения предохранителя мо-

жет достигать 15 с, что создает опасность для обслуживающего персонала, так как при этой кратности напряжение на предохранителе может оказаться опасно большим.

3) При $\frac{I_{кз}}{I_{в.ном}} \geq 1,6...2$ нагрев провода при перегрузках может быть

очень большим и может приводить к выгоранию изоляции. Поэтому установка плавких вставок с большим запасом может допускаться только в крайних случаях, когда выгорание изоляции проводников не грозит пожаром (провода уложены в стальных трубах и имеют огнестойкую изоляцию).

3.2. Трансформаторы

3.2.1. Устройство, принцип действия и назначение трансформаторов

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, в котором переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток той же частоты, но другого напряжения.

Потребность трансформирования (повышения и понижения переменного напряжения) вызвана необходимостью передачи электрической энергии на большие расстояния. Как известно, чем выше напряжение, тем меньше ток при равной мощности источника энергии. Следовательно, для передачи энергии потребуются провода меньшего сечения, что приведет к значительной экономии цветных металлов, являющихся материалом для проводов. Кроме того, потери электрической энергии в проводах также уменьшаются со снижением тока. В настоящее время при передаче электрической энергии от электростан-

ций к потребителям происходит многократное повышение и понижение напряжения.

По применению трансформаторы можно разделить на следующие виды.

1. Силовые трансформаторы, номинальная мощность которых изменяется от нескольких единиц до 1 млн. кВА и напряжение до 1250 кВ. Используются в сетях для распределения электроэнергии. К силовым относятся и трансформаторы малой мощности от 10 до 300 ВА, применяемые в устройствах промышленной электроники и автоматики.

2. Автотрансформаторы, имеющие, как правило, плавную регулировку выходного напряжения и используемые для изменения (регулирования) напряжения.

3. Измерительные трансформаторы, применяемые в качестве элементов измерительных устройств.

4. Трансформаторы специального назначения, используемые в конкретных электротехнических устройствах для определенных целей. Примерами могут служить сварочные трансформаторы для различных видов сварки, импульсные трансформаторы для преобразования высокочастотных импульсных периодически повторяющихся сигналов в радиолокационной технике и телевидении.

Конструктивное исполнение и электромагнитные процессы, происходящие в трансформаторах различных типов, имеют много общего. Поэтому для изучения их работы рассмотрим однофазный двухобмоточный трансформатор (рис. 3.14). Трансформатор состоит из стального сердечника, набранного из листов электрической стали толщиной 0,35 ... 0,5 мм для уменьшения потерь от вихревых токов. Листы сердечника покрываются лаком для изоляции друг от друга. Трансформатор имеет не менее двух обмоток, связанных между собой посредством общего магнитного потока. Обмотки электрически изолированы друг от друга; исключением в этом отношении являются автотрансформаторы, у которых обмотка низшего напряжения является частью обмотки высшего напряжения.

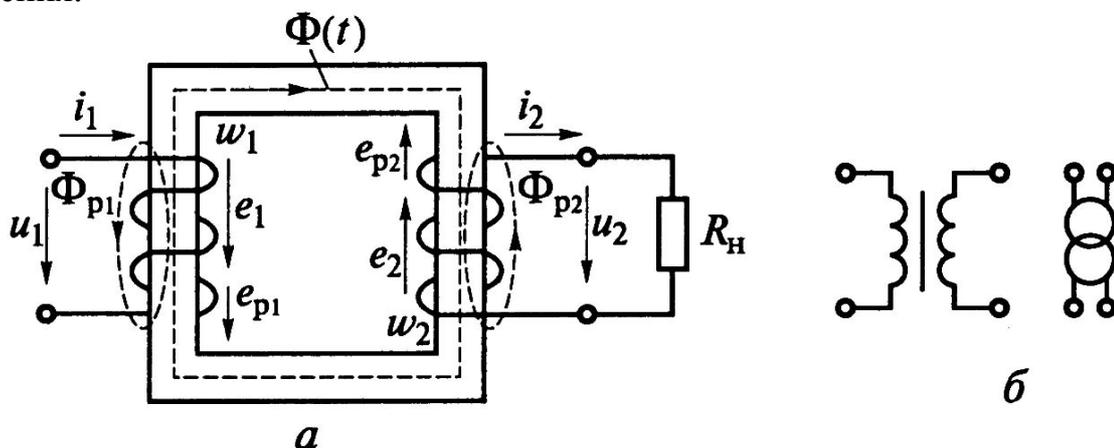


Рис. 3.14. Однофазный трансформатор

Обмотка трансформатора, соединенная с источником электроэнергии называется первичной (рис. 3.14, а). Соответственно, первичными именуются все величины, относящиеся к этой обмотке, - число витков w_1 , напряжение u_1 , сила тока i_1 и т.д. Обмотка, отдающая электроэнергию, и относящиеся к ней величины называются вторичными - w_2, u_2, i_2 . Варианты условных графических обозначений трансформатора приведены на рис. 3.14, б.

Под действием подведенного переменного напряжения u_1 в первичной обмотке возникает ток i_1 и возбуждается изменяющийся магнитный поток. Этот магнитный поток индуцирует в первичной обмотке трансформатора ЭДС самоиндукции e_1 , а во вторичной обмотке - ЭДС взаимной индукции e_2 . Напряжение u_2 на выходных зажимах трансформатора создает ЭДС e_2 . При замыкании вторичной цепи на нагрузку возникает ток i_2 , который образует собственный магнитный поток, накладывающийся на поток первичной обмотки. В результате создается общий поток Φ . Стрелки направления напряжения u_1 и тока i_1 представляют первичную обмотку как приемник энергии. Положительное направление потока Φ связано с током i_1 правилом буравчика. Стрелки направления e_2 и i_2 соответствуют представлению вторичной обмотки источником энергии. Силовые линии магнитного поля замыкаются как по сердечнику, так и по воздуху вокруг витков обмоток, создавая магнитные потоки рассеяния Φ_{p1} и Φ_{p2} , которые, в свою очередь, наводят в первичной и вторичной обмотках ЭДС рассеяния e_{p1} и e_{p2} .

3.2.2. Уравнения первичной и вторичной цепей трансформатора

Для первичной и вторичной обмоток можно записать следующие выражения:

$$\begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}; \\ e_{p1} &= -w_1 \frac{d\Phi_{p1}}{dt} = -L_{p1} \frac{di_1}{dt}; \quad e_{p2} = -w_2 \frac{d\Phi_{p2}}{dt} = -L_{p2} \frac{di_2}{dt}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

где L_{p1}, L_{p2} - индуктивности рассеяния обмоток.

По второму правилу Кирхгофа для первичной и вторичной обмоток трансформатора имеем:

$$u_1 = -e_1 - e_{p1} + i_1 R_1 = -e_1 + u_{L_1} + u_{R_1}, \quad (3.15)$$

$$\text{где } u_{L_1} = -e_{p1} = L_{p1} \frac{di_1}{dt}; \quad u_{R_1} = R_1 i_1;$$

$$u_2 = -e_2 - e_{p2} + i_2 R_2 = -e_2 + u_{L_2} + u_{R_2}, \quad (3.16)$$

где $u_{L_2} = -e_{p2} = L_{p2} \frac{di_2}{dt}$; $u_{R_2} = R_2 i_2$.

Для идеализированного трансформатора, у которого нет потоков рассеяния и активные сопротивления обмоток пренебрежимо малы, $u_1 = -e_1$, $u_2 = e_2$.

В случае если $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$, то из уравнения (3.17), записанного на основании закона электромагнитной индукции:

$$u_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.17)$$

следует, что

$$\Phi(t) = \frac{1}{w_1} \int u_1 dt = \frac{U_{1m}}{w_1 \omega} \cos \omega t = \underbrace{\Phi_m}_{\Phi_m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.18)$$

т.е. при синусоидальном входном напряжении u_1 магнитный поток в сердечнике $\Phi(t)$ также синусоидален, отстает от напряжения на угол $\pi/2$. $\Phi(t)$ и индуцирует в обмотках синусоидальные ЭДС, мгновенные значения которых следующие:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -w_1 \omega \cdot \Phi_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \underbrace{w_1 \omega \cdot \Phi_m}_{E_{1m}} \sin(\omega t - \pi); \quad (3.19)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -w_2 \omega \cdot \Phi_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \underbrace{w_2 \omega \cdot \Phi_m}_{E_{2m}} \sin(\omega t - \pi),$$

e_1 и e_2 отстают от Φ на угол $\pi/2$, а от u_1 - на угол π .

Действующие значения синусоидальных ЭДС обмоток следующие:

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad (3.20)$$

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m.$$

Тогда можно выразить коэффициент трансформации n трансформатора:

$$n = \frac{e_1}{e_2} = \frac{E_{1m}}{E_{2m}} = \frac{E_1}{E_2} = -\frac{u_1}{u_2}. \quad (3.21)$$

3.2.3. Уравнение намагничивающих сил трансформатора

В соответствии с законом полного тока мгновенное значение напряженности магнитного поля $H(t)$ связано с мгновенным значением результирующей намагничивающей силы трансформатора выражением

$$H(t)l_c = i_1 w_1 + i_2 w_2, \quad (3.22)$$

где l_c - длина средней магнитной линии сердечника трансформатора.

У идеализированного трансформатора при подключенной или отключенной нагрузке величина магнитного потока в сердечнике $\Phi(t)$ остается неизменной (так как неизменна амплитуда U_{1m} и $\Phi_m = U_{1m}/w\omega$), а следовательно, постоянна и напряженность $H(t)$. При разомкнутой вторичной цепи, когда $i_2 = 0$, трансформатор находится в режиме холостого хода, а магнитный поток $\Phi(t)$ возбуждается намагничивающей силой, созданной только первичной обмоткой. Отсюда получаем уравнение намагничивающих сил трансформатора

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_{1x} w_1, \quad (3.23)$$

где i_{1x} - ток холостого хода первичной обмотки.

Из уравнения намагничивающих сил (3.23) следует, что при пренебрежении током холостого хода первичной обмотки ($i_{1x} = 0$):

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1} = n^{-1}. \quad (3.24)$$

3.2.4. Приведение обмоток трансформатора

Коэффициент трансформации трансформаторов относительно велик, поэтому, анализируя работу трансформатора с помощью векторной диаграммы, трудно изобразить в одном масштабе первичное и вторичное напряжения. Для целей анализа осуществляют приведение вторичной обмотки к числу витков первичной, т.е. при построении диаграммы и расчетах заменяют реальный трансформатор с коэффициентом трансформации w_1/w_2 приведенным трансформатором, у которого коэффициент трансформации равен 1.

Приведение не должно изменить режим первичной цепи. Во вторичной цепи должны сохраняться неизменными энергетические условия, т. е. не изменяются распределение активной и реактивной мощностей между отдельными элементами вторичной цепи и значения самих мощностей. Приведенные величины обозначаются штрихом сверху: E'_2, I'_2, R'_2 и т.д.

Приведение ЭДС и напряжений. При $w_1 = w_2 \Rightarrow E_2 = E_1$ а так как $E_1 = nE_2 = \frac{w_1}{w_2} E_2$, то $E'_2 = nE_2 = \frac{w_1}{w_2} E_2$, где E'_2 - приведенная вторичная ЭДС.

В таком же отношении при приведении изменяются вторичное напряжение и падения напряжения во вторичной обмотке:

$$U'_2 = nU_2; I'_2 R'_2 = nI_2 R_2; I'_2 x'_2 = nI_2 x_2.$$

Приведение тока. При приведении не должна изменяться намагничивающая сила вторичной обмотки, чтобы не изменялся магнитный поток в сердечнике:

$$I_2 w_2 = I'_2 w_1 \Rightarrow I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{I_2}{n}.$$

В соответствии с уравнением намагничивающих сил имеем выражение для приведенного тока вторичной обмотки $I'_2 = I_2/n$.

Приведение сопротивлений. При приведении не должна изменяться полная мощность вторичной цепи:

$$S_2 = U_2 I_2 = U'_2 I'_2 = nU_2 I'_2 \Rightarrow I'_2 = \frac{I_2}{n} = \frac{w_2}{w_1} I_2.$$

На основании условия неизменной активной мощности получаем выражение для приведенного активного сопротивления вторичной обмотки:

$$I_2^2 R_2 = I'^2_2 R'_2 = \frac{I_2^2}{n^2} R'_2 \Rightarrow R'_2 = n^2 R_2 = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 R_2.$$

На основании условия неизменной реактивной мощности получаем выражение для приведенного реактивного сопротивления вторичной обмотки:

$$I_2^2 x_2 = I'^2_2 x'_2 = \frac{I_2^2}{n^2} x'_2 \Rightarrow x'_2 = n^2 x_2 = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 x_2.$$

3.2.5. Опыты холостого хода и короткого замыкания

Для определения величин, характеризующих работу трансформатора, используют опыты холостого хода и короткого замыкания.

Опыт холостого хода. Его проводят при питании первичной обмотки трансформатора номинальным напряжением и отсутствии приемника, подключаемого к зажимам вторичной обмотки (рис. 3.15).

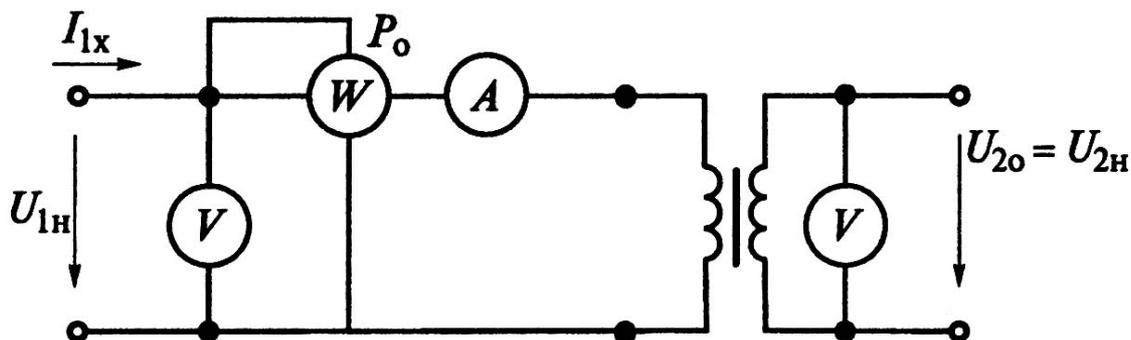


Рис. 3.15. Схема включения трансформатора при опыте холостого хода

В данном опыте определяют:

1. Коэффициент трансформации n . По показаниям вольтметров, пренебрегая падением напряжения в первичной обмотке $I_{1x}Z_1$, контролируют номинальное напряжение первичной обмотки и замеряют соответствующее напряжение вторичной обмотки. Коэффициент трансформации определяют по формуле:

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{U_{1H}}{U_{2o}}, \quad (3.25)$$

где U_{1H} , U_{2H} - номинальные значения напряжений обмоток, соответствующие номинальному (расчетному) режиму работы трансформатора; U_{2o} - напряжение вторичной обмотки.

2. Ток холостого хода I_{1x} , измеренный амперметром, обычно выражают в процентах от номинального тока первичной обмотки:

$$I_{1x} = \frac{I_{1x}}{I_{1H}} \cdot 100\%. \quad (3.26)$$

3. Потери в стали сердечника от гистерезиса. Мощность обмотки P_o , потребляемая трансформатором из сети и измеряемая ваттметром, расходуется на покрытие потерь в первичной обмотке трансформатора:

$$P_o = I_{1x}^2 R_1 + I_{1x}^2 R_o. \quad (3.27)$$

В реальных трансформаторах $R_1 \ll R_o$; $x_1 \ll x_o$, поэтому, измерив P_o , мы, тем самым, измерим мощность потерь в стали P_c .

4. Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{I_{1x} U_{1H}}. \quad (3.28)$$

5. Угол магнитных потерь:

$$\delta = 90^\circ - \varphi_o. \quad (3.29)$$

Опыт короткого замыкания. Опыт производится при понижении первичного напряжения трансформатора до величины $U_{1к}$, при которой токи в обмотках равны номинальным (рис. 3.16).

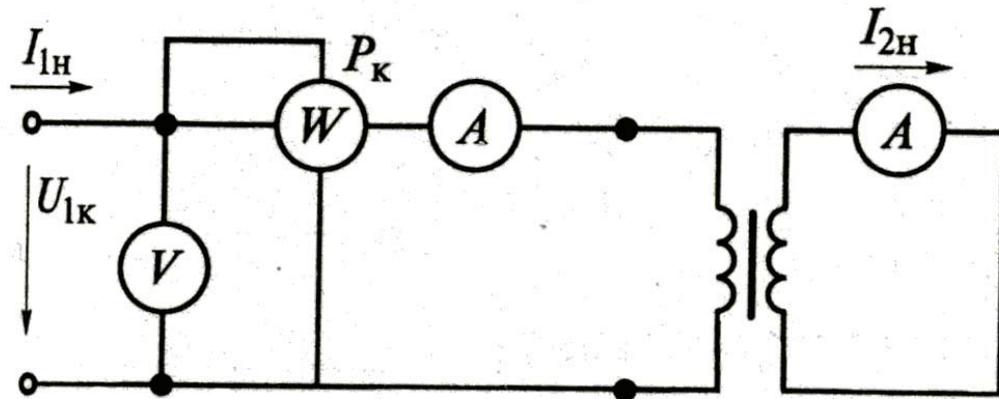


Рис. 3.16. Схема включения трансформатора при опыте короткого замыкания

При опыте короткого замыкания (так как он проводится при пониженном напряжении) потери в стали на гистерезис незначительны и ими пренебрегаем. Считаем, что вся мощность, потребляемая из сети, расходуется в сопротивлениях первичной и вторичной обмоток R_1 и R'_2 .

В этом опыте определяют:

1. Потери в обмотках P_k при номинальных токах (ваттметром).
2. Реальные сопротивления вторичной обмотки:

$$R_2 = \frac{R'_2}{n^2}; \quad x_2 = \frac{x'_2}{n^2}. \quad (3.30)$$

3. Активное и реактивное падение напряжения в обмотках, %:

$$U_o = \frac{I_{1н} R_k}{U_{1н}} \cdot 100\% = \frac{P_k}{U_{1н} I_{1н}} \cdot 100\% = \frac{P_k}{S_{1н}} \cdot 100\%; \quad (3.31)$$

$$U_p = \frac{I_{1н} Z_k}{U_{1н}} \cdot 100\%.$$

4. Полное падение напряжения короткого замыкания, %:

$$U_k = \frac{I_{1н} Z_k}{U_{1н}} \cdot 100\%. \quad (3.32)$$

3.2.6. Потери энергии и коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется отношением активной мощности вторичной обмотки к активной мощности первичной обмотки:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_9 + P_c} = \frac{P_2}{P_2 + P_k + P_o} = \frac{P_2}{P_2 + I_{1H}^2 R_k + P_o}, \quad (3.33)$$

где $P_9 = P_k$ - электрические потери; $P_c = P_o$ - потери в стали.

Введем коэффициент номинальной нагрузки:

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1H}} = \frac{I_2}{I_{2H}}, \quad (3.34)$$

Тогда

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \frac{I_2}{I_{2H}} = \beta S_H \cos \varphi_2; \quad (3.35)$$

$$I_1^2 R_k \frac{I_1^2}{I_{1H}^2} = \beta^2 P_k.$$

Окончательное выражение для КПД примет следующий вид:

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_o}. \quad (3.36)$$

Таким образом, КПД - это функция от нагрузки трансформатора $\eta = f(\beta)$ (рис. 3.17).

Чтобы определить, при каком значении β КПД максимален, надо взять производную от выражения (3.36) и приравнять ее к нулю:

$$\frac{d\eta}{d\beta} = 0 \Rightarrow \beta = \sqrt{\frac{P_o}{P_k}}. \quad (3.37)$$

У реального трансформатора η имеет максимум при коэффициенте нагрузки, равном примерно 0,5 и может достигать 99%.

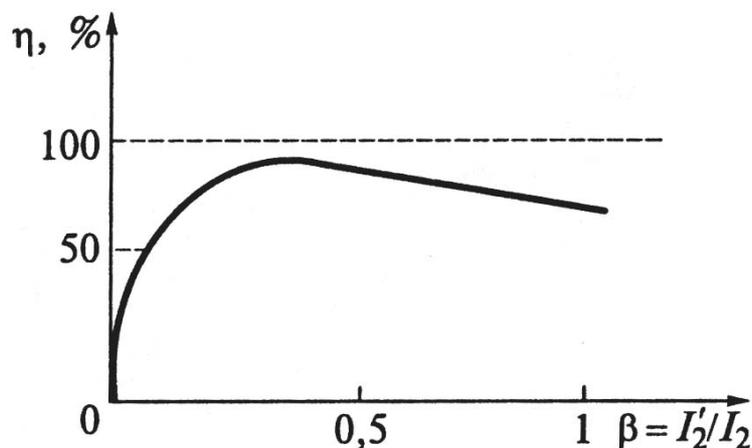


Рис. 3.17. Зависимость КПД трансформатора от нагрузки

3.2.7. Трехфазные трансформаторы

Трансформирование электроэнергии трехфазного тока можно осуществить тремя однофазными трансформаторами или одним трехфазным трансформатором. На каждом из трех стержней трансформатора размещается по две обмотки, принадлежащие одной фазе, одна из которых является первичной, а другая - вторичной (рис. 3.18).

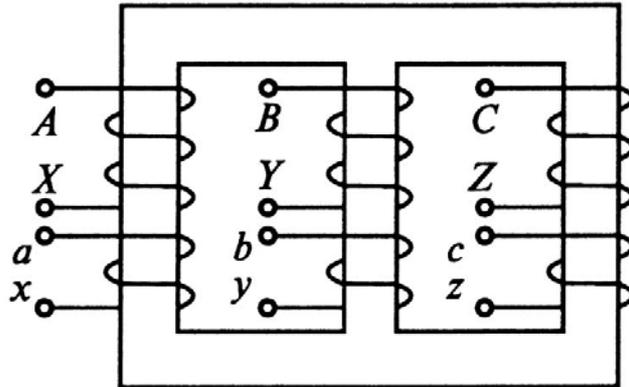


Рис. 3.1. Трехфазный трансформатор:

Начала первичных обмоток обозначаются большими буквами A, B, C , а их концы X, Y, Z ; для вторичных обмоток их начала обозначаются малыми буквами a, b, c , концы - x, y, z . Физические процессы, происходящие в каждой фазе трехфазного трансформатора, ничем не отличаются от аналогичных в однофазном трансформаторе.

Обмотки трехфазных трансформаторов могут соединяться по схемам «звезда» или «треугольник», которые условно обозначаются символами Y или Δ . Если соединенная «звездой» обмотка имеет выведенную нейтральную точку, то к знаку «звезды» приписывается значок ноль. Схема соединений обмоток трансформатора обозначается в виде дроби, в числителе которой указан способ соединения первичной обмотки, а в знаменателе - вторичной обмотки. Например: Y_0/Δ - первичная обмотка соединена «звездой» с выводом нейтрали, а вторичная обмотка соединена «треугольником» (рис. 3.19).

