



Федеральное агентство морского и речного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
имени адмирала С.О. МАКАРОВА**

ФАКУЛЬТЕТ ПОРТОВОЙ ТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

Кафедра электропривода и электрооборудования береговых установок

В. О. Тырва

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИКИ**

Учебное пособие

Рекомендовано Редакционно-издательским советом университета в качестве
учебного пособия по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,
профиль «Электропривод и автоматика»

Санкт-Петербург
Издательство ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
2015

УДК 621.31

ББК 31.264

Т93

Рецензенты:

заведующий кафедрой электропривода и электрооборудования береговых установок

ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, профессор, кандидат технических наук

А. В. Саушев;

начальник отдела опытно-конструкторского бюро "Электроавтоматика"

В. А. Волок

Т93 **Тырва, В. О. Электрические и электронные аппараты электроприводов и систем автоматки:** учеб. пособие. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015.– 336 с.

ISBN 978-5-9509-0164-5

Электрические и электронные аппараты рассмотрены как элементы технических систем, предназначенные для управления передачей энергии и информации. Приведены изобразительные модели, электрические схемы и характеристики аппаратов и их функциональных частей.

Учебное пособие предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электропривод и автоматика».

Рекомендовано к изданию на заседании учебно-методической комиссии факультета портовой техники и электромеханики. Протокол № 9 от 30 мая 2014 г.

ISBN 978-5-9509-0164-5

© ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», 2015

© Тырва В. О., 2015

ВВЕДЕНИЕ

Электрические аппараты появились тогда, когда стали проводить первые опыты с электричеством. На протяжении более чем столетие аппараты совершенствовались, появлялись новые типы аппаратов, расширялись области их применения. К настоящему времени создано большое количество электрических и электронных аппаратов разного назначения. Аппараты используются в различных электрических, электромеханических, электрогидравлических и других технических системах управляемой передачи и преобразования энергии. Не менее широко их применяют в системах автоматики для получения разнообразной информации и преобразования ее в сигналы, удобные для использования в системе.

Потребности в применении разнообразных видов аппаратов разного функционального назначения с широким диапазоном характеристик стимулировали использование новейших достижений науки и техники при создании электрических и электронных аппаратов. Электроаппаратостроение является одной из ведущих отраслей промышленности во всем мире с глубокими историческими корнями.

Выдающийся вклад в развитие теории электрических аппаратов внесли известные российские ученые: Н.Е. Лысов (нагрев контактных соединений), Г.В. Буткевич (дугогашение), Е.И. Цейров (газовая динамика дугогасительных устройств и системы управления выключателями), А.М. Залесский (дугогашение, теплоотдача, изоляция), О.Б. Брон (дугогашение, электродинамика, тепловые процессы в контактных системах), Г.А. Кукеков (дугогашение, теплоотдача), И.С. Таев (теория дугогасительных устройств аппаратов низкого напряжения), Б.К. Буль (теория магнитных цепей низковольтной аппаратуры) и др.

В технической литературе (в том числе и учебной) можно встретить разные наименования аппаратов, например, выключатель, переключатель, реле, контактор, пускатель, разрядник, короткозамыкатель и др. Часто в наименовании аппарата отражено его назначение, выполняемая им функция. Например,

пускатель служит для пуска и остановки электродвигателя, осуществляя управление передачей энергии двигателю из электрической сети.

Некоторые аппараты представляют собой комплектные устройства. В них конструктивно и функционально объединены несколько аппаратов. Так, в состав пускателя могут входить такие аппараты, как кнопки управления, электромагнитные контакторы, тепловые реле. Все эти аппараты принято называть электрическими аппаратами и рассматривать как электротехнические устройства.

К электронным аппаратам относят устройства, в которых конструктивно и функционально объединены электронные приборы. В основном это полупроводниковая техника. Например, получили распространение твердотельные реле, у которых в отличие от электромеханических реле нет подвижных частей.

Для электрических и электронных аппаратов используют обобщающее наименование – электроаппарат. В нем отражается отличительная особенность электрических и электронных аппаратов – они обязательно имеют электрические связи с другими элементами некоторой технической системы. Однако эта особенность не исключает существования технически реализованных для электроаппарата механических, магнитных, оптических и других видов связей. В любом случае аппарат выполняет некоторую функцию управления передачей энергии в системе. Например, в электроприводе применяются аппараты для управления передачей электрической и механической энергии.