Чтобы условно обозначить угол сдвига фаз между одноименными векторами линейных напряжений первичных и вторичных обмоток, принято деление трансформаторов по группам соединения обмоток. Для обозначения группы соединения трехфазного трансформатора положение векторов линейных напряжений первичной и вторичной обмоток сопоставляют с положением стрелок часов. Вектор линейного напряжения первичной обмотки совмещают с минутной стрелкой, когда она стоит на цифре 12, а вектор линейного напряжения вторичной обмотки с часовой стрелкой, положение которой определяет номер группы (1, 2, 3, ... 12).

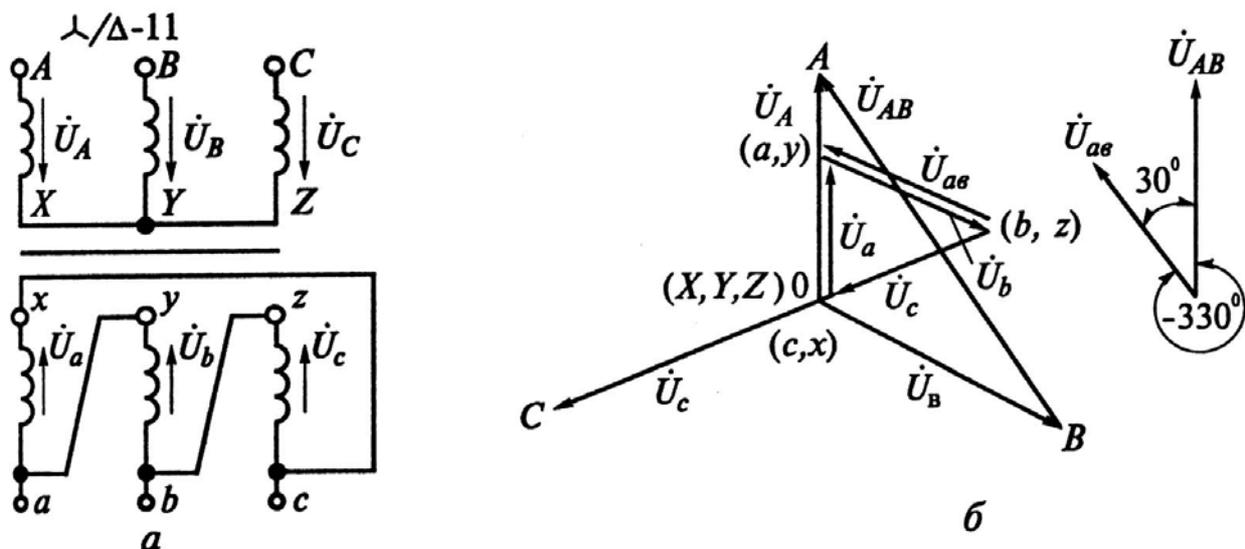


Рис. 3.19. Трехфазный трансформатор
a - схема соединения, *б* - векторная диаграмма

Схемы соединений «звезда» и «треугольник» могут иметь 12 различных групп со сдвигом фаз линейных напряжений $0...330^\circ$ через каждые 30° . Большое разнообразие групп соединений не удобно для эксплуатации, поэтому число различных схем и групп соединений ограничено тремя: $Y/Y_0 - 0$ (наиболее распространенное соединение); $Y/\Delta - 11$; $Y_0/\Delta - 11$.

Числа 0 и 11 указывают группу соединений трансформаторов, сдвиг фаз которых 0 и 330° .

Коэффициент трансформации трехфазного трансформатора при соединении Y/Y вычисляется как отношение линейных напряжений, при соединении Y/Δ - как отношение фазных напряжений.

3.2.8. Автотрансформаторы

Автотрансформаторы являются самостоятельными приборами класса трансформаторов. В отличие от силовых двухобмоточных трансформаторов они имеют одну обмотку для высокого и низкого напряжений. При этом обмотка низкого напряжения является частью обмотки высокого напряжения. Поэтому обмотки имеют не только магнитную связь, но и гальваническую; следовательно, энергия передается двумя путями: через гальваническую связь и магнитную. Однофазный понижающий трансформатор изображен на рис. 3.20.

Высокое напряжение U_1 подведено к обмотке, имеющей w_1 витков, из которых w_2 витков являются обмоткой низкого напряжения. При разомкнутой вторичной обмотке устанавливается ток холостого хода, равный I_{1x} . Магнитодвижущая сила $I_{1x}w_1$, создаваемая этим током, индуцирует ЭДС в первич-

ной и вторичной обмотках автотрансформатора по закону электромагнитной индукции ($E = 4,44 f w_1 \Phi_m$). Тогда коэффициент трансформации

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2}{I_1}, \quad (3.38)$$

что равно коэффициенту трансформации обычного трансформатора. При включении нагрузки во вторичной цепи протекает ток I_2 , который создает магнитодвижущую силу. Тогда магнитный поток в сердечнике

$$w_2 I_{21} = (w_2 - w_1) I_1 \Rightarrow I_{21} = (1 - n) I_1. \quad (3.39)$$

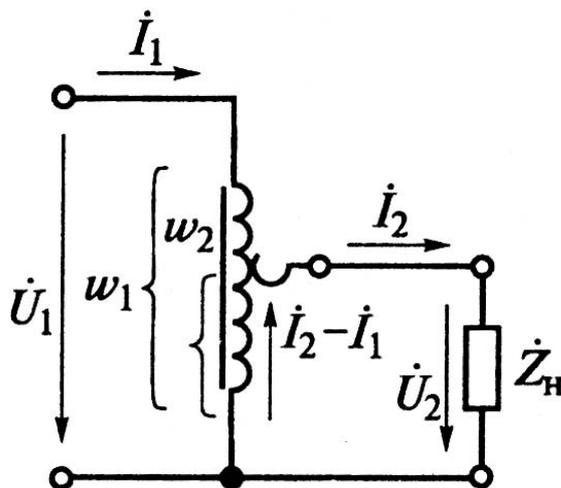


Рис. 3.20. Однофазный понижающий автотрансформатор

Отсюда видно, что ток в общей части обмотки значительно меньше, так как автотрансформаторы имеют коэффициент трансформации $1 < n < 3$. Поэтому при изготовлении автотрансформаторов затрачивается меньше ферромагнитного металла и проводов. Автотрансформаторы применяют как силовые устройства при передаче электрической энергии, для пуска мощных электрических двигателей и регулирования напряжения. По условиям техники безопасности нельзя применять трансформаторы, у которых первичное напряжение относится к категории высоких напряжений, а вторичное - к категории низких. Потери энергии в автотрансформаторах меньше, чем в двухобмоточных трансформаторах; следовательно, автотрансформаторы обладают большим КПД.

3.2.9. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы применяются для измерений в сетях высокого напряжения, защиты персонала от опасных значений напряжений и токов и расширения пределов измерения стандартных приборов. Существует два типа измерительных трансформаторов: трансформаторы напряжения и трансформаторы тока.

Трансформаторы напряжения служат для подключения вольтметров, электрических счетчиков энергии, различного рода реле и других приборов. Их изготавливают таким образом, что напряжение вторичной обмотки имеет номинальное напряжение 100 В при любом номинальном напряжении первичной обмотки. Показания вольтметра умножаются на коэффициент трансформации или прибор градуируется на измеряемое напряжение. Трансформаторы напряжения имеют классы точности 0,5; 1; 3. Также трансформаторы работают в режиме, близком к холостому ходу.

Трансформаторы тока служат для подключения амперметров, электрических счетчиков энергии, различного рода реле и других приборов. Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно с нагрузкой, а во вторичную обмотку включается амперметр. Номинальный ток вторичной обмотки имеет значение 5 А при любом номинальном токе первичной обмотки. Так как внутреннее сопротивление амперметра мало, то трансформатор тока работает в режиме, близком к короткому замыканию. При нормальной работе трансформатора тока магнитодвижущая сила равна разности МДС обмоток $(I_1 w_1 - I_2 w_2)$, а при размыкании вторичной обмотки МДС резко увеличивается, возрастают потери, трансформатор перегревается и, кроме того, возникают опасные напряжения, достигающие нескольких сотен вольт. Поэтому вторичную обмотку трансформатора тока нельзя оставлять разомкнутой.

Трансформаторы тока имеют классы точности 0,2; 0,5; 1; 3; 10.

3.2.10. Расчет трансформаторов

Как правило, расчет трансформаторов начинается с определения его вторичной мощности, т.е. мощности вторичной обмотки.

Для однофазных трансформаторов

$$S_2 = U_2 I_2, \text{ ВА}, \quad (3.40)$$

для трехфазных трансформаторов, с учетом фазного напряжения $U_{2\phi}$ и фазного тока $I_{2\phi}$:

$$S_2 = 3U_{2\phi} I_{2\phi}, \text{ ВА}. \quad (3.41)$$

Далее определяется мощность первичной обмотки

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta_T}, \text{ ВА}, \quad (3.42)$$

где η_T - КПД трансформатора, значение которого исходя опыта эксплуатации трансформаторов, принимают равным согласно табл. 3.6.

Токи первичной и вторичной обмоток для однофазных трансформаторов:

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1}; I_2 = \frac{S_2}{U_2}, \quad (3.43)$$

для трехфазных трансформаторов с учетом линейных действующих значений напряжений $U_{Л}$:

$$I_1 = \frac{S_1}{\sqrt{3}U_{Л1}}; I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3}U_{Л2}}, \quad (3.44)$$

где $U_{Л} = \sqrt{3}U_{\Phi}$ при соединении обмоток в звезду и $U_{Л} = U_{\Phi}$ при соединении обмоток в треугольник.

Таблица 3.6 - Рекомендуемые значения КПД, плотности тока и магнитной индукции трансформаторов

Мощность трансформатора, ВА	КПД, η_T	Плотность тока, А/мм ²	Магнитная индукция, B_c , Тл
10	0,82	4,8	1,10
20	0,85	3,9	1,25
40	0,87	3,2	1,35
70	0,89	2,8	1,40
100	0,91	2,5	1,35
200	0,93	2,0	1,25
400	0,95	1,6	1,15
700	0,955	1,3	1,10
1000	0,96	1,2	1,05
более 1000	0,97...0,98	1,2	0,8...1,05

Поперечное сечение сердечника трансформатора Q_c определяется по эмпирическим формулам:

для однофазных трансформаторов стержневого типа (рис. 3.21, а)

$$Q_c = k \sqrt{\frac{S_1}{2f}} \cdot 10^2, \text{ мм}^2, \quad (3.45)$$

для однофазных трансформаторов броневое типа (рис. 3.21, б):

$$Q_c = k \sqrt{\frac{S_1}{f}} \cdot 10^2, \text{ мм}^2, \quad (3.46)$$

для трехфазных трансформаторов стержневого типа (рис. 3.21, в)

$$Q_c = k \sqrt{\frac{S_1}{3f}} \cdot 10^2, \text{ мм}^2, \quad (3.47)$$

где f - частота тока сети, Гц; $K = 4 \dots 6$ для масляных и $K = 6 \dots 8$ для воздушных трансформаторов.

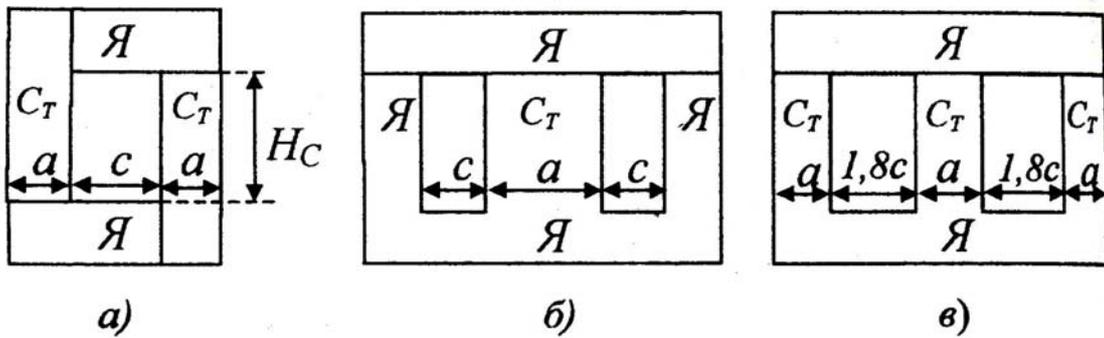


Рис. 3.21. Типы магнитопроводов трансформаторов (Я - ярмо, Ст - стержень)

Сечение сердечника выражается через его размеры $Q_c = ab$, где a - ширина пластин, мм; b - толщина пакета пластин, мм. Высота прямоугольного стержня, ширина окна сердечника и соотношения размеров сердечника определяются по упрощенным формулам (рис. 3.21):

$$H_c = (2,5 \dots 3,5)a, \quad c = \frac{H_c}{(2,5 \dots 3,5)}, \quad \frac{b}{a} = 1,2 \dots 1,8. \quad (3.48)$$

Сечение ярма трансформатора с учетом изоляции между листами для трансформаторов стержневого типа:

$$Q_{Я} = (1,0 \dots 1,15)Q_c, \quad \text{мм}^2, \quad (3.49)$$

для трансформаторов броневого типа

$$Q_{Я} = (0,5 \dots 0,57)Q_c, \quad \text{мм}^2. \quad (3.50)$$

Сечения проводов первичной и вторичной обмоток трансформаторов:

$$q_1 = \frac{I_1}{\Delta}, \quad \text{мм}^2, \quad q_2 = \frac{I_2}{\Delta}, \quad \text{мм}^2, \quad (3.51)$$

где Δ - плотность тока в обмотке (табл. 3.1), А/мм².

Числа витков первичной и вторичной обмоток

$$w_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4,44 f B_c Q_c}, \quad w_2 = w_1 \frac{U_2}{U_1}, \quad (3.52)$$

где B_c - магнитная индукция в сердечнике (табл. 3.6), Тл.

Диаметр круглого обмоточного провода определяется по следующей формуле:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{q}{\pi}}, \quad \text{мм}, \quad (3.53)$$

где q - найденное сечение провода обмотки, мм².

Для трансформаторов небольшой мощности (до 100...300 Вт) можно рекомендовать следующую конструкцию каркаса для размещения обмоток, выполненную из текстолита, электрокартона и других, пригодных для этой цели материалов (рис. 3.22):

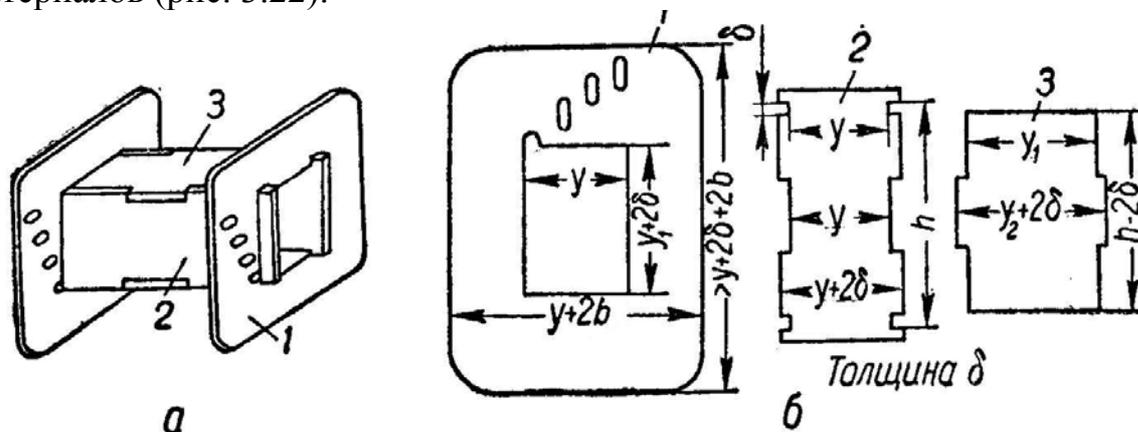


Рис. 3.22. Каркас трансформатора
а - в собранном виде; б - детали (по 2 шт.)

На рис. 3.22: y - ширина a (рис. 3.8) магнитопровода, y_1 - толщина набора пластин, h - высота окна выбранного профиля магнитопровода. Остальные размеры являются производными из параметров выбранного магнитопровода и толщины δ материала каркаса.

Далее проверяется размещение обмоток.

Число витков в слое обмотки:

$$w_{сл} = \frac{p - 2(\delta + 2)}{\alpha d_{из}}, \quad (3.54)$$

где h - высота окна, мм, δ - толщина материала каркаса, мм, $d_{из}$ - диаметр провода с изоляцией, мм, α - коэффициент неплотности (табл. 3.7).

Таблица 3.7. - Значения коэффициента неплотности α

Диаметр провода без изоляции, мм	α
0,08-0,11	1,3
0,15-0,25	1,25
0,35-0,41	1,2
0,51-0,93	1,1
Более 1,0	1,05

Число слоев:

$$n = \frac{w}{w_{сл}}, \quad (3.55)$$

где W - число витков обмотки, $W_{сл}$ - число витков в слое этой обмотки.

Толщина обмотки:

$$\delta_{об} = n_{сл} (d_{из} + \delta_{из}), \quad (3.56)$$

где $\delta_{из}$ - толщина изоляции между слоями.

Таким же образом подсчитывают толщины всех обмоток. Должно выполняться условие:

$$b \geq \delta + \sum \delta_{об} + \sum \delta_{пр}, \quad (3.57)$$

где $\sum \delta_{об}$ - суммарная толщина всех обмоток, $\sum \delta_{пр}$ - суммарная толщина всех прокладок между обмотками; b - ширина окна магнитопровода.

Если это условие не выполняется, то следует увеличить размеры сердечника и произвести расчет трансформатора сначала.

Для облегчения и ускорения расчетов трансформаторов разработана программа, реализованная на языке Basic, листинг которой приводится в приложении.

3.3. Электрические машины

Электрическая машина представляет собой электромеханическое устройство, осуществляющее преобразование механической энергии в электрическую (генераторный режим) или электрической энергии в механическую (двигательный режим).

Номинальный режим электрической машины - это режим работы, для которого она предназначена. Параметры номинального режима указываются заводом изготовителем на табличке, размещенной на корпусе электрической машины. Это, как правило, мощность, частота вращения ротора, напряжение, коэффициент мощности, для машин переменного тока и т.д.

Преобразование энергии электрическими машинами осуществляется в соответствии с законами электромагнитной индукции (закон Био – Савара - Лапласа, правило левой руки). Как известно, при движении проводника в магнитном поле, в нем будет наводиться ЭДС. Если проводник замкнут, к примеру, на резистор, то в проводнике потечет ток, в направлении, совпадающем с ЭДС.

При равномерном движении проводника в магнитном поле механическая мощность, приложенная к проводнику, преобразуется в электрическую (за вычетом потерь мощности в проводнике $I^2 R$). Наличие магнитного поля и проводников с током является необходимым условием для работы любой электрической машины как преобразователя энергии, а постоянное взаимодействие между ними достигается вращательным движением.

Таким образом, преобразование энергии в электрических машинах возможно лишь при наличии силового взаимодействия между магнитными полями вращающейся и не вращающейся части машины.

3.3.1. Электрические машины постоянного тока

3.3.1.1. Назначение, устройство и принцип действия машин постоянного тока. Способы их возбуждения

Электрические машины постоянного тока (МПТ) обратимы и могут работать в качестве генераторов или двигателей без изменения их схемы. Они нашли широкое применение в технике благодаря ряду преимуществ по сравнению с другими типами машин. Для двигателей это возможность плавного регулирования частоты вращения двигателя и хорошие пусковые свойства. В качестве тяговых двигателей МПТ используют на электротранспорте для привода подъемно-транспортных машин, прокатных станков, а в качестве исполнительных двигателей - в системах автоматического регулирования и т.д. В качестве генераторов МПТ служат источниками питания электродвигателей постоянного тока, электромагнитов различного назначения, аппаратуры контроля и управления, электролитических ванн, а также для зарядки аккумуляторных батарей, высококачественной сварки и т.д. Машины постоянного тока применяются в электрооборудовании автомашин, самолетов и судов. Диапазон мощностей машин составляет от единиц ватт до десятков тысяч киловатт.

Основные конструктивные части МПТ - статор и ротор. Статор является индуктором, ротор - якорем (рис. 3.23).

Статор состоит из массивного стального корпуса 1, к которому крепятся основные полюса 2 с полюсными наконечниками 4, образуя вместе с корпусом магнитопровод. Полюсные наконечники служат для равномерного распределения магнитной индукции в зазоре между полюсами индуктора и якорем. На основных полюсах расположены соединенные последовательно обмотки возбуждения 3, предназначенные для создания магнитного поля машины. В некоторых машинах магнитное поле создается с помощью постоянных магнитов.

Ротор 5 представляет собой цилиндр, набранный из листов электротехнической стали, с пазами по наружной стороне, насаженный на вал 7, вращающийся в подшипниках. В пазы укладывается обмотка ротора 11, выводы которой присоединяют к расположенному на валу коллектору 6; последний представляет собой цилиндр, набранный из медных пластин, изолированных друг от друга и от вала. Выводы от обмоток якоря присоединяют к соответствующим пластинам коллектора. К коллектору с помощью пружины прижимается щеткодержатель со щетками 10. Это дает возможность соединить вращающуюся обмотку якоря с внешней электрической цепью. Щетки устанавливают на геометрической нейтрали (ГН) - линии, проходящей перпендикулярно

оси машины через те точки поверхности якоря, где магнитная индукция поля основных полюсов равна нулю.

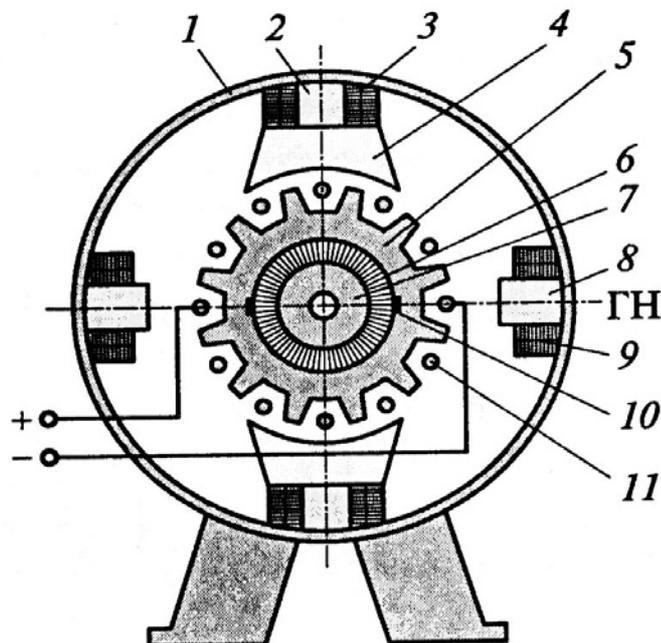


Рис. 3.23. Схематическое устройство машины постоянного тока:

- 1 - корпус; 2 - основной полюс; 3 - полюсной наконечник;
- 4 - обмотка возбуждения; 5 - ротор; 6 - коллектор; 7 - вал;
- 8 - дополнительные полюса; 9 - обмотка;
- 10 - щетка; 11 - обмотка ротора

Коллектор играет роль механического выпрямителя переменной ЭДС, индуцируемой в обмотке якоря. Помимо основных полюсов имеются дополнительные полюса 8 с обмоткой 9, которые служат для уменьшения искрения под щетками коллектора.

В зависимости от того, как включена обмотка возбуждения (ОВ) относительно сети и якоря, различают МПТ с независимым возбуждением (рис. 3.24, а) и самовозбуждением, которое подразделяется на параллельное (рис. 3.24, б), последовательное (рис. 3.24, в) и смешанное (рис. 3.24, г).

В машинах независимого возбуждения ОВ подключают к независимому источнику электрической энергии (аккумулятору, выпрямителю и др.). В машинах малой мощности возбуждение магнитного поля может создаваться постоянными магнитами. В машинах с самовозбуждением ОВ могут быть включены параллельно обмотке якоря, последовательно с ней и смешанно - параллельно и последовательно. При независимом и параллельном возбуждении для уменьшения потерь в ОВ и создания необходимой МДС обмоток следует уменьшить ток возбуждения, увеличив число витков. Обмотку возбуждения выполняют из провода малого сечения, который выбирают таким образом, чтобы ток возбуждения составлял 2... 5 % от номинального тока якоря.

При последовательном возбуждении ОВ изготавливают из провода большого сечения (поэтому сопротивление обмотки невелико), с небольшим числом витков. Ее рассчитывают на номинальный ток якоря.

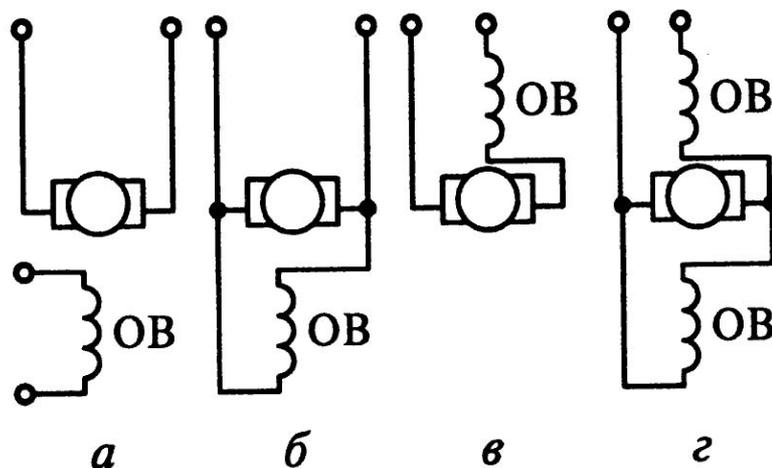


Рис. 3.24. Схемы возбуждения машин постоянного тока:
a - независимого; *б* - параллельного;
в - последовательного; *г* - смешанного

На машинах смешанного возбуждения на основных полюсах размещают по две обмотки, одну из которых включают параллельно обмотке якоря, другую - последовательно с обмоткой якоря.

3.3.1.2. Устройство обмоток якоря.

Электродвижущая сила и реакция якоря

Обмотка якоря разделена на секции, каждая из которых размещается в двух его пазах. Секцией называют часть обмотки якоря, состоящую из одного, двух и более витков. Расстояние (ширина секции) между сторонами секции называется первым шагом обмотки. Оно должно быть равно полюсному делению. Полюсным делением называют часть окружности якоря, приходящуюся на один полюс:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p},$$

где D - диаметр якоря, м; p - число пар полюсов.

Выводы секций присоединяют к коллекторным пластинам. Увеличение числа секций позволяет получить большее значение ЭДС между щетками и уменьшает диапазон колебаний ЭДС. В результате установки щеток на геометрической нейтрали обмотка якоря по отношению к щеткам оказывается разделенной на параллельные ветви с одинаковыми ЭДС и сопротивлениями. Если общее число активных проводников обмотки якоря равно N , а число па-

раллельных ветвей $2a$, то каждая параллельная ветвь состоит из $N/2a$ последовательно соединенных активных проводников различных секций.

Принцип действия МПТ в режиме генератора поясняется на примере рис. 3.25. Ротор машины представлен одновитковыми обмотками 1, 2. Виток 1 соединен с секторами 1, 3 коллектора, а виток 2 - с секторами 2, 4.

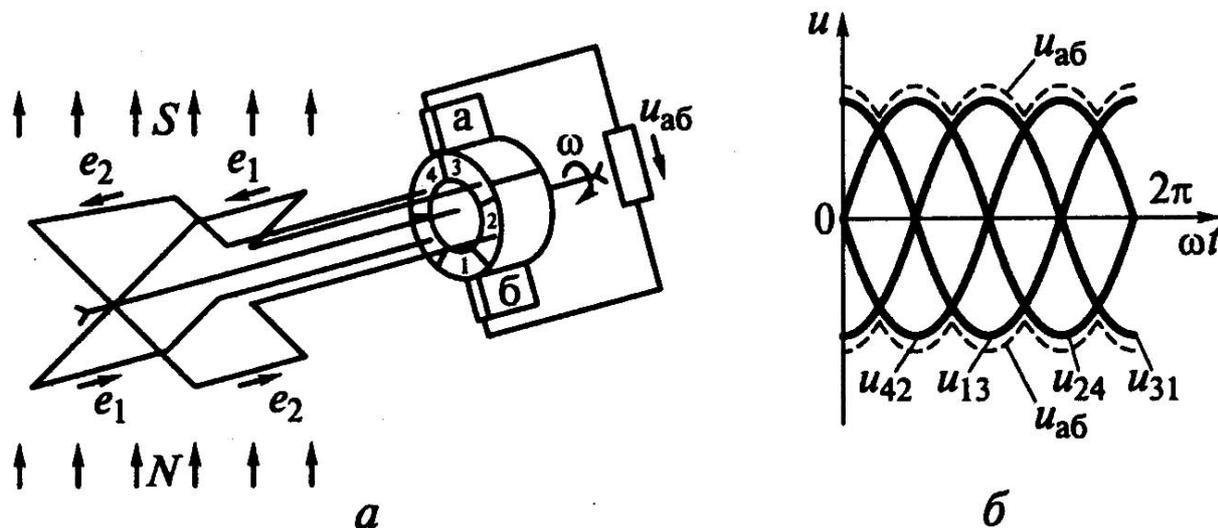


Рис. 3.25. Пример принципа действия МПТ в режиме генератора:
 а- упрощенная схема; б - эпюры напряжения между щетками;
 1...4 - секторы коллектора

Напряжения, генерируемые между соответствующими парами секторов, определяются следующими выражениями:

$$u_{13} = e_1 = E_m \cos \omega t; \quad u_{24} = e_2 = E_m \sin \omega t.$$

При вращении ротора по часовой стрелке сектора коллектора контактируют со щеткой *a* в последовательности 3, 4, 1, 2, 3, а со щеткой *б* - в последовательности 1, 2, 3, 4, 1. В результате напряжение между щетками $u_{a\bar{b}}$ изменяется в той же последовательности, в которой со щетками контактируют секторы коллектора: $u_{a\bar{b}} = u_{31}; u_{a\bar{b}} = u_{42}; u_{a\bar{b}} = u_{13}; u_{a\bar{b}} = u_{24}; u_{a\bar{b}} = u_{31}$.

Напряжение между щетками показано пунктирной линией (рис. 3.25, б).

При изменении направления вращения последовательность контакта щеток с секторами коллектора изменяется на противоположную, полярность напряжения между щетками изменяется также на противоположную.

Сопротивление якоря $R_{я}$, определяется эквивалентным сопротивлением параллельно соединенных ветвей обмотки и составляет от долей до единиц Ом.

Машина постоянного тока обычно выполняется многополюсной. При этом возрастает число щеток и параллельных ветвей якоря. Электродвижущая сила между щетками определяется ЭДС любой параллельной ветви и равна сумме мгновенных значений ЭДС секций, входящих в эту ветвь. Их направле-

ние одинаково. Следовательно, ЭДС якоря МПТ равна сумме мгновенных значений ЭДС проводников одной из параллельных ветвей обмотки якоря. Чтобы получить постоянное значение ЭДС между щетками $e_{щ}$, необходимо увеличить число секций, а следовательно, и число пластин коллектора.

Секции поочередно переходят из одной параллельной ветви в другую при вращении якоря. При этом направление ЭДС в секциях меняется на противоположное. Секция в момент перехода проходит через геометрическую нейтраль ($B = 0$), ЭДС в ней не индуцируется и должна быть равна нулю.

Индуцируемое напряжение в якоре МПТ равно сумме мгновенных значений ЭДС проводников одной из параллельных ветвей обмотки якоря. Электродвижущая сила в одном проводнике:

$$e_{np} = B_{cp} l_{np} v,$$

где $B_{cp} = \Phi / \tau \cdot l_{np}$ - среднее значение магнитной индукции на полюсном делении, Тл; Φ - магнитный поток полюсов, Вб; l_{np} - длина проводника (активной зоны), м; $v = D\Omega/2$ - линейная скорость перемещения проводника, м/с; $\Omega = 2\pi n/60$ - угловая скорость якоря, рад/мин; n - частота вращения якоря, об/мин. Тогда среднее значение ЭДС якоря:

$$E = e_{np} N / 2a = B_{cp} l_{np} v N / 2a, \quad (3.58)$$

где $N/2a$ - число последовательно соединенных проводников в каждой параллельной ветви.

Подстановкой в формулу (3.58) выражений для B_{cp} и v получаем:

$$E = \frac{pN}{60a} n\Phi = C_{\varepsilon} n\Phi, \quad (3.59)$$

где $C_{\varepsilon} = \pi n/60a$ - коэффициент, определяемый конструкцией машины.

Из формулы (3.59) следует, что ЭДС якоря прямо пропорциональна частоте его вращения и магнитному потоку полюсов машины. Эта формула справедлива как для режима генератора, так и для режима двигателя. При работе МПТ вхолостую (без нагрузки) так в обмотке якоря отсутствует: $I_{я} = 0$. При этом магнитное поле машины создается только МДС обмотки возбуждения при прохождении по ней тока I_{ε} . На рис. 3.26, а схематично показано распределение магнитных силовых линий потока возбуждения Φ_{ε} . В этом случае ось симметрии магнитного потока совпадает с осью магнитных полюсов индуктора и направлена перпендикулярно геометрической нейтрали.

При работе машины с нагрузкой в обмотке якоря возникает ток $I_{я}$, который создает в магнитопроводе якоря свое магнитное поле $\Phi_{я}$. Картина распределения магнитных силовых линий поля $\Phi_{я}$, созданного обмоткой якоря,

при условии, что ток возбуждения $I_e = 0$, показана на рис. 3.26, б. В этом случае ось симметрии поля якоря совпадает с геометрической нейтралью (ГН). Таким образом, в нагруженном генераторе кроме потока индуктора, создаваемого МДС обмотки возбуждения, существует поток якоря, создаваемый МДС обмотки якоря. Оба поля накладываются друг на друга и образуют результирующее магнитное поле $\Phi_{рез}$ (рис. 3.26, в). Магнитное поле генератора искажается, становится несимметричным.

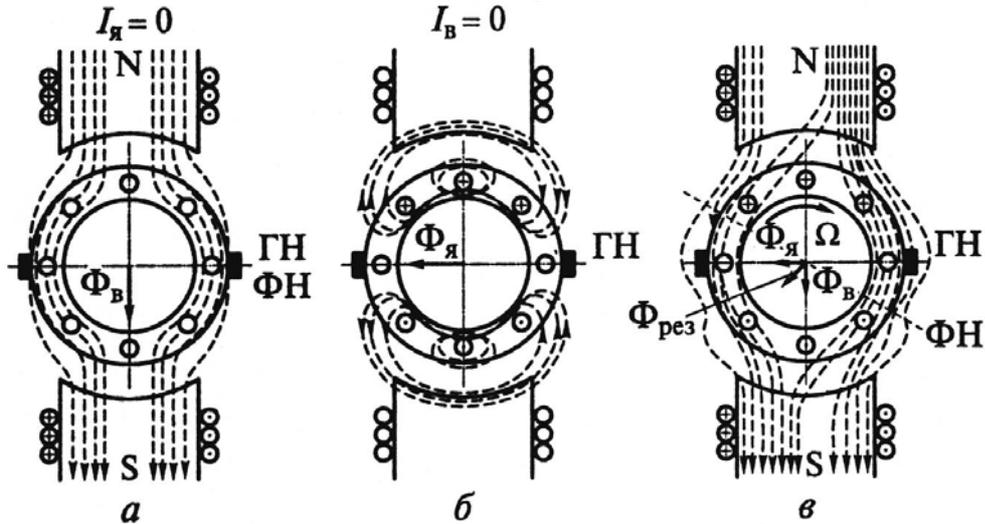


Рис. 3.26. Пояснение явлений реакции якоря:

- а - распределение магнитного поля в ненагруженном генераторе;
- б - магнитное поле якоря;
- в - результирующее магнитное поле якоря и полюсов

Под одним краем полюса магнитная индукция увеличивается (линии поля сгущаются), под другим - уменьшается (линии поля разряжаются). При этом физическая нейтраль (ФН) - линия, перпендикулярная оси магнитного потока, - смещается относительно ГН: у генератора - по направлению вращения, двигателя - против.

Влияние поля якоря на поле полюсов называется реакцией якоря. Она отрицательно сказывается на работе МПТ, приводит к необходимости смещать щетки на некоторый угол по ходу вращения якоря (для генераторного режима) и в противоположном направлении (для двигателя), так как в противном случае между щетками и коллектором может возникнуть сильное искрение. Кроме того, реакция якоря не только смещает поле полюсов, но частично ослабляет (размагничивает) его, что приводит к уменьшению напряжения на зажимах генератора, работающего под нагрузкой, а также к уменьшению частоты вращения в режиме двигателя. Сдвиг щеток производят только в МПТ без добавочных полюсов. Для уменьшения влияния реакции якоря применяют компенсационную обмотку, укладываемую в пазах полюсных наконечников основных полюсов, или размещают на статоре добавочные полюсы. Компенсационную обмотку и обмотки добавочных полюсов включают последовательно с

обмоткой якоря. Магнитное поле, создаваемое этими обмотками, направлено навстречу полю якоря, вследствие чего действие реакции якоря ослабляется.

3.3.1.3. Работа машины постоянного тока в режиме двигателя

Двигатель преобразует электрическую энергию в механическую. Принцип его действия состоит в следующем. К обмотке якоря через щетки коллектора подводится постоянное напряжение. Коллектор в данном случае выполняет функцию переключателя, обеспечивающего неизменность направления тока в проводах обмотки якоря, находящихся под соответствующими магнитными полюсами индуктора. Предположим, что под северным полюсом ток направлен к нам, а под южным - от нас (рис.3.27, а). В этом случае на проводники обмотки якоря, находящиеся в магнитном поле, действуют электромагнитные силы $F_{ЭМ}$. Совокупность этих сил создаст вращающий электромагнитный момент $M_{ЭМ}$, и якорь начинает вращаться со скоростью Ω . При этом в обмотке якоря индуцируется ЭДС, направление которой противоположно питающему напряжению, поэтому ее называют противоЭДС.

Применяя к схеме замещения цепи якоря (рис. 3.27, б) второе правило Кирхгофа, получают уравнение электрического состояния двигателя:

$$U = E + R_{я}I_{я}. \quad (3.60)$$

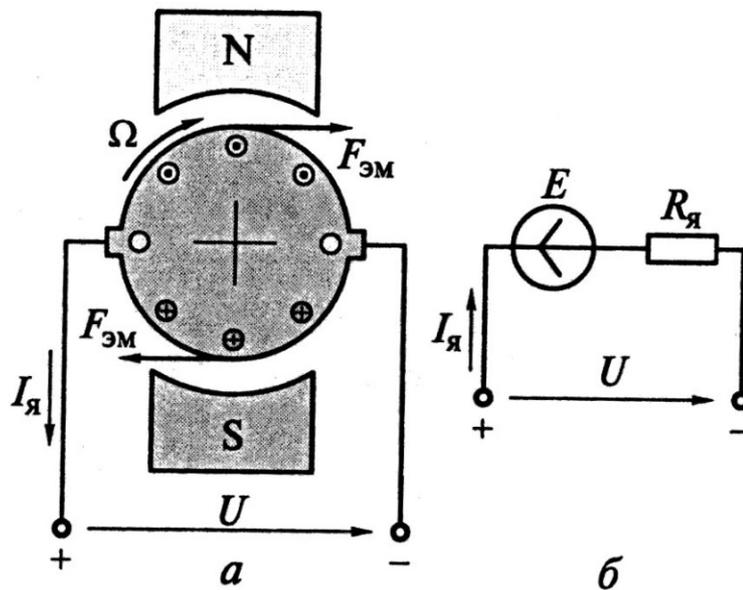


Рис. 3.27. Работа МПТ в режиме двигателя:
а - принцип действия двигателя; б - схема замещения цепи якоря

Умножив почленно уравнение (3.60) на величину $I_{я}$, получают выражение для электрической мощности, подводимой к двигателю от внешнего генератора:

$$P_{ЭМ} = UI_{я} = EI_{я} + R_{я}I_{я}^2. \quad (3.61)$$

Выражение (3.61) является уравнением баланса мощностей цепи якоря двигателя. Оно показывает, что электрическая мощность $P_{\mathcal{E}}$ преобразуется в электромагнитную мощность $P_{\mathcal{EM}}$ и мощность электрических потерь в обмотке якоря. Двигатели постоянного тока также классифицируют по способам возбуждения, общим свойствам и характеристикам. Свойства двигателя постоянного тока зависят от того, как меняется его магнитный поток при изменении механической нагрузки (момента сопротивления) на валу, т. е. фактически от способа возбуждения.

Различают двигатели параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Хотя указанные типы двигателей имеют разные эксплуатационные характеристики, им присущи также общие свойства и процессы (свойство саморегулирования, процессы пуска и реверса).

Пуском двигателя называют процесс разгона ротора от неподвижного состояния до установившегося значения частоты вращения. Пуск может продолжаться от долей секунды до нескольких десятков секунд. Пусковые качества двигателей оцениваются кратностью пускового момента и пускового тока к номинальной величине. Двигатели постоянного тока обладают хорошими пусковыми качествами. Они могут создавать большой пусковой момент при относительно небольшом пусковом токе.

Используя уравнение (3.60) электрического состояния двигателя, определяют ток во вращающемся якоре:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}. \quad (3.62)$$

В момент пуска двигателя (угловая скорость вращения равна нулю) в якоре не наводится противоЭДС, т. е. $E = 0$. Тогда из выражения (3.62) пусковой ток двигателя $I_{\text{ян}} = U/R_{\text{я}} \cong (10 \dots 30)I_{\text{я.ном}}$.

Такой большой пусковой ток может создать слишком большой пусковой момент: $M_n = C_M \Phi I_{\text{ян}}$, вызывающий рывок на валу, и привести к искрению на коллекторе. Для ограничения пускового тока последовательно с обмоткой якоря включают пусковой реостат, сопротивление R_n которого рассчитывают, исходя из кратковременно допустимого значения тока якоря и получения необходимого пускового момента:

$$I_{\text{н.доп}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_n} \leq (2 \dots 2,5)I_{\text{я.ном}}.$$

По мере разгона ротора в его обмотках возникает противоЭДС и значение тока уменьшается. При этом пусковой реостат постепенно выводят (вручную или автоматически). Двигатели мощностью до 1 кВт, имеющие сравнительно большое сопротивление якоря, можно запускать без пускового реостата. Пуск ДПТ может производиться также при пониженном напряжении источника питания.

Все электродвигатели обладают свойством автоматически создавать вращающий момент $M_{вр}$, равный моменту статического сопротивления на валу M_c . Это свойство двигателей называется саморегулированием. Рассмотрим, как протекает процесс саморегулирования. Предположим, что двигатель вращается с угловой скоростью Ω_1 и его вращающий момент равен моменту сопротивления на валу: $M_{вр1} = M_{c1}$. Пусть нагрузка на валу увеличилась: $M_{c2} > M_{c1}$. Скорость Ω_1 начинает падать, одновременно уменьшается противоЭДС $E = C_E \Omega \Phi$, а ток якоря $I_я = (U - E) / R_я$, следовательно, и вращающий момент $M_{вр} = C_M \Phi I_я$ увеличивается до тех пор, пока вращающий момент не станет равным моменту сопротивления: $M_{вр2} = M_{c2}$. При этом установится скорость $\Omega_2 < \Omega_1$.

Чем больше момент сопротивления, тем больше вращающий момент двигателя и наоборот. Следовательно, ток якоря двигателя зависит от механической нагрузки (момента сопротивления) на валу двигателя.

Изменение направления вращения якоря двигателя - реверсирование - можно осуществить, изменив направление вращающего момента. Знак момента изменится, если изменить направление тока в обмотке якоря или направление магнитных потоков полюсов (направление тока в обмотке возбуждения). Поэтому для реверса двигателей постоянного тока достаточно переключить концы обмоток якоря.

Основными характеристиками двигателей являются: электромеханическая, механическая, моментная, холостого хода, регулировочная.

Электромеханическая характеристика - зависимость частоты вращения якоря от его тока:

$$n = f(I_я) = \frac{U - R_я I_я}{C_E \Phi}.$$

Механическая характеристика - зависимость частоты вращения якоря от момента M на валу двигателя:

$$n = f(M) = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{MR_я}{C_E C_M \Phi^2}.$$

Моментная характеристика - зависимость момента M на валу двигателя от тока якоря, определяемая выражением:

$$M = C_M I_я \Phi.$$

Характеристика холостого хода - зависимость частоты вращения якоря от тока в обмотке возбуждения в режиме холостого хода при условии постоянства приложенного к зажимам двигателя напряжения U . Характеристика $n = f(I_в)$ при $U = \text{const}$ определяется выражением:

$$n = \frac{U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{C_E \Phi}$$

Регулировочная характеристика - зависимость тока в обмотке возбуждения от тока якоря или от полезной мощности P_2 на валу двигателя при условии $U = \text{const}$. Характеристика $I_{\text{в}} = f(I_{\text{я}})$ или $I_{\text{в}} = f(P_2)$ служит для регулирования частоты вращения. Она показывает, как надо менять ток возбуждения, чтобы с изменением нагрузки на валу двигателя частота вращения n оставалась постоянной.