В главе 1 данного пособия электроаппарат представляется элементом технической системы. Выделяются и характеризуются его связи с другими элементами системы. Учитываются особенности функционирования аппарата, прослеживаемые по входным и выходным связям аппарата. Анализируется проявление электрического тока в тепловом и механическом воздействиях его на аппарат. Приводится классификация аппаратов по нескольким классификационным признакам.

При изучении электроаппаратов различного назначения и принципа действия удобно сочетать анализ с синтезом. При анализе электроаппарат пред-

Учебное издание

Тырва Владимир Оскарович, канд. техн. наук, проф.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Учебное пособие



199106, Санкт-Петербург, 22-я линия, 9
Тел./факс: (812) 322-33-42, 322-77-26
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2
Тел.: (812) 748-97-19, 748-97-23
e-mail: izdat@gumrf.ru

Печатается в авторской редакции

Ответственный за выпуск Сатикова Т.Ф.
Компьютерная верстка Евсюткина М.Н.

Подписано в печать 22.01.2015
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman
Усл. печ. л. 21. Тираж 200 экз. Заказ № 155М/2014

10.3.1. Составные части и принцип действия электромагнитной фрикционной муфты.....	314
10.3.2. Особенности включения муфты в работу.....	316
10.3.3. Особенности отключения муфты.....	317
10.4. Электромагнитные порошковые муфты.....	318
10.4.1. Особенности конструкции и принципа действия.....	318
10.4.2. Достоинства и недостатки порошковых муфт.....	318
10.5. Электромагнитные асинхронные муфты.....	319
10.5.1. Составные части и принцип действия асинхронной муфты.....	319
10.5.2. Особенности асинхронных муфт.....	320
ССЫЛКИ.....	321
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	327

ставляется в виде совокупности функциональных частей, модели которых достаточно просты для изучения. При синтезе функциональные части объединяются в единое целое на основе композиции их моделей. Учитывая то, что разнообразные электроаппараты состоят из относительно небольшого множества типовых функциональных частей, в главах 2, 3, 4 приводятся сведения о таких частях, а именно: электрических контактах, электромагнитных механизмах, механических передачах, электронных ключах, интегрированных функциональных элементах и др.

В главах 5, 6, 7, 8, 9, 10 аппараты различного назначения рассматриваются с двух позиций. Каждый аппарат представляется состоящим из нескольких функциональных частей, обеспечивающих при своем взаимодействии, требуемое функционирование аппарата. На этой основе раскрывается принцип действия аппарата и особенности его работы. Также электроаппарат представляется элементом системы с входами и выходами и с определенным преобразованием входных воздействий в выходные воздействия на другие элементы системы. На этой основе конкретизируется применение аппарата в технической системе.

В этих главах рассматриваются аппараты дистанционного управления передачей энергии по силовым электрическим и по кинематическим цепям электроприводов, реле различного назначения, аппараты защиты электроустановок и аппараты защиты людей от поражения электрическим током, аппараты ручного управления, а также аппараты, которые называют информационными устройствами – это измерительные преобразователи и датчики.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 130302 "Электроэнергетика и электротехника" профиль "Электропривод и автоматика". Исходя из опыта преподавания, автор счел необходимым сделать в тексте ссылки на литературу, непосредственно не относящуюся к данной дисциплине, а также разъяснения некоторых терминов, сгруппированные в конце пособия под заголовком «Ссылки».

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОАППАРАТАХ КАК ЭЛЕМЕНТАХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. Основные понятия и определения

1.1.1. Электрические и электронные аппараты - электроаппараты

Электроаппараты получили применение в электроприводах различного типа, в системах электроснабжения и электроавтоматики, а также в других технических системах. Например, в электроприводе простейшее управление передачей электрической энергии от внешнего источника (силовой сети) до электродвигателя выполняется электромеханическим аппаратом (пускателем). С помощью своих контактов пускатель по командам замыкает и размыкает электрическую цепь питания двигателя тем самым, запуская в работу и отключая электродвигатель. Управление передачей энергии в других случаях может осуществляться с целью контроля и регулирования работы некоторого объекта технической системы, с целью его защиты при возникновении аварийного режима и т. д.

Электроаппарат (ЭА) представляет собой электротехническое или электронное устройство, имеющее оболочку и электрические связи, выходящие за ее пределы, предназначенное для управления¹ передачей энергии² (и информации³) в технической системе.

Оболочка (корпус) ЭА, отделяет аппарат от внешней среды, защищая его от проникновения посторонних твердых предметов и воды, а также защищая обслуживающий персонал от соприкосновения с частями аппарата, находящимися в движении или под электрическим напряжением.

По степени защиты от воздействия окружающей среды (обозначается «IP») ЭА может иметь одно из следующих исполнений: открытое, защищенное, каплезащищенное, брызгозащищенное, водозащищенное (герметичное), а также взрывобезопасное. Например, IP24 означает, что ЭА защищен от попадания внутрь оболочки посторонних твердых предметов диаметром более 12,5 мм и

9.2.2. Индуктивные измерительные преобразователи и датчики	276
9.2.3. Емкостные измерительные преобразователи.....	278
9.2.4. Кодовые датчики положения.....	279
9.2.5. Энкодеры.....	282
9.2.6. Датчики на основе измерительных преобразователей положения	282
9.3. Сельсины.....	284
9.3.1. Сельсин-датчик	284
9.3.2. Сельсин-датчик, работающий в амплитудном режиме	286
9.3.3. Сельсин-датчик, работающий в режиме фазовращателя	286
9.3.4. Трансформаторный режим совместной работы двух сельсинов.....	287
9.3.5. Индикаторный режим совместной работы двух сельсинов	289
9.3.6. Система с дифференциальным сельсином.....	290
9.4. Вращающиеся трансформаторы	291
9.4.1. Элементы конструкции	291
9.4.2. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор	292
9.4.3. Линейный вращающийся трансформатор	293
9.4.4. Некоторые особенности вращающихся трансформаторов	294
9.5. Генераторные преобразователи скорости вращения	294
9.5.1. Тахогенератор постоянного тока	294
9.5.2. Асинхронный тахогенератор переменного тока	296
9.5.3. Синхронный тахогенератор	299
9.6. Цифровые датчики скорости	300
9.6.1. Элементы конструкции	300
9.6.2. Блок формирования импульсов	301
9.6.3. Кодовый преобразователь	302
9.7. Датчики тока и датчики напряжения	302
9.7.1. Назначение и составные части датчиков	302
9.7.2. Первичные измерительные преобразователи датчиков	303
9.7.3. Измерительный трансформатор постоянного тока	305
9.7.4. Потенциальный разделитель	306
Глава 10. ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫЕ ТОРМОЗНЫЕ УСТРОЙСТВА И МУФТЫ	309
10.1. Общие сведения	309
10.2. Электромагнитные тормозы	310
10.2.1. Составные части и принцип действия электромагнитного тормоза	310
10.2.2. Совместная работа тормоза и электродвигателя	311
10.2.3. Электромагниты тормозных устройств.....	313
10.3. Электромагнитные фрикционные муфты.....	314

7.4.4. Особенности выбора автоматического выключателя	237
7.4.5. Мотор-автоматы	238
7.5. Выключатели дифференциального тока	239
7.5.1. Назначение и принцип действия выключателя дифференциального тока	239
7.5.2. Подключение УЗО к электрической цепи	241
7.6. Плавкие предохранители	241
7.6.1. Назначение и составные части предохранителя	241
7.6.2. Времятоковая характеристика предохранителя	242
7.6.3. Разновидности плавких вставок	243
7.6.4. Особенности выбора предохранителей	244
Глава 8. АППАРАТЫ РУЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ, КОМАНДОАППАРАТЫ	245
8.1. Общие сведения	245
8.2. Кнопки управления и кнопочные посты	247
8.2.1. Применение кнопок для дистанционного управления аппаратами	247
8.2.2. Узлы цифровых систем с кнопками управления	248
8.3. Универсальные переключатели, командоконтроллеры	250
8.3.1. Универсальные переключатели, таблицы замыканий	250
8.3.2. Универсальные пакетные ключи управления	252
8.3.3. Командоконтроллер	252
8.3.4. Разновидности командоконтроллеров	253
8.3.5. Электронные аналоги некоторых командоаппаратов	254
8.4. Путевые и конечные выключатели	255
8.4.1. Механический путевой выключатель	255
8.4.2. Характеристики управления путевого и конечного выключателей	257
8.4.3. Разновидности путевых и конечных выключателей	259
8.5. Контроллеры	260
8.5.1. Назначение и особенности конструкции	260
8.5.2. Применение контроллера для управления электродвигателем	261
8.6. Реостаты	262
8.6.1. Виды реостатов	262
8.6.2. Применение реостата для управления электродвигателем	263
8.7. Рубильники, пакетные выключатели и переключатели	265
8.7.1. Рубильник, разъединитель	265
8.7.2. Пакетные выключатели и переключатели	267
Глава 9. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ	269
9.1. Общие сведения	269
9.2. Датчики положения	273
9.2.1. Резистивные преобразователи и датчики	273