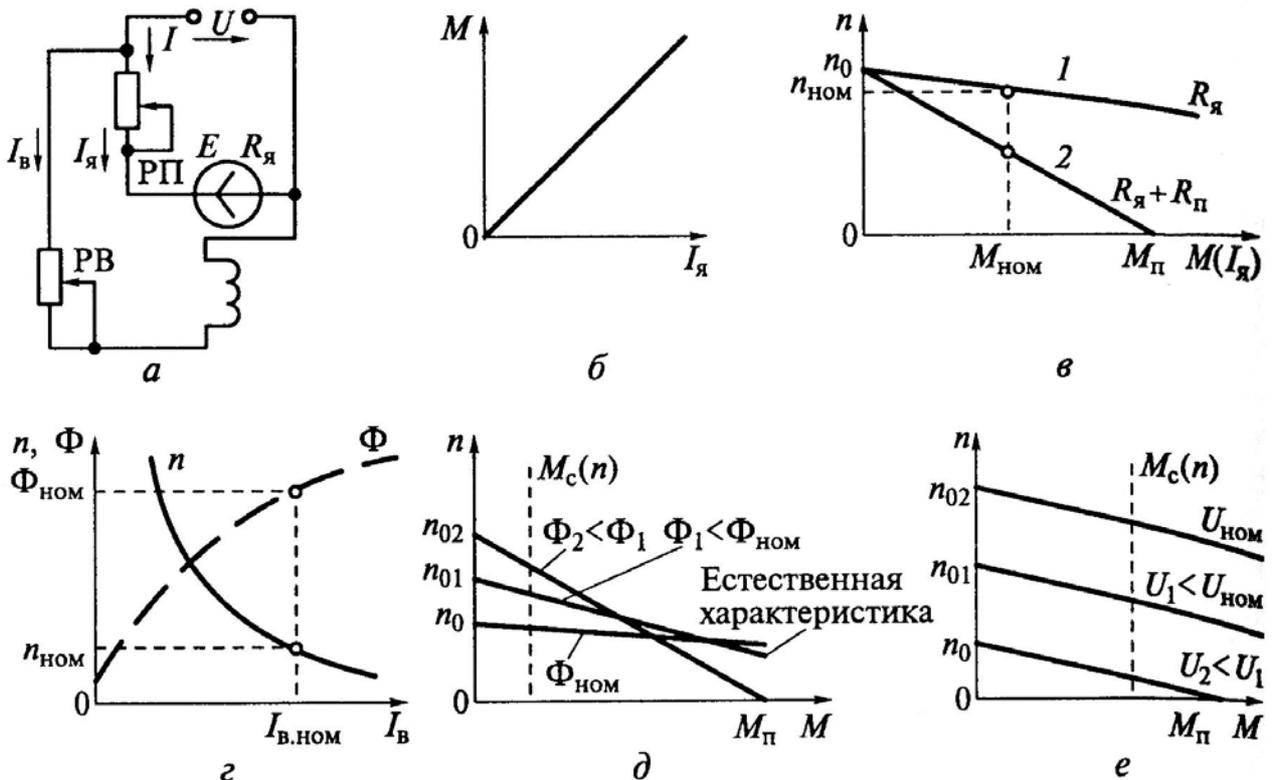


Рис. 3.28. Двигатель параллельного возбуждения:

a - схема; *б* - моментная характеристика; *в* - механические характеристики; *г* - характеристика холостого хода; *д* - механическая характеристика при полюсном регулировании; *е* - механическая характеристика при якорном регулировании; 1 - при выведенном РП; 2 - при введенном РП

Схема двигателя параллельного возбуждения приведена на рис. 3.28, *a*. В цепи якоря включен реостат пусковой (РП), который перед пуском полностью вводят для уменьшения пускового тока. В цепь возбуждения включен реостат регулирования тока возбуждения, а, следовательно, и магнитного потока, что необходимо для регулирования частоты вращения якоря. Для увеличения пускового момента регулировочный реостат перед пуском полностью выводят. По мере разгона двигателя РВ вводят, а РП выводят. Обмотка возбуждения двигателя может быть включена на напряжение другого источника (независимое возбуждение). При этом расширяются возможности регулирова-

ния частоты вращения двигателя, так как одновременно с изменением тока возбуждения можно регулировать напряжение питания. В зависимости от способа возбуждения двигателей их характеристики будут различны (рис. 3.28, б...е).

Двигатель последовательного возбуждения. Схема двигателя показана на рис. 3.29, а. Как видно на схеме, через обмотку якоря и обмотку возбуждения проходит один и тот же ток. Поэтому с изменением нагрузки на валу меняется ток якоря, а, следовательно, и магнитный поток, что вызывает изменение частоты вращения:

$$n = \frac{u - (R_{я} + R_{в})I_{в}}{C_E \Phi}$$

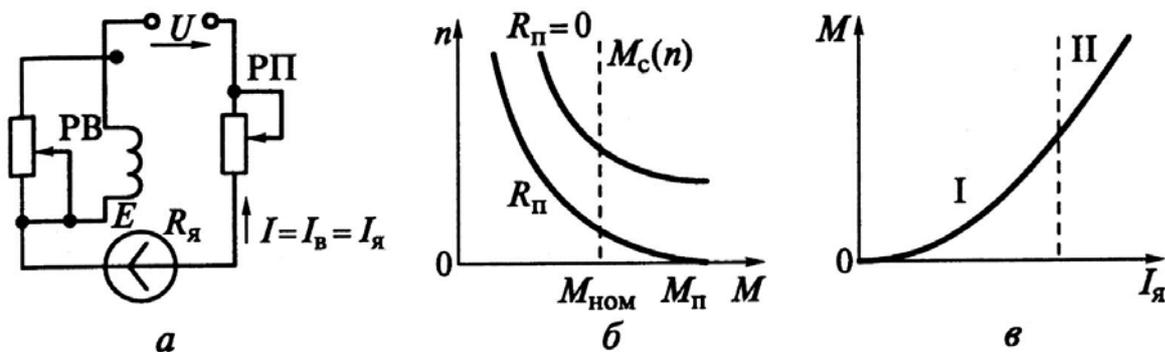


Рис. 3.29. Двигатель последовательного возбуждения:

а - схема; б - механическая характеристика; в - моментная характеристика; I, II - участки изменения пускового момента

С увеличением нагрузки возрастает ток якоря, увеличиваются падения напряжений в сопротивлениях обмоток якоря и возбуждения, но одновременно увеличивается и магнитный поток Φ . Поэтому частота вращения n будет снижаться с ростом потока Φ в большей степени по сравнению с частотой вращения двигателя параллельного возбуждения (рис. 3.29, б), т.е. для двигателя последовательного возбуждения механическая и электромеханическая характеристики более «мягкие». По мере насыщения магнитной системы «жесткость» характеристик возрастает и гиперболы переходят в наклонные прямые.

Моментная характеристика двигателя последовательного возбуждения (рис. 3.29, в) имеет два участка: при небольших токах якоря поток Φ полюса пропорционален току $I_{я}$, а момент M - квадрату тока $I_{я}$, т.е. момент изменяется по параболе, что создает большой пусковой момент - участок I; с увеличением тока $I_{я}$ магнитная система насыщается, поток $\Phi = \text{const}$ и парабола переходит в прямую - участок II. Отличительной особенностью двигателя последовательного возбуждения является то, что его нельзя запускать без нагрузки, так как в этом случае частота вращения якоря превышает допустимую

- двигатель идет «вразнос». Нагрузка должна составлять не менее 25...30 % номинальной.

Способы регулирования частоты вращения двигателя последовательного возбуждения. Реостатное регулирование осуществляют за счет сопротивления, включаемого последовательно с обмоткой якоря. Увеличение сопротивления приводит к уменьшению частоты вращения, но одновременно к увеличению потерь энергии. Способ не экономичен и применяется редко.

Полюсное регулирование осуществляют шунтированием (замыванием) обмотки возбуждения реостатом возбуждения, что приводит к изменению тока возбуждения, а следовательно, и магнитного потока. Уменьшение тока возбуждения вызывает увеличение частоты вращения при небольших нагрузках. Этот способ применяют в двигателях малой мощности, когда требуется плавное регулирование. В двигателях большой мощности полюсное регулирование производят замыканием накоротко частей витков обмотки возбуждения, что приводит к уменьшению числа витков, а, следовательно, МДС и магнитного потока. Получается ступенчатое регулирование, которое применяется на тяговых двигателях электрического транспорта.

Безреостатное регулирование (ступенчатое изменение питающего напряжения на тяговых двигателях электротранспорта) осуществляют групповым параллельным или последовательным подключением двигателей к сети. Двигатели последовательного возбуждения применяют не только как тяговые на электротранспорте, но также в крановых установках и летательных аппаратах для обеспечения больших пусковых моментов.

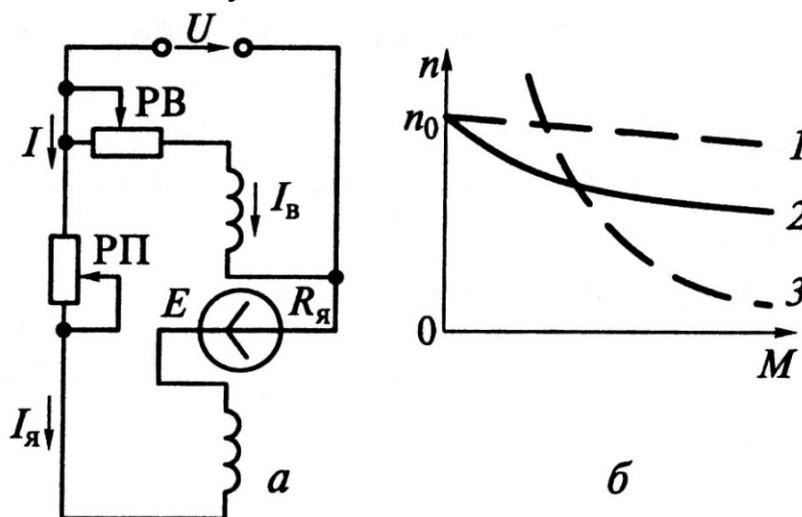


Рис. 3.30. Двигатель смешанного возбуждения:
а - схема; б - механические характеристики параллельного (1), смешанного (2) и последовательного (3) возбуждения

Двигатели смешанного возбуждения. Схема двигателя представлена на рис. 3.30, а. На полюсах имеются две обмотки: параллельная и последовательная. Основной считается та, которая создает не менее 70 % всей МДС. Как правило, последовательную обмотку включают согласно с параллельной, т. е.

магнитные потоки, создаваемые обмотками, складываются. На рис. 3.30, б показаны механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения (кривая 2) и для сравнения - механические характеристики двигателей параллельного (прямая 7) и последовательного (кривая 3) возбуждений.

3.3.2. Асинхронные двигатели

3.3.2.1. Назначение, устройство и принцип действия асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель (АД) состоит из двух основных частей: неподвижной - статора и вращающейся - ротора, которые отделены друг от друга воздушным зазором (рис. 3.31).

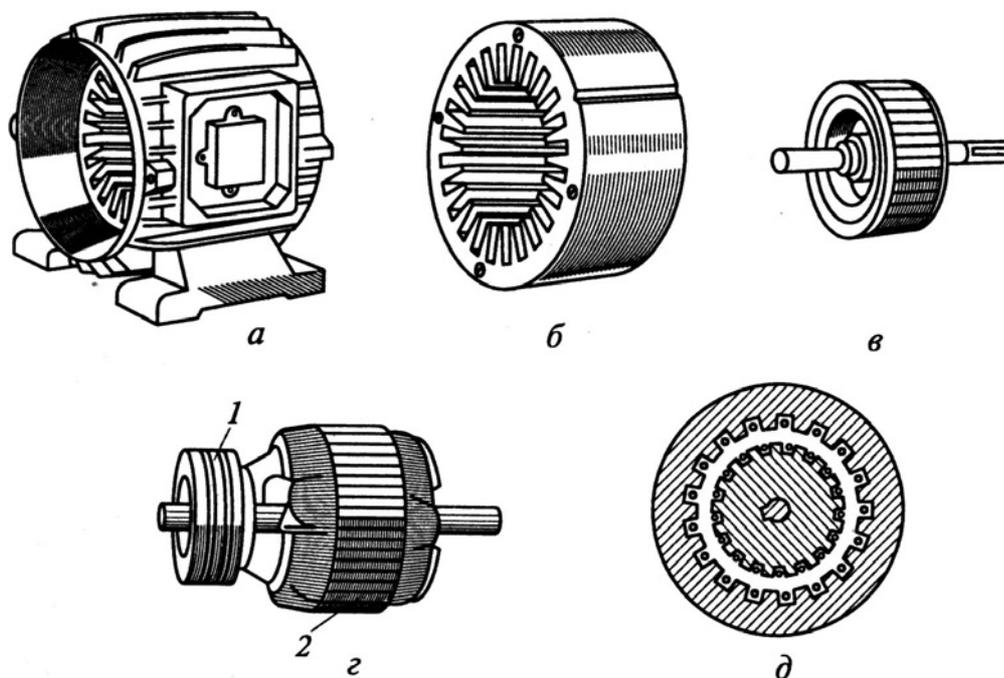


Рис. 3.31. Асинхронный двигатель:

а - корпус асинхронной машины с сердечником статора; *б* - сердечник статора; *в* - короткозамкнутый ротор; *г* - фазный ротор с контактными кольцами; *д* - магнитная система; 1 - контактное кольцо; 2 - обмотка

Статор представляет собой полый цилиндр (рис. 3.31, *а*), набираемый из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. На внутренней поверхности статора имеются пазы (рис. 3.31, *б*), в которые закладывается трехфазная обмотка.

Ротор - это цилиндр, набираемый из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, на поверхности которого имеются пазы для трехфазной обмотки ротора.

По типу обмотки ротора асинхронные двигатели подразделяют на АД с короткозамкнутой обмоткой ротора (рис. 3.31, в) и АД с фазной обмоткой ротора (рис. 3.31, з).

Короткозамкнутая обмотка ротора выполняется в виде «беличьей клетки», т. е. в пазы ротора вставляются стержни из меди или алюминия, которые с торцов замыкаются кольцами из того же материала.

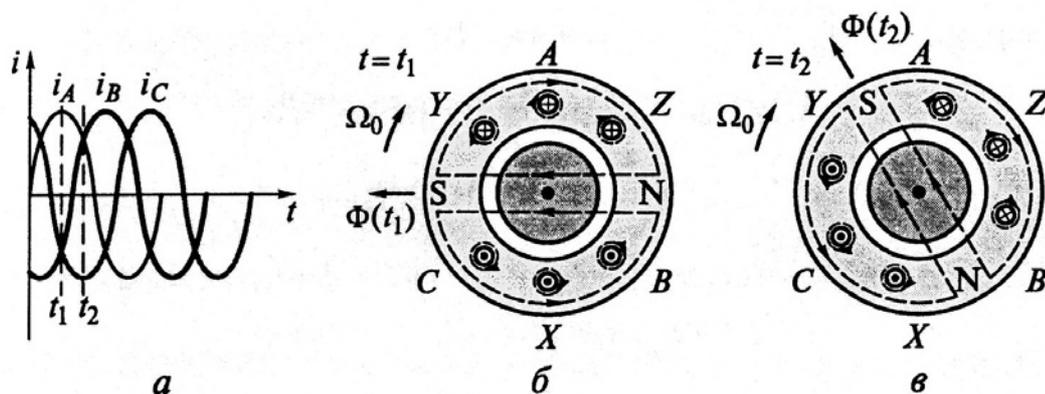


Рис. 3.32. Создание вращающегося поля трехфазной обмоткой статора: а - эпюры токов напряжения в обмотках статора; б - направление токов в обмотках статора в момент времени t_1 ; в - в момент времени t_2

Принцип действия АД основан на создании вращающегося магнитного поля с помощью трехфазной обмотки статора (рис. 3.31, д), токи в каждой фазе которой сдвинуты на 120° (рис. 3.32, а) относительно друг друга. Магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них (на основании закона электромагнитной индукции) переменную ЭДС, направление которой определяется по правилу правой руки (рис. 3.32, б).

Так как обмотка ротора замкнута, переменная ЭДС вызывает в ней ток того же направления, что и сама ЭДС (рис. 3.32, в). В результате взаимодействия тока ротора с вращающимся магнитным полем возникает сила, действующая на проводники ротора, направление которой определяется по правилу левой руки (сила определяется на основании закона Ампера: $F = B/I$).

Сила создает момент, направленный в ту же сторону, что и сила, под действием которой ротор приходит в движение (рис. 3.33).

Вращающееся поле перемещается в воздушном зазоре с частотой вращения, об/мин, $n = 60f_1/p$, где f_1 - частота питающей сети; p - число пар полюсов статора. Частота вращения ротора n всегда меньше частоты вращения магнитного поля статора n_0 , так как создание механического момента вращения возможно лишь тогда, когда имеет место движение проводников ротора относительно вращающегося проводники магнитного поля.

Величина $S = \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot 100\%$ называется скольжением. При номинальной нагрузке скольжение АД составляет 1... 6 %.

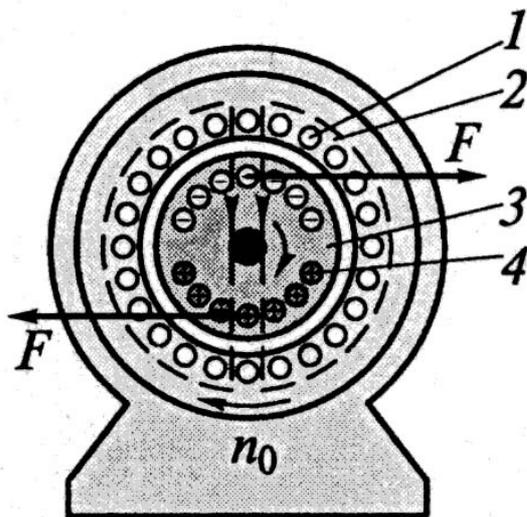


Рис. 3.33. Принцип действия асинхронного двигателя:
1 - обмотка статора; 2 - статор; 3 - ротор; 4 - обмотка ротора

3.3.2.2. Электродвижущие силы обмоток статора и ротора

Вращающееся магнитное поле, распределенное вдоль воздушного зазора по синусоидальному закону, пересекает проводники обмотки статора и наводит в них переменную синусоидальную ЭДС, действующее значение которой по аналогии с трансформатором имеет следующий вид:

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_m K_{o1}$$

где f_1 - частота тока в статоре; w_1 - число витков фазы; Φ_m - амплитуда магнитного потока; K_{o1} - обмоточный коэффициент, учитывающий, что каждая фаза статора состоит из секций, сдвинутых в пространстве относительно друг друга, а потому результирующая ЭДС одной фазы обмотки статора будет определяться не арифметической, а геометрической суммой ЭДС секций, т.е.

$$K_o = \frac{E}{NE_c},$$

где E - геометрическая сумма ЭДС секций; NE_c - алгебраическая сумма ЭДС секций.

Для ЭДС фазы неподвижного ротора имеем:

$$E_2 = 4,44 f_1 w_2 \Phi_m K_{o2}.$$

Так как частота вращения магнитного поля статора относительно вращающегося ротора с учетом выражения для скольжения:

$$n_s = n_0 - n = (n_0 - n) \frac{n_0}{n_0} = n_0 S,$$

то частота ЭДС фазы вращающегося ротора:

$$f_2 = \frac{pn_s}{60} = \frac{pn_0}{60} S = f_1 S,$$

откуда выражение для действующего значения ЭДС вращающегося ротора имеет следующий вид:

$$E_{2S} = 4,44 f_1 S w_2 \Phi_m K_{o2} = E_2 S.$$

Таким образом, ЭДС обмотки ротора пропорциональна скольжению при $n = 0, S = 1; E_2 S = E_2$. При $n = n_0, S = 0; E_2 S = 0$.

3.3.2.3. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Во время работы АД происходит процесс преобразования электрической энергии в механическую, который сопровождается потерями энергии и иллюстрируется энергетической диаграммой (рис. 3.34).

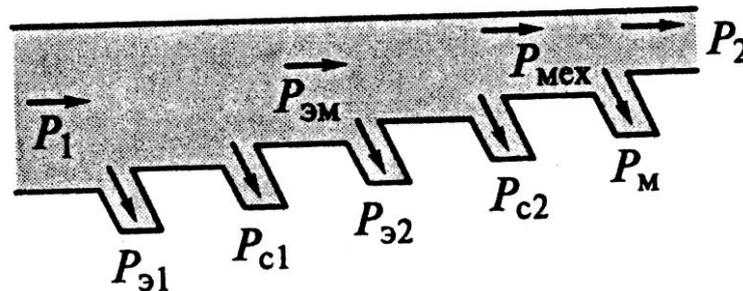


Рис. 3.34. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Двигатель потребляет из сети активную мощность:

$$P_1 = m_1 U_{1\phi} I \cos \varphi_1,$$

где m_1 - число фаз статора, $U_{1\phi}$ - напряжение фазы статора, В.

Часть этой мощности теряется на энергетические потери в обмотке статора:

$$P_{\varepsilon 1} = m_1 I_1^2 R_1,$$

часть P_{c1} - в стали статора на перемагничивание стального сердечника.

Оставшаяся часть мощности передается через магнитное поле ротору и называется электромагнитной мощностью:

$$P_{\varepsilon m} = P_1 - P_{\varepsilon 1} - P_{c1}.$$

В обмотке ротора имеют место электрические потери:

$$P_{\varepsilon 2} = m_2 I_2'^2 R_2'.$$

Кроме того, есть потери в стали P_{c2} , но так как частота ЭДС f_2 в роторе мала и составляет 0,5...3 Гц, то потери в стали P_{c2} крайне малы.

Оставшаяся мощность преобразуется в механическую мощность двигателя и называется полной механической мощностью:

$$P_{мех} = P_{эм} - P_{э2} - P_{c2}.$$

Кроме того, в двигателе существуют механические потери $\Delta P_{мех}$ (потери на трение в подшипниках, вентиляционные потери). Полезная мощность на валу двигателя

$$P_2 = P_{мех} - \Delta P_{мех}.$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

3.3.2.4. Вращающий момент асинхронного двигателя

Вращающий момент АД является электромагнитным моментом как результат взаимодействия вращающегося магнитного поля АД с токами роторной обмотки.

Электромагнитная мощность двигателя может быть представлена выражением:

$$P_{эм} = M\omega_0,$$

где ω_0 - угловая скорость вращения магнитного поля двигателя, откуда вращающий момент двигателя

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_0}. \quad (3.63)$$

Однако, на практике, для вычисления электромагнитного вращающего момента асинхронных двигателей, пользуются эмпирической формулой:

$$M = 2,13 p \omega_0 k_1 \Phi_m I_{a2}, \quad (3.64)$$

где $k_1 \approx 0,9$ - постоянный коэффициент, I_{a2} - активная составляющая тока ротора.

3.3.2.5. Зависимость вращающего момента от скольжения и механическая характеристика двигателя

Используя метод Гаусса, можно построить зависимость электромагнитного вращающего момента от скольжения $M = f(S)$ (рис. 3.35). При скольжении $S = 1$ двигатель развивает пусковой момент M_n . При скольжении в

диапазоне $0,12 < S < 0,2$ - максимальный момент M_{\max} и при $0,01 < S < 0,06$ - номинальный момент M .

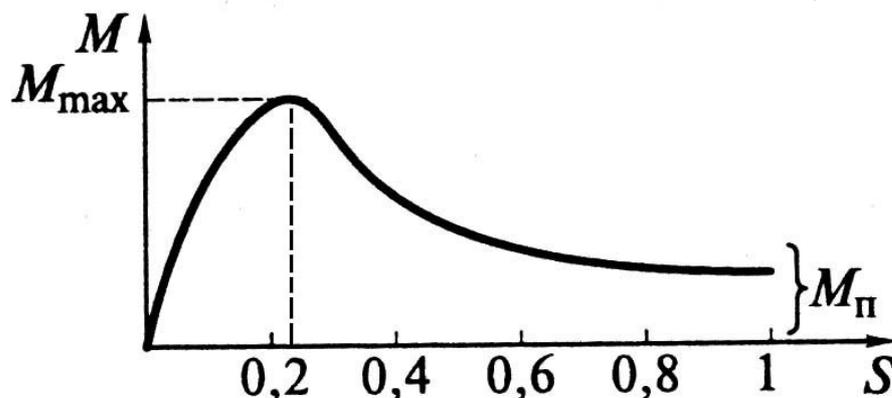


Рис. 3.35. Зависимость вращающего момента от скольжения

Максимальный момент определяет перегрузочную способность асинхронного двигателя. Максимальный момент пропорционален квадрату сетевого напряжения, что делает его очень чувствительным к изменению напряжения сети.