брызг воды; обслуживающий персонал защищен от соприкосновения пальцев рук с подвижными деталями и частями, находящимися под электрическим напряжением.

Электрические связи ЭА с другими элементами технической системы, реализованные в виде кабелей, проводов или других электротехнических изделий, служат проводниками электрического тока, по которым передается энергия и информация. Кроме электрических связей ЭА может иметь механические связи, по которым действуют силы и моменты сил. Возможны также иные виды связей ЭА с другими элементами системы, в которой он функционирует, например, оптическая, гидравлическая и др.

1.1.2. Входные и выходные воздействия

По связям ЭА с другими элементами системы выделяют входы и выходы аппарата. На вход поступает входное воздействие, характеризующееся входной переменной x , например, величиной электрического тока I , величиной механической силы F , или другой физической величиной. На выходе аппаратом создается выходное воздействие, характеризующееся выходной переменной y – также некоторой физической величиной.

При управлении передачей электрической энергии ЭА воздействует на электрическую цепь, по которой передается энергия, изменяя определенный параметр цепи. Воздействие может производиться путем изменения сопротивления, индуктивности или емкости участка цепи, к которому подключен аппарат. Соответственно, выходными переменными аппарата будут величины сопротивления ($y=R$), индуктивности ($y=L$) или емкости ($y=C$). Управление сопротивлением применяют для цепей постоянного и переменного тока, причем наименьшие потери энергии достигаются при коммутации цепей с помощью электрических контактов и электронных ключей, когда сопротивление цепи они изменяют скачком от нуля до бесконечности и аналогично в обратную сторону (см. п. 1.3). Управление индуктивностью или емкостью применяют для

цепей переменного тока. Результатом управления является изменение реактивного сопротивления цепи, и величины передаваемой по ней энергии в единицу времени.

Управление передачей механической энергии, например, в электроприводе от двигателя к рабочему механизму осуществляют обычно двумя способами: либо отбором части энергии путем торможения вала, либо изменением момента силы, передаваемого от ведущего вала ведомому валу. При первом способе управления используют тормозные устройства, преобразующие механическую энергию в тепловую энергию. При втором способе управления применяют фрикционные или электромагнитные муфты, допускающие проскальзывание ведомого вала относительно ведущего вала. Выходной переменной аппарата является сила или момент силы.

1.1.3. Источники управляющих воздействий и объекты управления

Объектами управления электроаппаратов в электроприводах и в различных электромеханических системах являются электрические и кинематические цепи, по которым передается энергия от источников энергии, например, от электрической сети к приемникам энергии, например, к электродвигателю. Управление объектом организуется по определенному закону преобразования входного управляющего воздействия на аппарат в выходное воздействие на объект. Источники, от которых электроаппарат может получать управляющие воздействия, и объекты, на которые он может воздействовать в электромеханической системе при управлении передачей энергии, показаны на рис. 1.1 (воздействия показываем стрелками).

Разделение электрических цепей на цепи управления и силовые цепи, как отражено на рис. 1.1, является общепринятым и условным. Обычно считают, что цепи управления, включая цепи контроля и сигнализации, – это слаботочные цепи, по ним передается информация с помощью электрических сигналов.