Участок характеристики $M = f(S)$ от $S = 0$ до $S = S_{M_{\max}}$ называется устойчивым, а от $S = S_{M_{\max}}$ до $S = 1$ - неустойчивым. Физический смысл заключается в том, что при работе на устойчивой части характеристики момент, развиваемый АД, автоматически следует за изменением момента нагрузки, а на неустойчивой части этого явления нет, что может привести к остановке двигателя.

В каталогах и справочниках по асинхронным двигателям значения пускового и максимального моментов задаются в виде отношений этих величин к номинальному моменту двигателя:

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{\text{НОМ}}}; K_n = \frac{M_n}{M_{\text{НОМ}}},$$

где λ - коэффициент перегрузочной способности; K_n - кратность пускового момента.

Для нахождения M_{\max} и M_n предварительно вычисляют номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{НОМ}} = 9550 \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}},$$

где $P_{\text{НОМ}}$ - номинальная мощность, кВт; $\eta_{\text{НОМ}}$ - номинальный КПД.

Механической характеристикой называется зависимость скорости вращения ротора двигателя от момента, развиваемого двигателем (рис. 3.36): $n = f(M)$. По своей форме она отличается от кривой $M = f(S)$ только положением к координатным осям. Для получения механической характеристики используют формулу $n = n_0(1 - S)$, учитывая связь между скольжением и моментом.

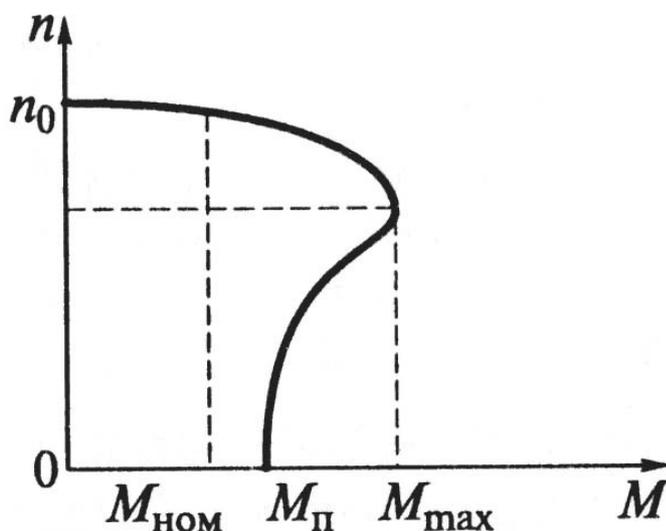


Рис. 3.36. Механическая характеристика асинхронного двигателя

3.3.2.6. Рабочие характеристики асинхронных двигателей

Рабочими характеристиками АД принято называть зависимости скорости вращения n , вращающего момента M , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и КПД $\eta = P_2/P_1$ от мощности P_2 двигателя на валу при номинальной частоте питающей сети $f_1 = const$ и напряжении на зажимах статора $U_1 = const$ (рис. 3.37).

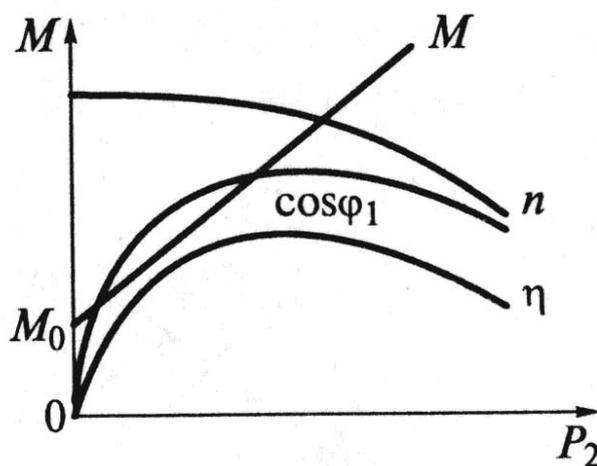


Рис. 3.37. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Так как $P_2 \approx P_{эм} = M\omega_0$, то зависимость $n = f(P_2)$ - скоростная характеристика - мало отличается по форме от механической характеристики двигателя $n = f(M)$.

Вращающий момент M , развиваемый АД, складывается из полезного момента M_2 , отдаваемого на валу, и момента холостого хода M_0 : $M = M_2 + M_0$. Полезный момент $M_2 = P_2/\omega_0$ практически линейно зависит от P_2 . Момент холостого хода затрачивается на покрытие механических потерь двигателя и практически не зависит от нагрузки двигателя:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}.$$

При холостом ходе АД $\cos \varphi_1$ обычно не превышает величины 0,2. При росте нагрузки на валу увеличивается ток статора, в основном его активная составляющая, и увеличивается $\cos \varphi_1$. При нагрузках, близких к номинальной, рост $\cos \varphi_1$ замедляется из-за увеличения реактивной мощности полей рассеяния. При номинальной нагрузке $\cos \varphi_1 = 0,7 \dots 0,85$.

При отсутствии нагрузки КПД равен нулю, а по мере увеличения мощности P_2 он повышается. При больших нагрузках рост КПД замедляется.

3.3.2.7. Пуск асинхронного двигателя

Пуск асинхронного двигателя сопровождается появлением в цепях статора и ротора токов значительной величины. Пусковой ток может в 4...8 раз превышать номинальный ток двигателя.

Пуск АД с фазным ротором. Включение в цепь ротора добавочного сопротивления (пускового реостата R) позволяет уменьшить пусковой ток и увеличить пусковой момент (рис. 3.38, а).

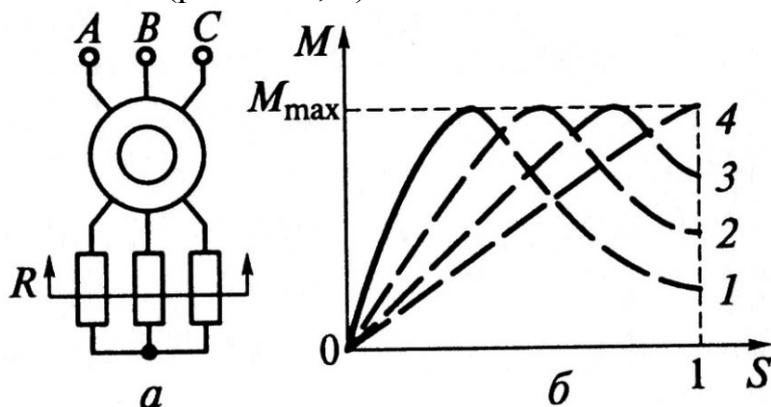


Рис. 3.38. Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором: а - схема двигателя; б - пусковые характеристики; 1 - естественная характеристика; 2...4- искусственные характеристики

При введении в цепь ротора добавочного сопротивления зависимость $M = f(S)$ смещается вправо и всегда можно подобрать значение R , при котором пусковой момент равен максимальному (рис. 3.38, б). По мере разгона двигателя сопротивление реостата выводится для поддержания максимального момента и осуществляется постепенный переход на естественную характеристику 1 с искусственных характеристик 2, 3, 4.

Пуск АД с короткозамкнутым ротором. В связи с ростом мощности питающих систем широко применяется прямое включение асинхронных двигателей в сеть. Однако пусковой ток мощных АД может вызвать большое падение напряжения в питающей сети и трансформаторе и неблагоприятно сказаться на других потребителях энергии, присоединенных к той же сети. Поэтому применяется пуск АД при пониженном сетевом напряжении, что достигается двумя способами:

1) применением автотрансформатора;

2) переключением обмотки статора с треугольника на звезду, если обмотка статора при работе соединена по схеме треугольника:

$$I_{ЛЗ} = \frac{U_{Л}}{\sqrt{3}Z}; I_{ЛТ} = \frac{\sqrt{3}U_{Л}}{Z},$$

где $I_{ЛЗ}, I_{ЛТ}$ - пусковой линейный ток при схеме соединения звездой и треугольником соответственно; $U_{Л}$ - линейное напряжение; Z - полное сопротивление фазы.

Таким образом, переключение с «треугольника» на «звезду» уменьшает пусковой линейный ток в три раза, $I_{ЛЗ} = I_{ЛТ} / 3$, а фазное напряжение - в $\sqrt{3}$ раз.

3.3.2.8. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

Частоту вращения АД можно регулировать двумя путями, изменяя скольжение или изменяя частоту вращения магнитного поля:

$$n = n_0(1 - S) = \frac{60f_1}{p}(1 - S).$$

В двигателях с фазным ротором изменение скольжения и частоты вращения достигается путем введения в цепь ротора добавочного сопротивления. Недостаток этого способа - его неэкономичность, так как добавочное сопротивление расходует энергию. Изменение частоты вращения магнитного поля также можно осуществить двумя путями: изменением числа пар полюсов обмотки статора или частоты f_1 питающей сети. Изменение числа пар полюсов достигается закладкой двух статорных обмоток на разное число пар полюсов. Переключение обмоток позволяет получить двухскоростные АД. Изменение

частоты f_1 питающей сети позволяет регулировать частоту вращения АД плавно и в широких пределах, но требует специального источника или преобразователя энергии с регулируемой частотой и обладает низким КПД.

3.3.2.9. Однофазные асинхронные двигатели

Однофазным называется асинхронный двигатель, у которого на статоре располагается однофазная обмотка, занимающая примерно 1/3 пазов статора, а ротор может быть короткозамкнутым или фазным.

Однофазный ток, протекая по обмотке статора, создает пульсирующий магнитный поток, который можно разложить на два, вращающихся в противоположные стороны с одинаковой частотой вращения и одинаковыми амплитудами, равными половине амплитуды пульсирующего потока. При неподвижном роторе оба вращающихся поля, взаимодействуя с токами ротора, создают два равных, но противоположно направленных вращающих момента, которые уравниваются друг друга. Поэтому пусковой момент однофазного двигателя равен нулю. Однако если ротор двигателя привести во вращение от постороннего привода, то равенство моментов нарушается, и после отключения постороннего привода двигатель будет вращаться в ту же сторону. Однофазные двигатели по весовым и энергетическим показателям уступают трехфазным. Величина максимального момента однофазного двигателя в отличие от трехфазного зависит от активного сопротивления ротора (рис. 3.39, а).

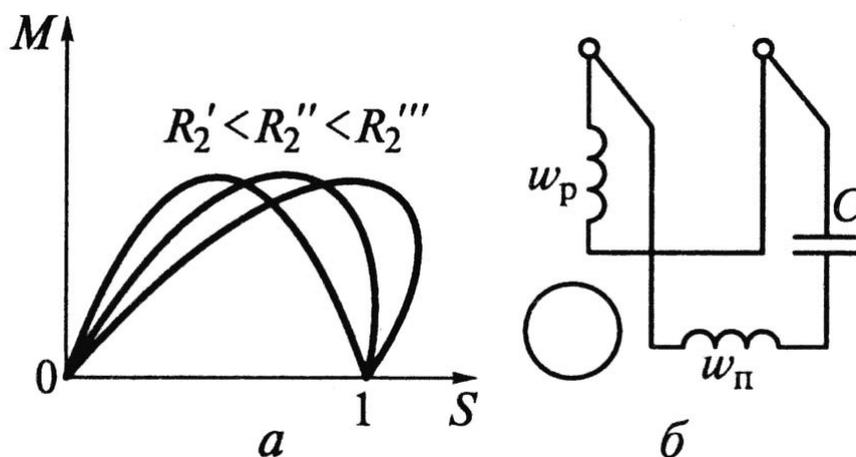


Рис. 3.39. Однофазный асинхронный двигатель:
 а - зависимость момента от активного сопротивления ротора;
 б - схема однофазного АД

Для того чтобы однофазный двигатель развивал пусковой момент, необходимо наличие в воздушном зазоре вращающегося магнитного поля, что может иметь место при сдвиге двух МДС во времени и пространстве. Это достигается при помощи специальной пусковой обмотки, которая размещена на статоре и смещена в пространстве относительно рабочей обмотки на 90° . Последовательно с пусковой обмоткой включают конденсатор (рис. 3.39, б). Пространст-

венный сдвиг обмоток на 90° и фазовый сдвиг во времени для токов пусковой и рабочей обмоток с числом витков w_n и w_p соответственно, позволяют получить вращающееся магнитное поле и пусковой момент. Пусковая обмотка в однофазном АД включается только во время пуска. Однофазный АД, у которого пусковая обмотка с конденсатором включена постоянно, а не только во время пуска, называется конденсаторным двигателем.

3.3.3. Синхронные машины

3.3.3.1. Общие сведения о синхронных машинах и их устройство

Синхронные машины являются машинами переменного тока, они легко обратимы и используются в двух режимах: генераторном и двигательном. Синхронными машинами называются потому, что частота вращения магнитного потока, создаваемого обмоткой статора, равна частоте вращения ротора.

Синхронная машина (рис. 3.40, а) состоит из двух основных частей: статора (якоря) и ротора (индуктора). Статор машины устроен аналогично статору асинхронного двигателя. Ротор представляет собой электромагниты, обмотка которых питается постоянным током и называется обмоткой возбуждения (аналогично машинам постоянного тока). По конструктивному исполнению роторы бывают двух типов: явнополюсные и неявнополюсные. На рис. 3.40, б приведена принципиальная схема поперечного сечения четырехполюсного ротора с явно выраженными полюсами, а на рис. 3.40, в - сечения двухполюсного ротора с неявно выраженными полюсами. Конструктивное исполнение указанных роторов представлено соответственно на рис. 3.40, г, д. Неявнополюсные роторы применяют в машинах с большой частотой вращения магнитного поля ($n = 1000, 1500$ и 3000 об/мин), а явнополюсные - в машинах большой мощности с меньшей частотой вращения магнитного поля. Для питания обмотки возбуждения необходимо иметь источник постоянной ЭДС. В качестве такого источника используют полупроводниковые выпрямители или генераторы постоянного тока, размещаемые на общем валу синхронной машины и называемые возбудителями.

Рассмотрим ЭДС, индуцируемую в фазе обмотки. На рис. 3.41, а показано взаимное расположение индуктора и одного витка обмотки статора двухполюсной машины. Конструкция машины обеспечивает синусоидальное распределение магнитной индукции B полюсов в воздушном зазоре, что, в свою очередь, создает синусоидально изменяющиеся ЭДС в обмотках статора. Электродвижущая сила в одном проводнике (одной активной стороне витка обмотки)

$$e_i = B_i l v,$$

где B_i - магнитная индукция в месте нахождения проводника; l - длина якоря машины; v - линейная скорость вращения индуктора.

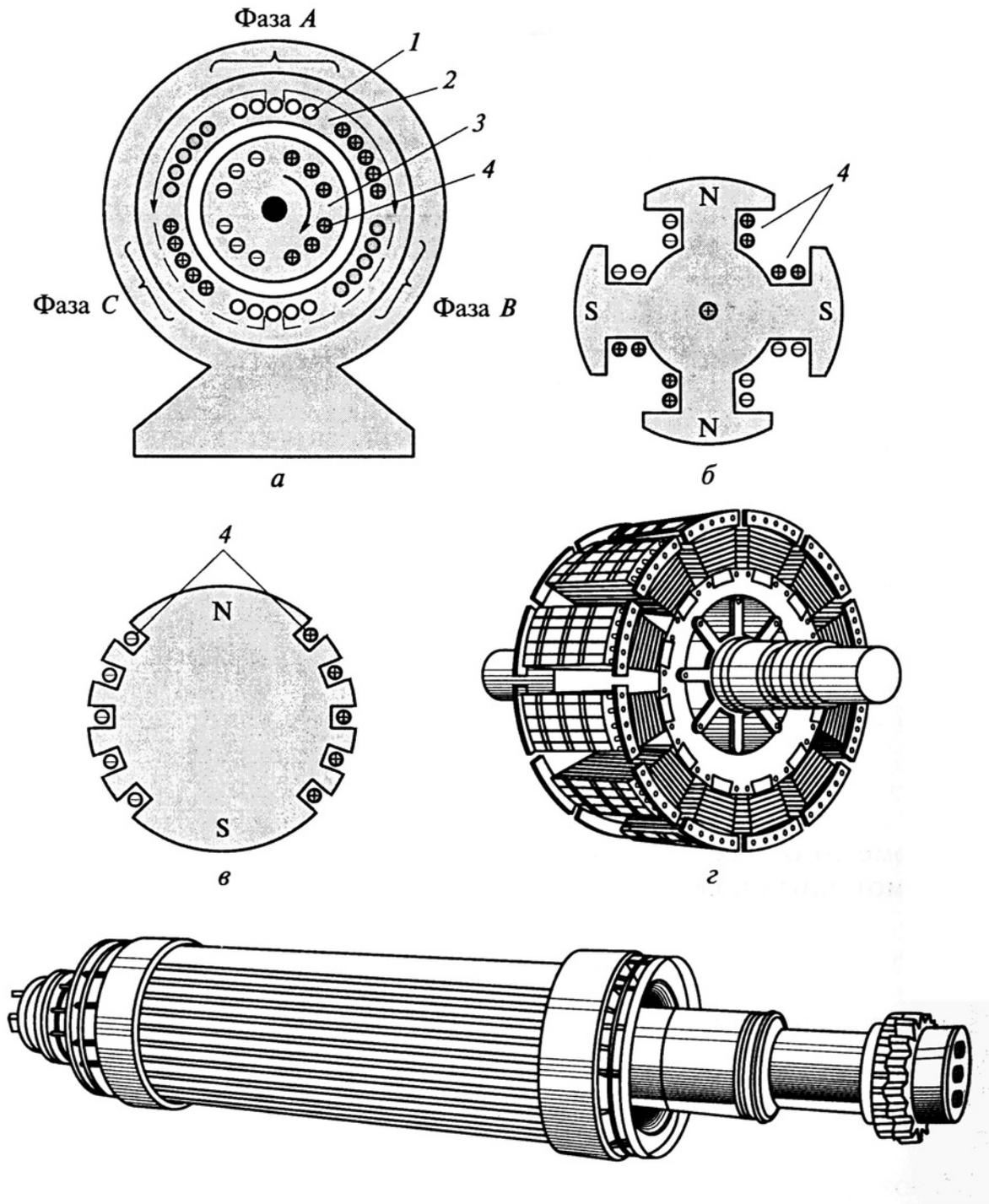


Рис. 3.40. Синхронная машина:

a - схема устройства; *б* - схема поперечного сечения явнополюсного ротора, *в* - неявнополюсного ротора; *г* - конструктивное исполнение явнополюсного ротора; *д* - неявнополюсного ротора; 1 - обмотка якоря; 2 - статор; 3 – ротор, 4 - обмотка возбуждения

Амплитудное значение ЭДС фазы обмотки якоря:

$$E_m = 2w_\phi B_m l v, \quad (3.65)$$

где коэффициентом 2 учитываются обе активные стороны витка, w_ϕ - число витков одной фазы обмотки якоря; B_m - амплитудное значение индукции под полюсом.

Синусоидальное распределение магнитной индукции заменяют средней величиной (рис. 3.41, б)

$$B_{cp} = \frac{2}{\pi} B_m,$$

откуда

$$B_m = \frac{\pi}{2} B_{cp}.$$

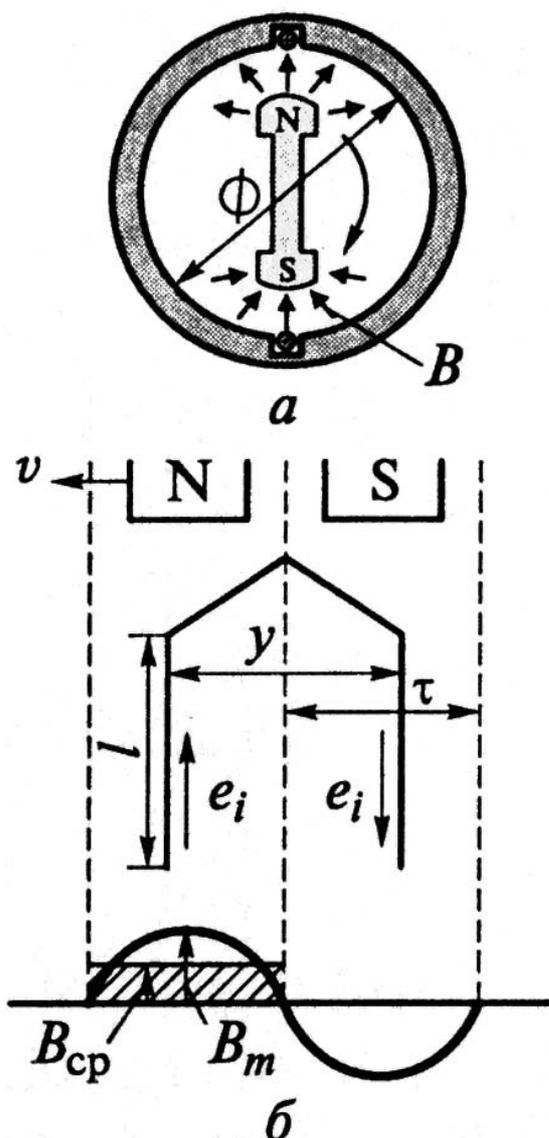


Рис. 3.41. ЭДС фазы обмотки якоря:
 а - взаимное расположение индуктора и одного витка обмотки якоря,
 б - распределение магнитной индукции на одном полюсном делении

Скорость вращения v представляют в следующем виде:

$$v = \frac{\pi D n}{60} \frac{2p}{2p} = 2\tau \frac{pn}{60},$$

где D - диаметр статора; $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ - полюсное деление.

После соответствующих преобразований выражение (3.65) принимает вид:

$$E_m = 2\pi w_\phi \frac{pn}{60} l\tau B_{cp}. \quad (3.65)$$

Произведение $l\tau = S$ - сечение поверхности, пронизываемой магнитным потоком полюса индуктора. Тогда произведение $SB_{cp} = \Phi_n$ - магнитный поток одного полюса. Окончательно выражение (3.65) можно записать в следующем виде:

$$E_m = 2\pi w_\phi \frac{pn}{60} \Phi_n = \frac{2\pi w_\phi pn}{60} \Phi_n.$$

Кроме того, для учета распределения обмотки на статоре вводят обмоточный коэффициент K_o . Тогда:

$$E_m = \frac{2\pi w_\phi p}{60} K_o n \Phi_n.$$

Действующее значение ЭДС:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2} \cdot 60} w_\phi p K_o n \Phi_n. \quad (3.66)$$

Введя постоянную величину для синхронной машины $c_e = \frac{2\pi}{\sqrt{2} \cdot 60} w_\phi p K_o$, получаем $E = c_e n \Phi_n$.