6.2. Электромагнитные реле тока и реле напряжения.....	200
6.2.1. Структурная схема электромагнитного реле	200
6.2.2. Особенности электромагнитных реле	201
6.2.3. Основные параметры электромагнитных реле	202
6.2.4. Настройка реле на срабатывание или на отпускание	203
6.2.5. Герконовые реле	204
6.3. Электронные и комбинированные реле	206
6.3.1. Полупроводниковые твердотельные реле	206
6.3.2. Комбинированное полупроводниковое реле тока	208
6.3.3. Комбинированное полупроводниковое реле напряжения	210
6.4. Реле времени.....	212
6.4.1. Назначение и основные параметры реле времени.....	212
6.4.2. Электромагнитное реле времени с анкерным механизмом	212
6.4.3. Электромагнитное реле времени с демпферной гильзой	213
6.4.4. Электромагнитное реле времени с пневматическим замедлителем.....	214
6.4.5. Моторное реле времени.....	215
6.4.6. Комбинированное реле времени с электронным замедлителем	216
6.5. Реле контроля неэлектрических величин	217
6.5.1. Основные типы реле	217
6.5.2. Механическое реле давления	218
6.5.3. Реле контроля угловой скорости	219
6.5.4. Температурное реле.....	220
6.5.5. Комплексное реле контроля неэлектрических параметров.....	221
Глава 7. АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ.....	222
7.1. Общие сведения	222
7.2. Электромагнитные аппараты защиты	224
7.2.1. Реле максимального тока	224
7.2.2. Реле минимального напряжения	226
7.2.3. Реле максимального напряжения.....	227
7.2.4. Нулевая защита	228
7.3. Электротепловые реле защиты	229
7.3.1. Назначение и состав электротеплового реле.....	229
7.3.2. Особенности выбора электротеплового реле для защиты электродвигателя.....	229
7.3.3. Пример применения электротеплового реле	231
7.4. Автоматические воздушные выключатели	232
7.4.1. Назначение и состав автоматического выключателя.....	232
7.4.2. Обобщенная структурная схема автоматического выключателя	233
7.4.3. Времятоковая характеристика установочного автомата	235

4.8.5. Аналоговые интегральные схемы	146
Глава 5. ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫЕ АППАРАТЫ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ	149
5.1. Общие сведения	149
5.2. Электромагнитные контакторы	150
5.2.1. Составные части и принцип действия контактора	150
5.2.2. Классификация контакторов	152
5.2.3. Основные технические данные контакторов	153
5.2.4. Параметры срабатывания контактора	154
5.2.5. Особенности контакторов постоянного тока	155
5.2.6. Особенности контакторов переменного тока	157
5.2.7. Категории применения контакторов	159
5.2.8. Применение контакторов для пуска и останова электродвигателя	160
5.2.9. Магнитные пускатели	162
5.3. Разновидности электромагнитных контакторов	165
5.3.1. Контактные с жидкометаллическими контактами	165
5.3.2. Вакуумные контакторы	167
5.3.3. Силовые герметизированные контакторы	168
5.3.4. Синхронные контакторы	169
5.3.5. Гибридные контакторы	170
5.4. Бесконтактные коммутаторы и пускатели	172
5.4.1. Тиристорный коммутатор цепи постоянного тока	172
5.4.2. Тиристорный коммутатор цепи переменного тока	174
5.4.3. Твердотельные контакторы	176
5.4.4. Тиристорные коммутаторы трехфазных цепей асинхронных двигателей	177
5.4.5. Тиристорные пускатели с широтно-импульсным управлением	180
5.4.6. Тиристорные пускатели с фазовым управлением	183
5.4.7. Особенности пускателей «мягкого пуска»	185
5.5. Управляемый дроссель с подмагничиванием	188
5.5.1. Свойства дросселя с подмагничиванием	188
5.5.2. Управление передачей энергии по электрической цепи	190
5.5.3. Характеристика управления дросселя	192
5.6. Магнитный усилитель	193
5.6.1. Усилитель на основе двух дросселей с подмагничиванием	193
5.6.2. Электромагнитные процессы в усилителе	194
5.6.3. Характеристика управления усилителя	197
Глава 6. РЕЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ УПРАВЛЕНИЯ	198
6.1. Общие сведения	198