Электродвижущая сила синхронного генератора должна обладать неизменной частотой f , что обеспечивается условием $n = \text{const}$. Таким образом, регулирование напряжения (ЭДС) осуществляют только изменением магнитного потока Φ_n , т. е. изменением тока в обмотке возбуждения. Как отмечалось выше, частота индуцируемой ЭДС:

$$f = \frac{\pi \cdot n}{60}.$$

Следовательно, выражение (3.66) может быть представлено как:

$$E = 4,44 w_\phi f \Phi_n K_o.$$

3.3.3.2. Работа синхронной машины в режиме автономного генератора

При подключении нагрузки Z_H к синхронному генератору (рис. 3.42) в фазах обмотки статора (якоря) возникает ток, который обуславливает появление МДС, вызывающей магнитный поток статора (якоря). Этот поток, созданный трехфазной системой токов, представляет собой (по аналогии с асинхронным двигателем) вращающееся магнитное поле. Его северные полюсы захватывают южные полюсы ротора, а южные - северные. Таким образом, ротор вращается синхронно с магнитным полем. Если в автономном режиме работы синхронного генератора изменить скорость вращения ротора, то изменится частота индуцируемой ЭДС, а, следовательно, и частота вращения магнитного поля обмотки статора. Однако синхронность вращения магнитного поля якоря и ротора сохранится. Взаимодействие магнитного потока якоря с магнитным потоком индуктора называют реакцией якоря.

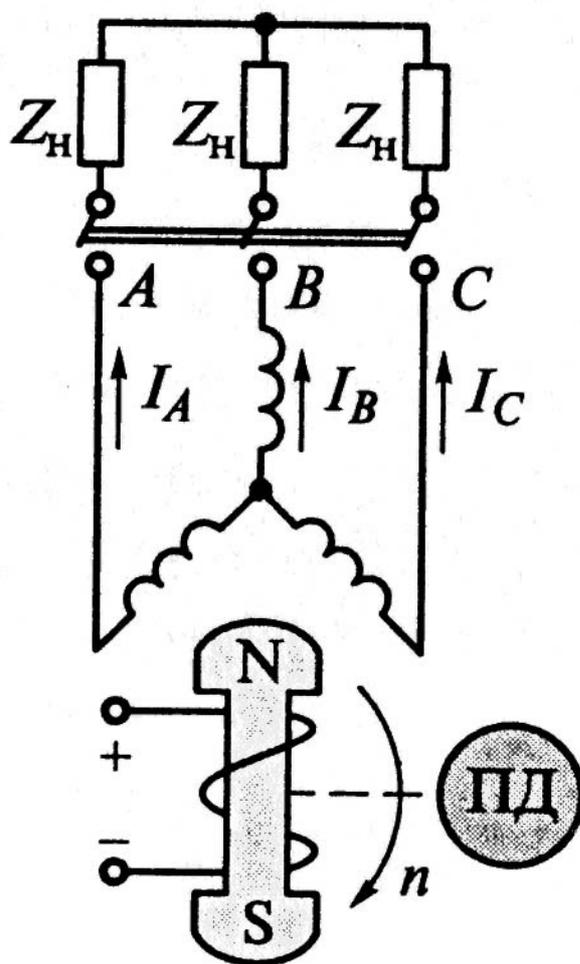


Рис. 3.42. Схема синхронной машины при работе в режиме автономного генератора

Реакция якоря зависит от характера нагрузки (активная, реактивная). Рассматривают три вида нагрузки: активную, индуктивную и емкостную.

При активной нагрузке R сдвиг фаз (угол φ) между током нагрузки и питающим ее напряжением равен нулю. Пренебрегая падением напряжения в обмотке якоря, т.е. полагая, что напряжение генератора равно его ЭДС ($E \approx U$), рассмотрим взаимодействие магнитных потоков индуктора Φ_n и якоря $\Phi_я$. Если выбрать момент времени t_0 , когда ток нагрузки имеет максимальное значение (при этом наиболее интенсивно выражена реакция якоря), то с учетом $\varphi = 0$ ЭДС в обмотке якоря также будет иметь максимальное значение. В этом случае ось магнитного полюса индуктора совпадает с плоскостью обмотки рассматриваемой фазы A (рис. 3.43, а). Под правой стороной северного и левой стороной южного полюсов индуктора результирующий магнитный поток от воздействия магнитного потока якоря возрастает, а под противоположными сторонами полюсов уменьшается.

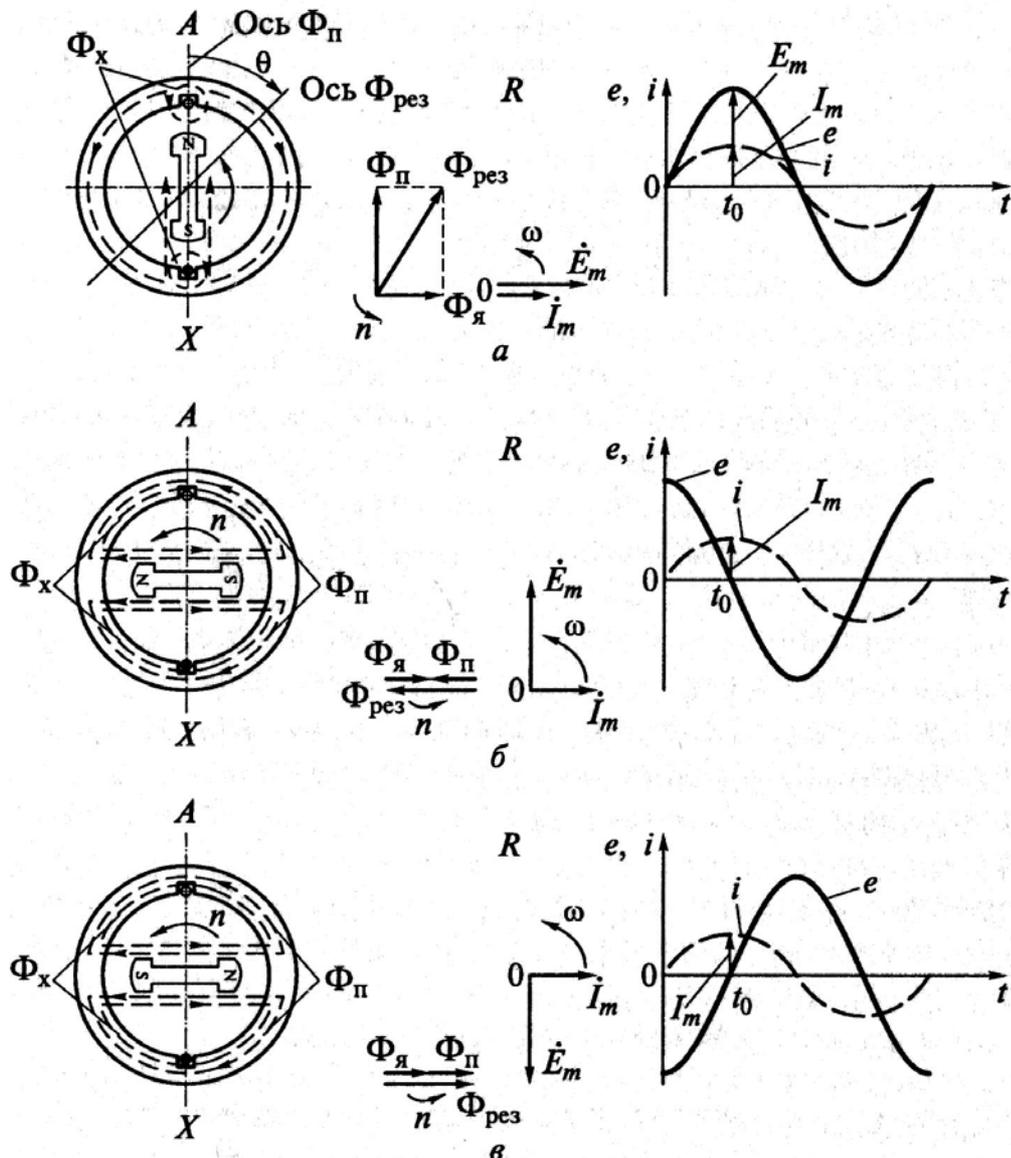


Рис. 3.43. Схема реакции якоря при подключении к синхронному генератору нагрузки: а - активной; б - индуктивной; в - емкостной

Возникает так называемая поперечная составляющая реакции якоря. Ось результирующего магнитного потока $\Phi_{рез}$ синхронного генератора поворачивается на угол Θ в сторону, противоположную вращению индуктора. Чем больше ток нагрузки, тем больше угол Θ . Увеличение угла Θ (тока нагрузки) сопровождается увеличением нагрузочного момента на валу первичного двигателя, так как магнитные полюса потоков будут взаимно притягиваться. Активная нагрузка приводит к искажению результирующего магнитного поля. При индуктивной нагрузке L сдвиг фаз (угол φ) между током нагрузки и питающим ее напряжением равен 90° . Напряжение опережает по фазе ток на 90° . В момент времени t_0 ток нагрузки имеет максимальное значение, а ЭДС равна нулю. В этом случае ось магнитного полюса индуктора перпендикулярна плоскости обмотки фазы A (рис. 3.43, б). Магнитный поток $\Phi_{я}$ якоря направлен навстречу магнитному потоку Φ_n индуктора. Следовательно, происходит размагничивание и результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$ будет меньше магнитного потока Φ_n , создаваемого индуктором. Таким образом, индуктивная нагрузка создает размагничивающую составляющую реакции якоря, называемую продольной. При этой составляющей оси магнитных потоков совпадают, угол $\Theta = 0$ и нагрузка на валу первичного двигателя не возникает.

При емкостной нагрузке C сдвиг фаз, как при индуктивной нагрузке, равен 90° , но в этом случае напряжение отстает по фазе на 90° . В момент времени t_0 ток нагрузки имеет максимальное значение, а ЭДС равна нулю. В этом случае, как и в предыдущем, ось магнитного полюса индуктора перпендикулярна плоскости обмотки фазы A (рис. 3.43, в), но положение полюсов индуктора изменилось. Поэтому результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$ будет складываться из магнитного потока Φ_n индуктора и магнитного потока $\Phi_{я}$ якоря. Следовательно, емкостная нагрузка создает намагничивающую (продольную) составляющую реакции якоря, и результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$ будет больше магнитного потока Φ_n индуктора. При смешанных нагрузках (RL или RC) реакция якоря имеет две составляющие - продольную и поперечную.

К основным характеристикам синхронного генератора относятся характеристика холостого хода, внешняя и регулировочная характеристики (рис. 3.44).

Характеристика холостого хода - зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения: $E = f(I_g)$ - снимается при отсутствии нагрузки ($I_n = 0$) и постоянной частоте вращения индуктора ($n_{ном} = const$). По этой характеристике (рис. 3.44, а), можно определить порядок напряжения, на которое рассчитан данный генератор. Для этого на колене характеристики (переходе в область

магнитного насыщения) выбирают точку A и для нее определяют индуцируемую ЭДС E_0 . На рис. 3.44, a показаны две ветви характеристики: одна получена при увеличении тока возбуждения (намагничивании индуктора) при условии, что магнитопровод синхронной машины не был намагничен, а вторая - при уменьшении тока возбуждения (размагничивании индуктора).

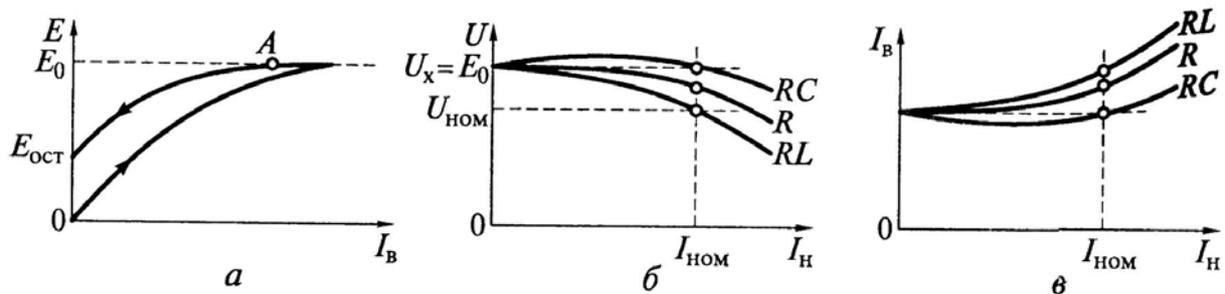


Рис. 3.44. Характеристики синхронного генератора:
 a - холостого хода; $б$ - внешняя; $в$ - регулировочная

Остаточная электродвижущая сила $E_{ост}$ создается остаточным магнитным потоком индуктора при $I_g = 0$ за счет гистерезиса ферромагнитных материалов.

Внешняя характеристика - зависимость напряжения генератора от тока нагрузки: $U = f(I_H)$ - снимается при постоянной частоте вращения и неизменном токе возбуждения (рис. 3.44, $б$). Эта характеристика показывает степень стабильности напряжения генератора при изменении нагрузки. Различие в характеристиках, приведенных на рис. 3.44, $б$, определяется влиянием реакции якоря, зависящей от характера нагрузки (R - активно-резистивной, RL - активно-индуктивной, RC - активно-емкостной). Кривой R соответствует $\cos \varphi = 1$, кривым RL и RC - $\cos \varphi < 1$.

Для генератора стабильность напряжения определяют потерей напряжения при номинальной нагрузке:

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_x - U_{ном}}{U_x} \cdot 100\%.$$

Регулировочная характеристика - зависимость тока возбуждения от тока нагрузки: $I_g = f(I_H)$ - снимается при постоянной частоте вращения и неизменном напряжении якоря (рис. 3.44, $в$). Эта характеристика показывает, как надо изменять ток возбуждения I_g для обеспечения постоянства напряжения ($U = \text{const}$). При снятии характеристики необходимо соблюдать условие $\cos \varphi = \text{const}$.

3.3.3.3. Подключение трехфазной синхронной машины к электрической сети

Подключение синхронной машины к электрической сети осуществляется как для параллельной работы генераторов, так и для работы синхронной машины в качестве двигателя. Рассмотрим условие подключения синхронной машины к сети независимо от режима ее работы (рис. 3.45, а). Исходными данными для сети являются напряжение сети U_c и частота сети f_c , а для синхронной машины - ЭДС смещения $E_{см}$ и ее частота $f_{см}$.

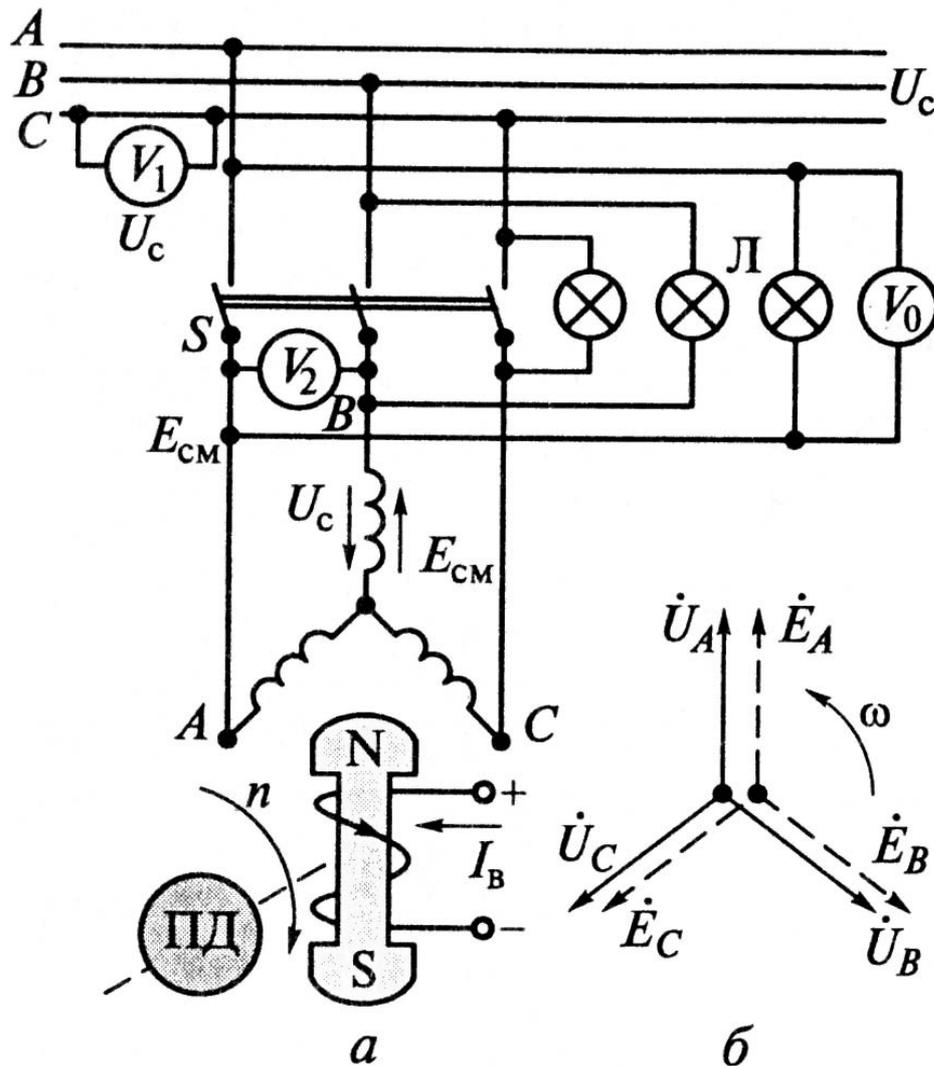


Рис. 3.45. Схема подключения синхронной машины к электрической сети: а - схема; б - векторная диаграмма ЭДС и напряжений в момент включения

Условием подключения синхронной машины к сети является отсутствие тока в фазах обмотки якоря в момент замыкания рубильника. Это возможно только в случае, когда $\dot{U}_c = \dot{E}_{см}$. Разогнав первичный двигатель (ПД) до номинальной частоты и вращения и изменяя ток возбуждения, устанавливают

величину ЭДС $E_{см}$ равной напряжению U_c . Электродвижущая сила в момент замыкания рубильника должна находиться в фазе с напряжением U_c (рис. 3.45, б). Тогда в фазах обмотки якоря ЭДС синхронной машины и напряжение сети будут направлены навстречу, а уравнительный ток включения в обмотке якоря:

$$I_{ур} = \frac{(\dot{U}_c - \dot{E}_{см})}{\dot{Z}_я} = 0,$$

где $\dot{Z}_я$ - сопротивление фазы обмотки якоря синхронной машины.

На практике уловить этот момент довольно трудно, так как частота ЭДС синхронной машины нестабильна, поскольку первичный двигатель не может поддерживать неизменной частоту вращения n .

Для подключения синхронной машины к сети необходимо произвести синхронизацию ЭДС и напряжения сети. Для этого существуют синхронизирующие устройства, называемые синхроноскопами. В простейшем синхроноскопе используют три лампы накаливания, которые могут включаться по двум схемам: на одновременное загорание и погасание (см. рис. 3.45, а) и поочередное. Лампы, включенные в разомкнутые цепи рубильника S , находятся под тем же напряжением, что и вольтметр V_0 . Следовательно, они периодически загораются и гаснут. Чем ближе частота ЭДС синхронной машины к частоте сети, тем медленнее загораются и гаснут лампы. Стрелка вольтметра V_0 магнитоэлектрической системы отклоняется влево и вправо относительно нуля, расположенного в центре шкалы. По скорости загорания и погасания ламп регулируют частоту вращения индуктора ПД, добиваясь совпадения частот сети и синхронной машины. Включение рубильника S производится в тот момент, когда вольтметр V_0 показывает нуль, а лампочки полностью погасли. При этом в момент замыкания рубильника ток в обмотках якоря будет равен нулю.

Появление тока в фазах A, B, C якорной обмотки создает вращающееся магнитное поле, которое захватывает полюсы индуктора, и индуктор начинает вращаться синхронно с вращающимся магнитным полем якоря с частотой $n_0 = 60f_c/p$. Для создания активной мощности в электрической машине необходимы дополнительные условия, а именно: увеличение вращающего момента $M_{вр}$ первичного двигателя или появление механической нагрузки M_n на валу ротора синхронной машины. При увеличении вращающего момента $M_{вр}$ первичного двигателя ротор (индуктор) синхронной машины стремится увеличить частоту вращения n_0 , но его удерживает вращающееся магнитное поле якоря, частота вращения n_0 которого измениться не может, так как частота сети $f_c = \text{const}$. Поэтому происходит угловое смещение между осями

магнитных полей индуктора и якоря. Ось магнитного поля индуктора сместится относительно оси вращающегося поля якоря на угол Θ в направлении вращения индуктора (рис. 3.46, *a*). Векторная диаграмма синхронной машины для этого состояния приведена на рис. 3.46, *б*.

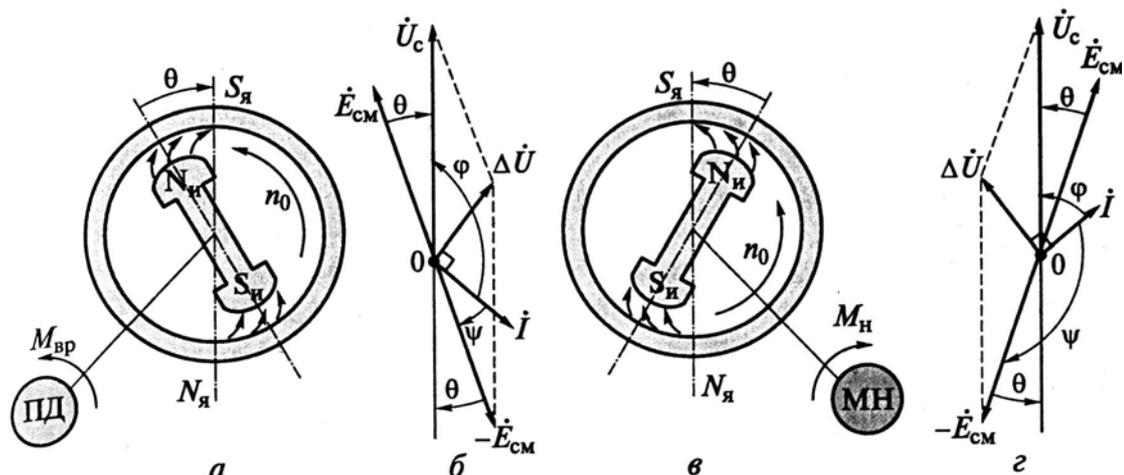


Рис. 3.46. Режимы работы синхронной машины:
a, б - генераторный; *в, г* - двигательный

Мощность синхронной машины относительно сети

$$P = U_c I \cos \varphi. \quad (3.67)$$

Поскольку угол $\varphi > 90^\circ$, мощность имеет отрицательное значение. Это означает, что синхронная машина не потребляет энергии из сети, а отдает ее в сеть, т.е. работает в режиме генератора. Из сказанного выше следует, что синхронная машина начинает работать в качестве генератора (вырабатывать электроэнергию и передавать ее в сеть) только при увеличении (начиная от холостого хода) вращающего момента первичного двигателя (увеличение подачи пара, воды, топлива).

При отключении первичного двигателя от энергопитания двигатель переходит в механическую нагрузку и создает нагрузочный тормозной момент, который начинает тормозить вращение ротора. Однако вращающееся магнитное поле якоря удерживает магнитные полюсы индуктора и ротор продолжает вращаться с синхронной частотой вращения n_0 . Под действием нагрузочного момента ось магнитного поля индуктора сместится в сторону, противоположную вращению ротора, на угол Θ (рис. 3.46, *в*). Векторная диаграмма синхронной машины для данного режима приведена на рис. 3.46, *г*. В этом случае мощность синхронной машины относительно сети, определяемая выражением (3.67), с учетом того, что угол $\varphi < 90^\circ$, имеет положительное значение. Следовательно, синхронная машина потребляет энергию из сети, т.е. работает в режиме двигателя.

3.3.3.4. Синхронный двигатель

Для подключения синхронного двигателя к сети способом, описанным выше (рис. 3.45), необходимо иметь двигатель для его разгона и синхронизирующее устройство. Если же обмотку статора подключить к сети в тот момент, когда ротор неподвижен, а в обмотке возбуждения ток I_e , ротор не придет во вращение, так как мгновенно возникающее вращающееся магнитное поле статора не сможет преодолеть инерцию ротора и не будет успевать сцепляться с его неподвижными магнитными полюсами. Возникает аварийный режим - в обмотках статора появляется ток короткого замыкания. Для разгона синхронного двигателя применяется так называемый асинхронный пуск. Для этого на роторе синхронного двигателя размещается короткозамкнутая обмотка (как в асинхронных двигателях). В полюс индуктора синхронного двигателя помещены стержни короткозамкнутой обмотки (рис. 3.47).

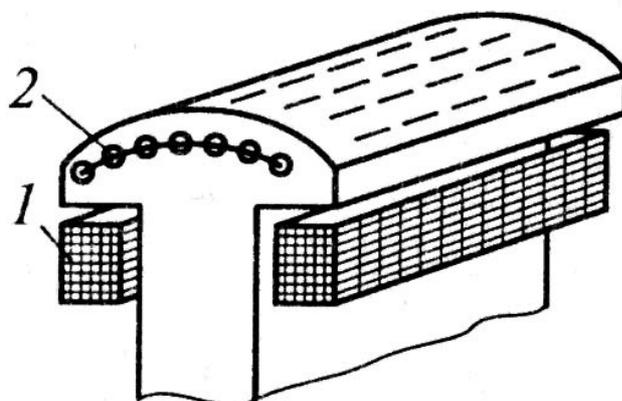


Рис. 3.47. Размещение пусковой короткозамкнутой обмотки в полюсе индуктора синхронного двигателя:

1 - обмотка возбуждения; 2 - короткозамкнутая обмотка

Пуск двигателя осуществляется в следующей последовательности. Обмотка возбуждения отключается от источника питания постоянного тока и замыкается на пусковой реостат, сопротивление которого значительно превышает сопротивление обмотки возбуждения: $R_{np} = (8...10)R_{ов}$. Оставлять разомкнутой обмотку возбуждения нельзя, так как в момент пуска в ней будет индуцироваться большая ЭДС, опасная не только для изоляции обмотки, но и для обслуживающего персонала.

Статорная обмотка (обмотка якоря) подключается к напряжению питающей сети. Возникающее при этом вращающееся магнитное поле начинает разгонять двигатель, который работает как асинхронный. Когда двигатель разгонится до частоты вращения близкой к синхронной n_0 , обмотку возбуждения отключают от пускового реостата и подключают к источнику питания постоянного тока. Появившийся ток возбуждения создает магнитный поток индук-

тора, который захватывается вращающимся полем статора и двигатель втягивается в синхронизм.

3.3.3.5. Регулирование реактивной мощности синхронного двигателя

Реактивная мощность синхронной машины, как по характеру, так и по величине зависит от тока возбуждения. Изменение тока возбуждения не оказывает влияния на активную мощность, которая зависит только от механической нагрузки на валу двигателя, следовательно, одно из важнейших свойств синхронного двигателя - возможность одновременно работать в двух режимах: двигателя и генератора реактивной мощности, что широко используется для улучшения коэффициента мощности $\cos \varphi$ в энергосистемах.

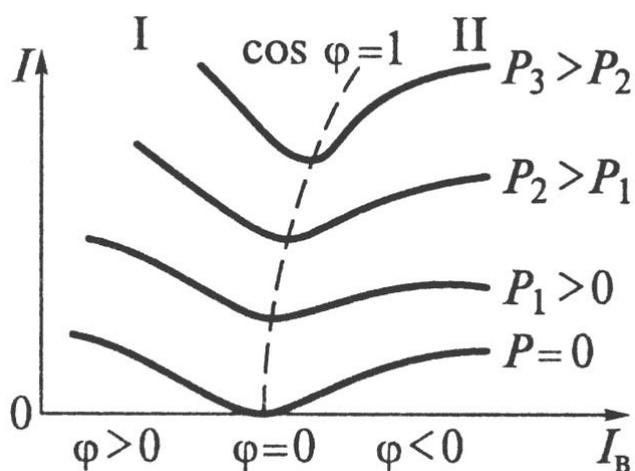


Рис. 3.48. U-образные характеристики синхронного двигателя при изменении тока возбуждения:
I, II - соответственно области недовозбужденного и перевозбужденного двигателя

В некоторых случаях синхронные машины используют только в качестве синхронных компенсаторов (генераторов реактивной мощности).

Зависимости тока двигателя от тока возбуждения: $I = I(I_B)$ называют U-образными характеристиками (рис. 3.48).

3.3.3.6. Синхронные микродвигатели

Двигатель с постоянными магнитами отличается от обычного синхронного двигателя отсутствием обмотки возбуждения на полюсах индуктора и наличием полюсов в виде постоянных магнитов. В пазах полюсов наконечников индуктора размещаются стержни короткозамкнутой пусковой обмотки, предназначенной для асинхронного разгона двигателя. При достижении ротором частоты вращения n , близкой к частоте вращения n_0 вращающегося магнит-

ного поля, двигатель втягивается в синхронизм. На рис. 3.49, *a* приведена схема устройства ротора такого двигателя.

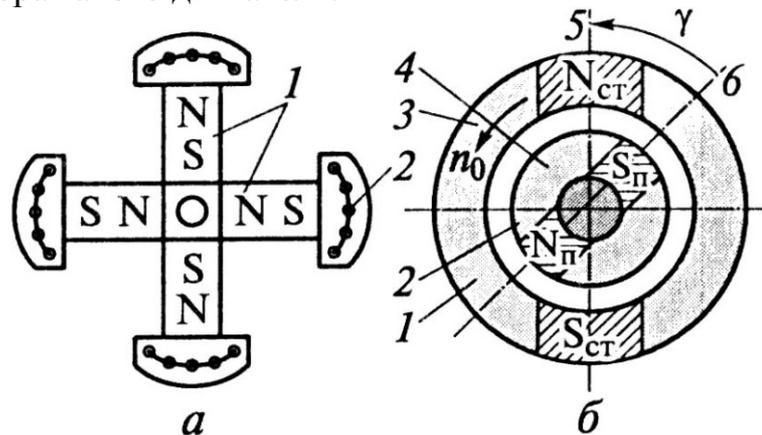


Рис. 3.49. Ротор двигателя с постоянными магнитами:

- a* - схема устройства ротора; *б* - схема устройства гистерезисного двигателя; 1 - постоянные магниты; 2 - короткозамкнутая обмотка (пусковая); 3 - статор; 4 - ротор; 5 - ось магнитного поля статора; 6 - ось магнитного поля ротора

Гистерезисный двигатель имеет ротор, представляющий собой цилиндр из магнитотвердого материала с широкой петлей гистерезиса. В некоторых случаях ротор набирается из нескольких колец - шайб. У гистерезисных двигателей может быть два исполнения, различающихся расположением ротора. Например, для гироскопических систем ротором является внешняя часть двигателя, а вращающееся магнитное поле создается неподвижной внутренней частью двигателя. Принцип действия гистерезисного двигателя заключается в следующем. Под действием магнитного поля $\Phi_{ст}$ статора в роторе образуются магнитные полюсы. При вращении поля $\Phi_{ст}$ между ним и магнитным полем Φ_n образовавшихся в роторе магнитных полюсов появляется пространственный сдвиг, обусловленный запаздыванием в магнитной переориентации элементарных частиц материала ротора. Ось магнитного потока Φ_n отстает от оси вращающегося магнитного потока $\Phi_{ст}$ на угол γ гистерезисного запаздывания (рис. 3.49, *б*). При взаимодействии магнитных потоков Φ_n и $\Phi_{ст}$ возникают электромагнитные силы, стремящиеся совместить оси этих потоков. Гистерезисный двигатель развивает электромагнитный момент $M_{эм} = k\Phi_{ст}\Phi_n \sin \gamma$, где k - коэффициент пропорциональности. Под действием электромагнитных сил ротор начинает двигаться в сторону вращения магнитного поля $\Phi_{ст}$, постоянно увеличивая частоту вращения n . В процессе разгона ферромагнитный материал ротора перемагничивается и его полюсы перемещаются по поверхности ротора в сторону вращения магнитного поля статора, а частота вращения ротора приближается к частоте вращения поля

статора n_0 . При выравнивании указанных частот вращения наведение магнитных полюсов ротора стабилизируется, а двигатель начинает работать как синхронный с магнитным возбуждением.

Реактивный двигатель имеет ротор, выполняемый в виде секционированного магнитопровода, обладающего различным магнитным сопротивлением в радиальном направлении (вдоль поперечной и продольной осей). Синхронный вращающий момент реактивного двигателя создается без собственного магнитного поля ротора. Для этого ротор выполняют из пакетов электротехнической стали, залитых неферромагнитным материалом 3 - алюминием (рис. 3.50). Такой ротор обладает наименьшим магнитным сопротивлением вдоль оси 1, совпадающей с направлением пакетов листовой электротехнической стали 2.

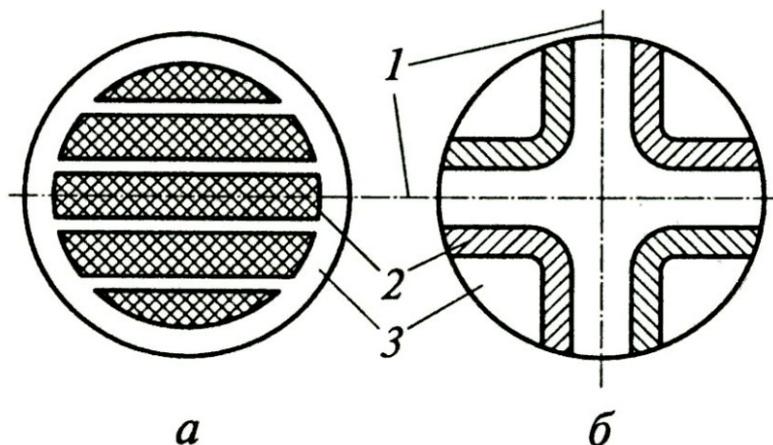


Рис. 3.50. Принципиальные схемы роторов реактивного двигателя:
 а - двухполюсного; б - четырехполюсного; 1 - ось наименьшего магнитного сопротивления; 2 - пакеты листовой электротехнической стали; 3 - неферромагнитный материал

При подключении напряжения к статорной обмотке возникает вращающееся магнитное поле с синхронной частотой n_0 и начинается асинхронный разгон ротора, частота которого приближается к частоте n_0 . При отсутствии нагрузки на валу двигателя вращающийся магнитный поток, пронизывая пакеты листовой электротехнической стали 2 в продольном направлении (вдоль оси 1), захватывает ротор. Последний под действием сил вращающегося магнитного поля займет такое положение, при котором продольные оси 1 совпадут с осями вращающегося поля и ротор начнет вращаться с синхронной скоростью. При подключении нагрузки ротор двигателя сместится относительно вращающегося поля на угол Θ . На рис. 3.50, а показан ротор двухполюсного двигателя, а на рис. 3.50, б - четырехполюсного.

Шаговый (импульсный) двигатель имеет ротор, выполняемый в виде постоянного магнита, и статор с явно выраженными полюсами, на которых в полузакрытых пазах размещается обмотки возбуждения 1, 2, питаемые путем по-

дачи импульсов напряжения. На рис. 3.51 показаны положения ротора двигателя при изменении питания обмоток возбуждения (крестиками и точками указаны направления тока в обмотках).

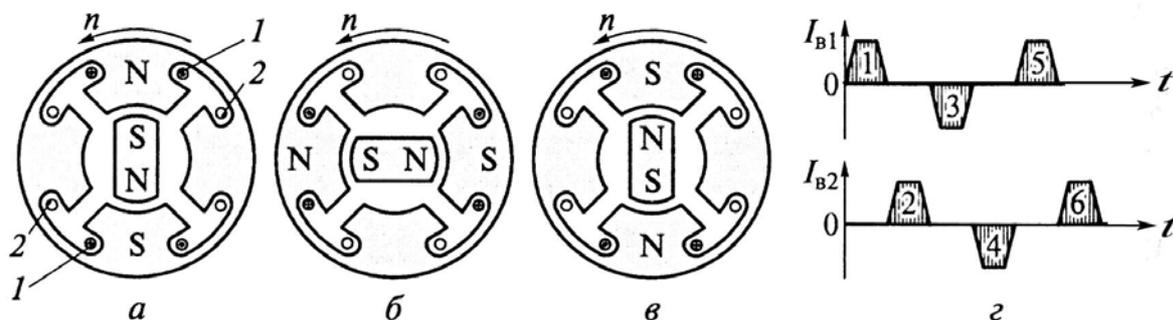


Рис. 3.51. Пояснение работы шагового (импульсного) двигателя: а...в - положения ротора при подаче импульсов тока возбуждения; з - временная диаграмма изменения импульсов тока возбуждения; 1 - первая обмотка возбуждения; 2 - вторая обмотка возбуждения

Рис. 3.51, а соответствует импульсу 1 тока I_{B1} ; рис. 3.51, б - импульсу 2 тока I_{B2} ; рис. 3.51, в - импульсу 3 тока I_{B1} и т.д. Каждый импульс тока возбуждения (см. рис. 3.51, з) поворачивает ротор на угол 90° . Поворот осуществляется за счет момента, который возникает в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора. Увеличивая число полюсов, можно изменять величину угла поворота. Число полюсов ротора должно быть равно числу полюсов статора.

3.4. Электрический привод

3.4.1. Основные понятия и определения электропривода

Электрическим приводом называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройства, предназначенных для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.

Преобразовательное устройство преобразует напряжение и ток источника электроэнергии, в напряжение и ток, необходимые для работы электродвигателя.

Передаточное устройство содержит механические передачи и соединительные муфты.

Управляющее устройство представляет собой систему управления, в которой происходит обработка информации от датчиков состояния системы, и выработки на их основе сигналы управления преобразователем, электродвигателем и передаточным устройством.

Основная функция электропривода - приводить в движение рабочий механизм и изменять его режим работы в соответствии с требованиями технологического процесса.

Электропривод бывает групповой и индивидуальный.

В групповом электроприводе один двигатель приводит в движение с помощью разветвленной передачи группу механизмов. В таком приводе кинематическая схема оказывается сложной и громоздкой, а сам привод неэкономичен, поэтому он находит ограниченное применение.

Наиболее прогрессивным является автоматизированный индивидуальный электропривод, в котором электродвигатель приводит в движение только один рабочий орган.

Индивидуальный электропривод существенно упрощает схему механизма, повышает экономичность и позволяет в ряде случаев встраивать электродвигатель непосредственно в механизм, что уменьшает его металлоемкость (электродрель, вентилятор, водяной насос и т.д.)

Выбор электродвигателя для привода определяется условиями работы и требованиями производственного механизма. При этом целесообразно выбирать электродвигатель более простой, надежный в эксплуатации, имеющий наименьшую массу, размеры и стоимость.

Практически всем выше перечисленным требованиям отвечает асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Асинхронные двигатели с фазным ротором по конструкции сложнее двигателей с короткозамкнутым ротором. Однако они позволяют простыми средствами осуществлять регулирования частоты вращения, пусковой ток и момент.

Синхронные двигатели применяются для привода насосов, вентиляторов и преобразовательных установок, где не требуется регулирование частоты вращения и крайне редки перерывы в работе. Двигатели постоянного тока используются для привода механизмов, работа которых сопровождается частыми пусками и остановками; требуется регулирование частоты вращения в широком диапазоне. Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения применяются в электроприводе подъемно-транспортных механизмов, так как имеют повышенные перегрузочный момент и механическую прочность.

Электроприводы различают по механическим параметрам: видам движения исполнительных механизмов, типам передаточных устройств; по электрическим и другим параметрам: роду тока двигателя, видам преобразовательных устройств, степени и уровню автоматизации управления, видам усилительных элементов в управляющем устройстве и т.д. В соответствии с уровнем автоматизации различают неавтоматизированный, автоматизированный и автоматический привод. Электропривод может включать в себя один и более исполнительных двигателей. В первом случае он называется одиночным, во втором - многодвигательным.

3.4.2. Уравнение движения электропривода

При работе электропривода вращающий момент M на валу двигателя уравнивается как статическим моментом сопротивления M_c , создаваемым нагрузкой рабочего и потерями энергии в передаточном механизмах, так и динамическим моментом вращения $M_{дин}$, обусловленным изменением частоты вращения двигателя. Тогда уравнение движения электропривода можно записать в следующем виде:

$$M = M_c \pm M_{дин}. \quad (3.68)$$

Знак «плюс» соответствует увеличению частоты вращения двигателя (пуск), знак «минус» - уменьшению (остановка). Динамический момент вращения

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.69)$$

где J - момент инерции тела вращения; ω - угловая скорость вращения.

Момент инерции может быть выражен через маховой момент GD^2 :

$$J = mR^2 = \frac{GD^2}{4g}, \quad (3.70)$$

где m - масса тела; R - радиус инерции; G - вес тела; D - диаметр инерции; g - ускорение свободного падения.

Моментом инерции электропривода является момент инерции всей нагрузки двигателя (двигатель, передаточный, исполнительный механизмы), приведенный к угловой частоте вращения двигателя ω . Это же относится к маховому моменту. Тогда с учетом того, что $\omega = 2\pi \cdot n/60$, динамический момент вращения:

$$M_{дин} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}, \quad (3.71)$$

а уравнение движения электропривода (3.68) принимает вид:

$$M = M_c + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}. \quad (3.72)$$

Уравнение (3.72) записывают для трех режимов работы электропривода в различных формах, приведенных ниже.

1. Пуск двигателя. Основной характеристикой пуска электропривода является длительность переходного режима. При пуске электроприводом считаем двигатель и рабочий механизм с неизменным моментом инерции (маховым моментом) движущихся звеньев, а время пуска (переходный процесс) определяем интегрированием основного уравнения движения (3.72) при изменении частоты вращения от n_1 до n_2 :

$$t_{1-2} = \int_{n_1}^{n_2} \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{M - M_c}. \quad (3.73)$$

Так как при пуске двигателя $n_1 = 0$, а n_2 примем равной номинальной частоте вращения $n_{ном}$, то время пуска (разгона) электропривода для случая, когда $M - M_c = M_{дин}$ остается величиной постоянной, определяется уравнением:

$$t_n = \frac{GD^2}{375} \frac{n_{ном}}{M - M_c}. \quad (3.74)$$

Для асинхронного двигателя во время пуска вращающий момент является величиной переменной, изменяющейся от пускового момента M_n до максимального M_{max} и затем уменьшающейся до номинального $M_{ном}$, поэтому в уравнении (3.74) полагаем приближенно, что $M = M_{cp} = (M_{max} + M_n)/2$, а $M_c \cong M_{cp}$. Точный расчет проводят по характеристике двигателя $n = f(M)$ (рис. 3.52) и заданной характеристике статического момента нагрузки $M_c = f(n)$. По полученной результирующей характеристике $M - M_c = f(n)$ находят время разгона для каждого интервала частоты вращения, разбивая ее на несколько участков, а полное время пуска определяют как сумму всех интервалов $t_n = \sum t_i$, где t_i - время разгона на каждом участке.

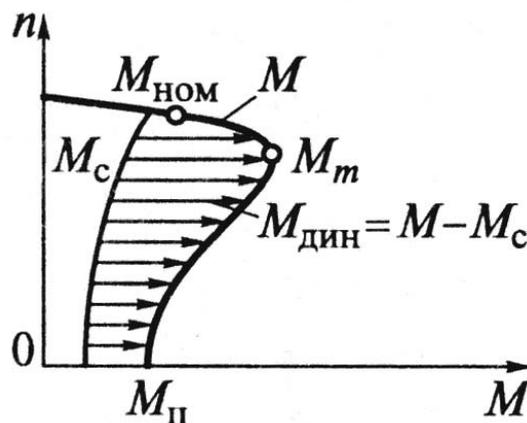


Рис. 3.52. Характеристика асинхронного двигателя и кривая статического момента

2. Установившийся режим работы ($n = \text{const}$). Динамический момент $M_{дин}$ равен нулю, так как $dn/dt = 0$. Следовательно, уравнение (3.72) принимает вид $M = M_c$.

3. Остановка (торможение) двигателя. Здесь могут рассматриваться два случая: двигатель отключается от сети и происходит самоторможение – выбег или осуществляется электрическое торможение двигателя.

В первом случае динамический момент, который при пуске является нагрузочным, становится вращающим моментом и электропривод расходует запасенную энергию на трение в подшипниках, узлах привода и другие потери.

Время выбега электропривода (остановки) при отсутствии нагрузки

$$t_{\text{выб}} = \frac{GD^2}{375} \frac{n_2}{M_{c0}}, \quad (3.75)$$

где n_2 - частота вращения двигателя, при которой он был отключен от сети; M_{c0} - статический момент холостого хода.

Так как время выбега характеризует механические потери энергии в системе двигатель - привод - рабочий механизм, то для однотипных устройств по времени выбега можно судить о качестве изготовления, ремонта, наладки и эксплуатации привода. Чем больше время выбега, тем в лучшем состоянии находится данное устройство. Уравнение (3.75) можно преобразовать следующим образом:

$$P_{\text{мех}} t_{\text{выб}} = K_{\text{выб}}, \quad (3.76)$$

где $P_{\text{мех}}$ - мощность механических потерь энергии при холостом ходе; $K_{\text{выб}}$ - коэффициент выбега, который является постоянной величиной для однотипных устройств.

Зная мощности электромагнитных потерь энергии $P_{\text{эм}}$ двигателя при холостом ходе и мощности холостого хода P_x исследуемого устройства, определяют мощность механических потерь энергии при холостом ходе $P_{\text{мех}} = P_x - P_{\text{эм.х}}$. Далее измеряют время выбега и по формуле (3.76) определяют $K_{\text{выб}}$. Измеряя $t_{\text{выб}}$ и зная $P_{\text{мех}}$ для всех остальных устройств данной группы из выражения (3.76), делают заключение о техническом состоянии оборудования.

Во втором случае торможение двигателя происходит в результате перевода его в режим генератора. При этом электромагнитный момент двигателя становится тормозящим (M_T). Решая уравнение (3.72) относительно времени торможения t_T , находим, что:

$$t_T = \frac{GD^2}{375} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn_2}{M_T + M_c}. \quad (3.77)$$

3.4.3. Выбор электродвигателя и режимы его работы

Выбор электродвигателя осуществляется по роду тока, конструктивному исполнению, мощности для различных режимов работы.

Выбор по роду тока. Широкое распространение получили асинхронные и синхронные двигатели переменного тока. Наиболее простыми в эксплуатации и надежными в работе являются асинхронные двигатели, применяемые для электроприводов промышленных рабочих механизмов (станочное оборудование, подъемные устройства и др.). Однако эти двигатели не могут обеспечить достаточный диапазон регулирования частоты вращения. Синхронные двигатели применяются для рабочих механизмов с продолжительным режимом работы, редкими включениями и малыми нагрузками при пуске, например в электроприводе, не требующем регулирования частоты вращения, с нагрузками $P > 100$ кВт. Двигатели постоянного тока используются реже в тех случаях, когда двигатели переменного тока либо не экономичны, либо не обеспечивают необходимых характеристик рабочего механизма (особенно при регулировании частоты вращения в широком диапазоне).

Выбор по конструктивному исполнению. В этом случае учитывают условия эксплуатации электропривода, под которыми следует понимать в первую очередь воздействие климатических факторов окружающей среды, а также способ охлаждения и особенности монтажа двигателя. Правильный выбор электродвигателя по мощности обуславливает надежность его работы в электроприводе и энергетические показатели в процессе эксплуатации. Номинальная мощность двигателя определяется его нагревом, а от температуры нагрева зависит состояние электроизоляции, т.е. техническое состояние самого двигателя. Нагрев электродвигателя определяется режимом его работы, т.е. соотношением длительности периодов работы и пауз между ними или периодов работы с полной и частичной нагрузкой, а также частотой включения двигателя, характером протекания переходных процессов или изменения нагрузки. В зависимости от перечисленных параметров работа электродвигателей может происходить в продолжительном, кратковременном, повторно-кратковременном и перемежающемся режимах.

При продолжительном режиме работы (условное обозначение режима $S1$) время работы двигателя при практически неизменной нагрузке и температуре охлаждающей (окружающей) среды достаточно для нагрева его до установившегося значения (рис. 3.53, *а*). К продолжительному режиму может относиться и переменная нагрузка (рис. 3.53, *б*), если за время работы двигатель достигнет установившейся температуры нагрева.

При кратковременном режиме работы (условное обозначение $S2$) периоды неизменной нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя (рис. 3.53, *в*), причем за время работы температура частей двигателя не успевает достигнуть установившегося значения, а за время пауз (отключений) двигатель охлаждается до температуры окружающей среды.

Длительность периодов работы в данном режиме следующая: 10, 30, 90 мин. Она должна быть указана в условном обозначении режима работы, например: $S2 = 30$ мин, $S2 = 60$ мин.

Повторно-кратковременный режим (условные обозначения $S3...S5$) отличается от кратковременного режима регламентированными продолжительностью включения под неизменную нагрузку и длительностью периодов отключения (пауз), причем время работы всегда меньше времени, необходимого для нагрева двигателя до установившейся температуры, а время пауз меньше времени, необходимого для его остывания (до температуры окружающей среды) (рис. 3.53, *г*).

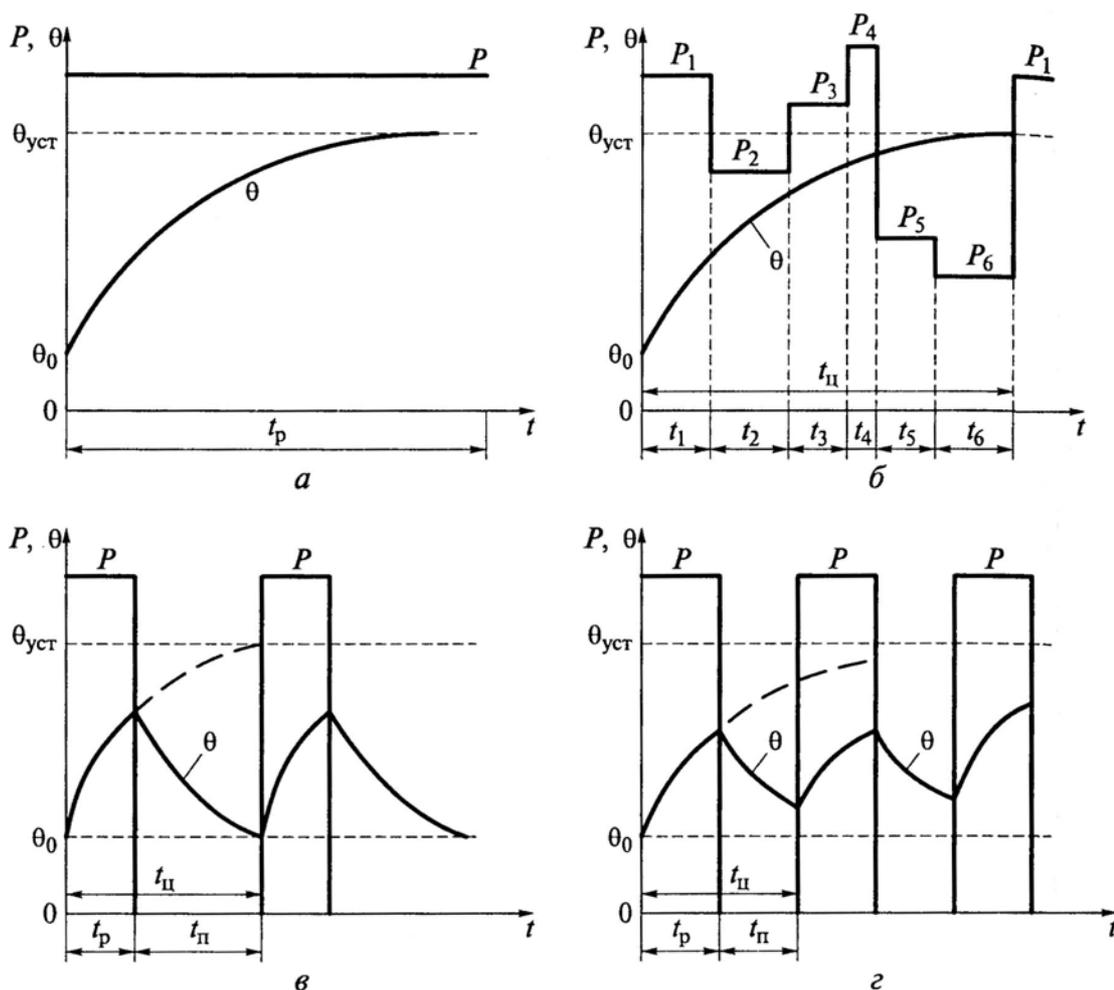


Рис. 3.53. Нагрузочные диаграммы и кривые нагрева двигателя при различных режимах его нагрузки:

- a* - продолжительный режим с неизменяющейся нагрузкой;
- б* - продолжительный режим с изменяющейся нагрузкой;
- в* - кратковременный режим нагрузки;
- г* - повторно-кратковременный режим нагрузки

Двигатели, выпускаемые промышленностью для такого режима работы, характеризуются продолжительностью включения (ПВ), которая устанавливается в процентах от продолжительности одного цикла работы:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_n} 100\% \quad (3.78)$$

где t_p - время работы двигателя; t_n - время паузы.

В условном обозначении режима работы указывают продолжительность включения в процентах, например: $S3 - 25\%$; $S3 - 40\%$.

В повторно-кратковременном режиме $S4$ работают двигатели с частыми пусками, при которых длительность одного цикла зависит от числа включений в час (30, 60, 120 или 240) при определенном коэффициенте инерции F_u , равном 1,2; 1,6; 2,5; 4; 6,3 или 10. Коэффициент инерции - это отношение, равное сумме моментов инерции ротора двигателя и приведенного к валу двигателя момента инерции приводного механизма, отнесенной к моменту инерции ротора. Для такого режима в условном обозначении указывается ПВ, число включений в час и коэффициент инерции, например $S4 - 25\%$, 120 включений в час, $F_u = 2$. Для такого двигателя длительность каждого цикла составляет $60/120 = 0,5$ мин, из которых время пуска и время работы равно 25%, т.е. 7,5 с, а время паузы $t_n = 22,5$ с. Повторно-кратковременный режим с частыми пусками и электрическим торможением $S5$ отличается от рассмотренного выше тем, что в конце каждого цикла происходит электрическое торможение двигателя. Эксплуатация двигателей рассчитана при коэффициентах инерции 1,2; 1,6; 2; 2,5 и 4. Продолжительность включения определяется из следующего соотношения:

$$ПВ = \frac{t_{нyc} + t_p + t_{э.м}}{t_{нyc} + t_p + t_{э.м} + t_n} 100\%, \quad (3.79)$$

где $t_{нyc}$ - время пуска; $t_{э.м}$ - время электрического торможения.

При выборе двигателя по мощности основными исходными данными являются нагрузочные характеристики электропривода (нагрузочные диаграммы) $P = f(t)$, $M = f(t)$ или $I = f(t)$, которые могут быть заданы в виде графика или таблицы. Построение нагрузочных диаграмм рассматривается в специальной литературе по электроприводу.

Выбор двигателя по мощности для различных режимов работы. В продолжительном режиме для электропривода, работающего с неизменной нагрузкой, мощность двигателя выбирается по мощности рабочего механизма. Из теории асинхронных двигателей известно, что вращающий момент двигателя пропорционален квадрату питающего напряжения: $M = C_M U_\phi^2$, где C_M - конструктивный коэффициент, который зависит не только от конструкции, но

и от скольжения; U_{ϕ} - фазное напряжение. Понижение напряжения в сетях, питающих двигатели, допускается до 10%, поэтому необходимо проверять пусковой и максимальный моменты выбранного двигателя при понижении напряжения питающей сети. Момент при пониженном напряжении $M' = M_{ном} \left(U'_{\phi} / U_{\phi.ном} \right)^2$, где $M_{ном}$ - момент при номинальном напряжении; U'_{ϕ} - пониженное фазное напряжение; $U_{\phi.ном}$ - номинальное фазное напряжение.

Двигатели для кратковременного режима работы электропривода выбирают по номинальной мощности, которая должна быть равна мощности нагрузки с учетом длительности работы. Стандартные допустимые значения продолжительности работы двигателей, выпускаемых промышленностью для кратковременной работы, составляют 10, 30, 60, 90 мин. При отсутствии двигателей кратковременного режима работы можно использовать двигатели повторно-кратковременного режима, принимая, что длительность работы 30 мин соответствует ПВ = 15 %, 60 мин - ПВ = 25 %, а 90 мин - ПВ = 40 %. В крайнем случае, возможно применение двигателей для продолжительного режима работы с $P_{ном} < P_{раб}$ и последующей их проверкой на тепловой режим.

Повторно-кратковременный режим характеризуется продолжительностью включения. Для определения мощности двигателя находят эквивалентную мощность нагрузки $P_{\text{э.п}}, M_{\text{э.п}}, I_{\text{э.п}}$ за рабочее время:

$$P_{\text{э.п}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n P_k^2 t_{pk}}{t_p}}; \quad M_{\text{э.п}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n M_k^2 t_{pk}}{t_p}}; \quad I_{\text{э.п}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n I_k^2 t_{pk}}{t_p}}, \quad (3.80)$$

где $t_p = \sum_{k=1}^n t_{pk}$.

Затем рассчитывают продолжительность включения ПВ по формуле (3.78) и по каталогу выбирают двигатель. Асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора имеет большой пусковой ток, превышающий номинальный в 3,5...7,5 раза. Чтобы избежать больших пусковых токов (особенно для двигателей большой мощности), применяют асинхронные двигатели с фазным ротором, выбирая сопротивление пускового реостата из условия, чтобы $I_n = (2...2,5)I_{ном}$.

3.4.4. Управление электроприводом

Управление электроприводом предусматривает мероприятия по осуществлению пуска, торможения, реверсирования (изменения направления вращения), поддержание определенного режима работы или изменение режима по

заданной программе и т.д. Отдельно отметим выполнение функций защиты, блокировки, сигнализации, защиты от короткого замыкания и перегрузок двигателя, а также значительных отклонений напряжения от заданной величины, самопроизвольных включений и отключений двигателя.

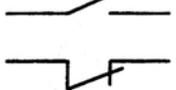
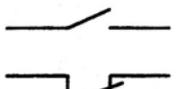
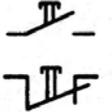
Перечисленные операции осуществляются с помощью аппаратов управления, которые в зависимости от назначения можно подразделить на три группы: коммутационные аппараты (табл. 3.8): (рубильники, выключатели, переключатели, контакторы и др.); защитные аппараты (плавкие предохранители, различные реле и разрядники для защиты от перенапряжений); командоаппараты (кнопки управления для замыкания и размыкания в цепях управления, командоконтроллеры для осуществления сложных переключений в цепях управления, путевые и конечные выключатели для замыкания и размыкания в цепях управления при достижении рабочими органами механизма выделенных положений). В зависимости от способа приведения в действие различают ручное и автоматическое управление.

Аппараты ручного управления применяют для управления коммутируемыми устройствами и оперативного включения и отключения приводов малой мощности. К ним относятся кнопочные, нажимные и вытяжные выключатели, конечные выключатели и др. Ручное управление применяется в простейших случаях неавтоматизированного производства и только для приводов, установленных в помещениях с нормальными для оператора условиями работы, когда не возникает опасности поражения электрическим током, не требуется больших физических усилий, быстрогодействия, большого числа операций. Аппараты ручного управления приводятся в действие непосредственно усилиями оператора.

В схемах автоматического и автоматизированного управления применяют автоматы, различные по назначению, принципу действия и устройству. К ним относятся разнообразные реле, контакторы, магнитные пускатели, путевые выключатели. Большую группу аппаратов управления и защиты составляют реле. С помощью реле управления достигается автоматизация пуска, торможения, реверсирования, изменения скорости электропривода. Реле защиты служат для отключения двигателя от сети при возникновении опасных режимов работы.

Рассмотрим работу схемы управления нереверсивным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (рис. 3.54, *a*). Аппаратура управления и защиты состоит из магнитного пускателя, включающего в себя контактор K переменного тока и два тепловых реле $PT1$ и $PT2$, смонтированных в одном кожухе, кнопку пуска $KnП$ и кнопку остановки двигателя $KnС$, а также плавкие предохранители $П$ для защиты силовых цепей и двигателя от коротких замыканий. При включении выключателя B (рубильника) схема готова к работе. Нажатием кнопки $KnП$ подают напряжение на обмотку контактора K , который срабатывает, замыкает свои главные контакты и присоединяет двигатель к сети.

Таблица 3.8. Обозначения некоторых элементов управления электроприводами

Элементы	Обозначение по ГОСТ 2.756-76
Обмотки контактора, магнитного пускателя или реле	
Тепловое биметаллическое реле	
Контакты контактора, пускателя, контроллера: закрывающий размыкающий	
Контакты реле: закрывающий размыкающий	
Предохранитель	
Кнопки с контактами: закрывающими размыкающими	
Выключатель автоматический	
Контакт замыкающий с выдержкой времени при замыкании	
Контакт замыкающий с выдержкой времени при размыкании	
Контакт размыкающий с выдержкой времени при замыкании	
Контакт размыкающий с выдержкой времени при размыкании	

Одновременно замыкается блокировочный контакт контактора и шунтируется кнопка *КнП*, что позволяет отпустить кнопку *КнП*. Для остановки двигателя нажимают кнопку *КнС*. Цепь катушки контактора размыкается, и его контакты отключают двигатель от сети. Выключатель *В* служит для снятия напряжения с установки после окончания рабочего дня или производства ремонта.

При перегрузке двигателя срабатывают тепловые реле, контакты которых *РТ1* и *РТ2* размыкают цепь обмотки контактора, и двигатель отключает

ется от сети. Предусмотрена также «нулевая защита»: при значительном снижении напряжения сети или его исчезновении контактор отключается и отсоединяет двигатель от сети.

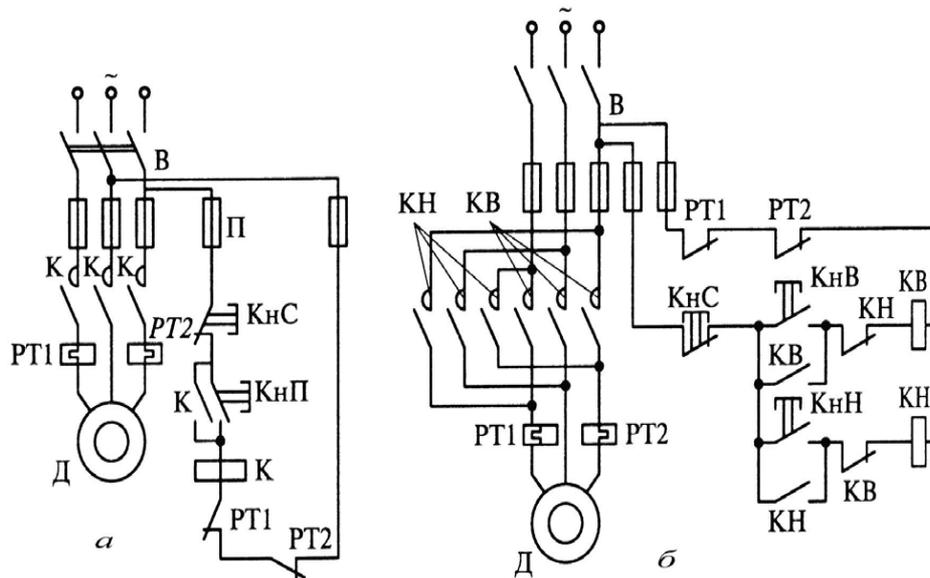


Рис. 3.54. Схема управления пуском асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:
а - нереверсивного; *б* - реверсивного

Схема управления реверсивного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с помощью реверсивного магнитного пускателя (рис. 3.54, *б*) отличается от схемы рис. 3.54, *а* тем, что реверсивный магнитный пускатель имеет два контактора, один из которых *KB* включает двигатель «вперед», другой *KH* - «назад».

Широкое применение в системах управления электроприводом получили электронные приборы. Для управления двигателями используют тиристоры. При пуске асинхронных двигателей применяют тиристорные пускатели, которые не имеют подвижных частей и обладают более высокой надежностью.

На рис. 3.55 дана схема тиристорного реверсивного пускателя, который снабжен максимальной токовой защитой и тепловой защитой от перегрузок. Силовая часть пускателя состоит из тиристоров, включенных встречно-параллельно в каждую фазу и обеспечивающих бесконтактное включение и отключение двигателя. В исходном положении все тиристоры закрыты и находятся под напряжением. При замыкании кнопки включения *Вкл.В* (вперед) срабатывает реле *В* и соединяет управляющие электроды включенных встречно-параллельно тиристоров *VS1, VS2, VS3, VS4, VS5* и *VS6*.

Предположим, что положительная полуволна напряжения фазы *А* приложена к аноду тиристора *VS1*, тогда положительный управляющий импульс, пройдя переход тиристора *VS2*, добавочное сопротивление *R* и замкнутый

контакт B , поступит на управляющий электрод тиристора $VS1$, который откроется и произведет подключение двигателя к напряжению сети. Тогда напряжение в анодной цепи тиристора (между анодом и катодом) станет меньше 1 В и произойдет обесточивание цепи управления тиристором $VS1$.

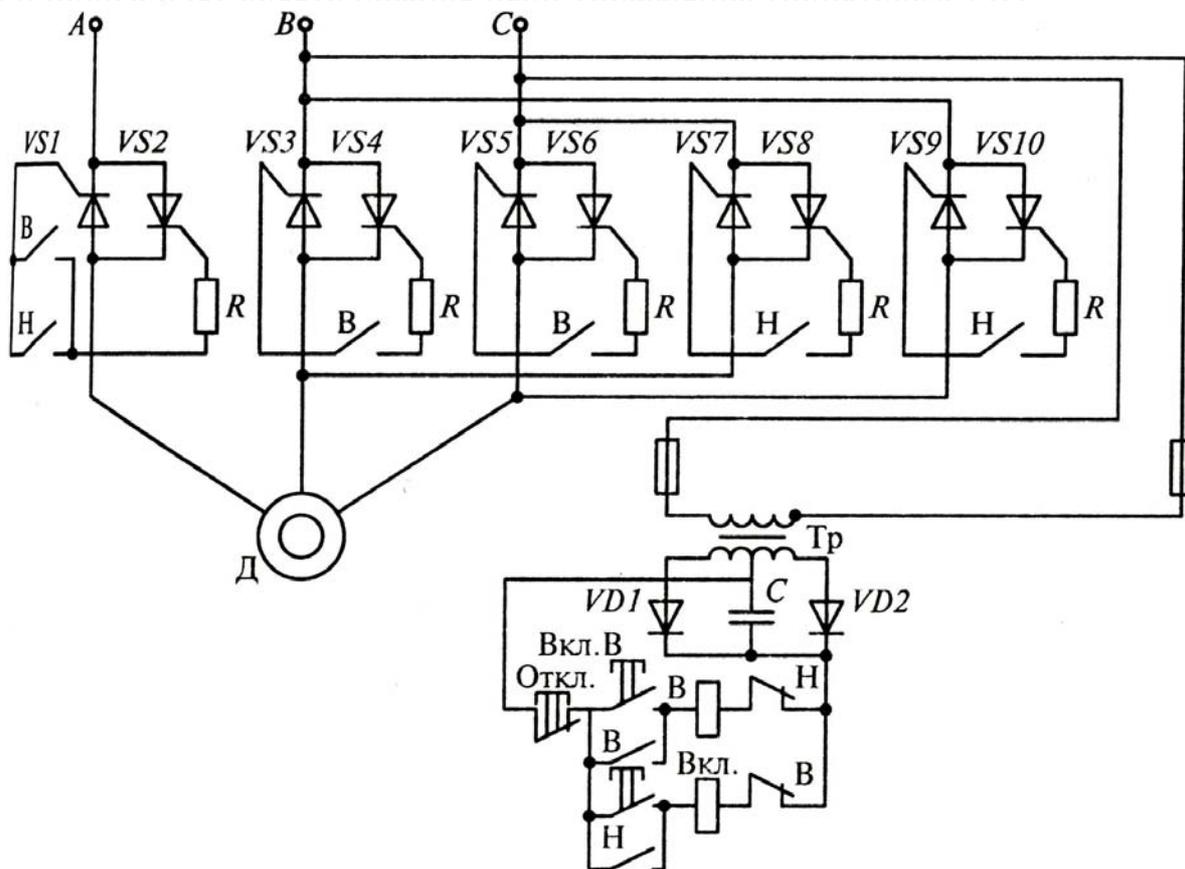


Рис. 3.55. Схема тиристорного реверсивного пускателя

После уменьшения тока через тиристор $VS1$ до нуля он закроется, а положительная полуволна напряжения окажется приложенной к аноду тиристора $VS2$. Это приведет к возникновению тока в цепи управления тиристором $VS2$ (по аналогии с рассмотренным выше управлением тиристором $VS1$), который откроется, и двигатель будет подключен к сети тиристором $VS2$. Далее все повторяется. Аналогично работают тиристоры в фазах B и C .

Для реверсирования (изменения направления вращения) замыкают кнопку включения $Вкл. Н$ (назад). Работают тиристоры $VS1$ и $VS2$, $VS7$ и $VS8$, $VS9$ и $VS10$.

Импульсы управления, длительность которых равна времени отпирания тиристорov, поступают на управляющие электроды в начале каждой положительной полуволны напряжения. Токи через контакты B и H незначительны, и срок службы этих контактов определяется только их механической износостойкостью.