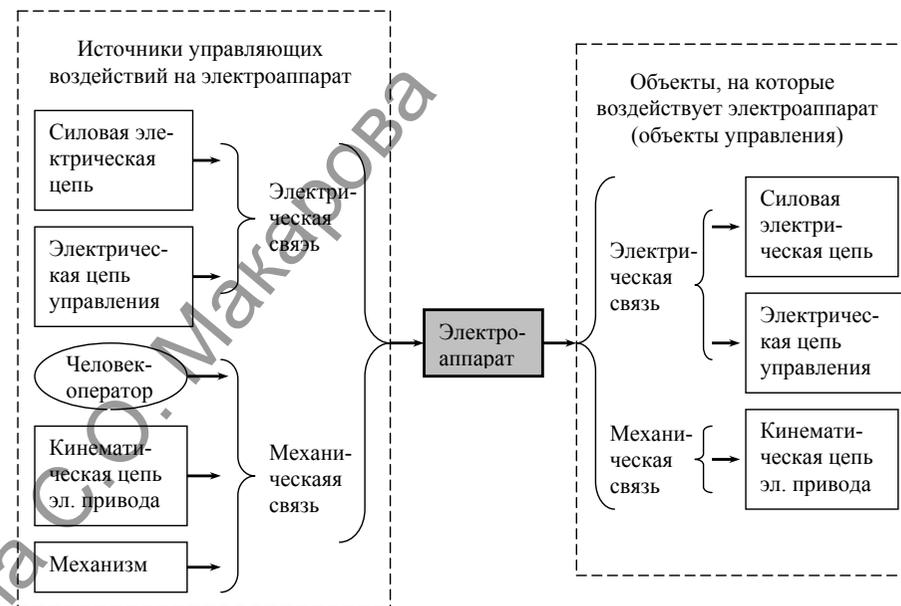


Рис. 1.1. Обобщенная схема связей электроаппарата в электромеханической системе

Силовые цепи относят к сильноточным цепям, считая, что по ним передается энергия. Однако в любом случае передача энергии сопровождается передачей информации и, наоборот, на передачу информации каким-либо воздействием затрачивается энергия. Это относится и к цепям управления, и к сильноточным цепям. Когда хотят выделить информационную сторону воздействия, слово «воздействие» заменяют словом «сигнал»⁴. Информация передается сигналом с помощью *переносчика информации* – электрического напряжения, тока, сопротивления и др., изменяющего свою величину во времени.

1.2. Представление аппарата элементом системы

1.2.1. Структура системы с электроаппаратом

Представим электроаппарат в качестве элемента технической системы с помощью структурной схемы (рис. 1.2).

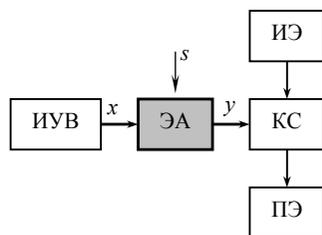


Рис. 1.2. Представление электроаппарата в качестве элемента технической системы

Электроаппарат (ЭА) воздействует на *канал связи*⁵ (КС) и через него на приемник энергии (ПЭ). Необходимая энергия воздействия на ПЭ обеспечивается источником энергии (ИЭ). Для электропривода, например, в качестве ИЭ может рассматриваться действующая силовая электрическая сеть, в качестве ПЭ – электродвигатель, в качестве КС – *электрическая цепь*⁶, по которой информация от ЭА и электрическая энергия от ИЭ передается к ПЭ.

ЭА формирует выходное воздействие y на объект по входному *управляющему сигналу* x , который поступает от источника управляющего воздействия (ИУВ) к аппарату. Этот сигнал в зависимости от типа ИУВ может содержать информацию о задаче управления, о результате управления, о параметрах внешней среды (возмущениях) и т.д. При этом аппарат ЭА может быть представлен *модулятором*⁷ потока энергии от ИЭ к ПЭ или *усилителем*⁸, если ЭА рассматривается совместно с каналом КС, в который поступает энергия от источника ИЭ.

1.2.2. Источники энергии

Представим действие *источника электрической энергии* (ИЭ на рис. 1.2) с помощью вольтамперной характеристики, как показано на рис. 1.3.

3.9. Разновидности преобразовательных устройств.....	114
3.9.1. Магнитоэлектрический преобразователь.....	114
3.9.2. Электродинамический преобразователь.....	115
3.9.3. Биметаллический электротепловой преобразователь.....	115
Глава 4. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА АППАРАТОВ.....	117
4.1. Общие сведения.....	117
4.2. Транзисторные исполнительные устройства.....	120
4.2.1. Основные схемы.....	120
4.2.2. Семейство выходных характеристик транзистора.....	121
4.2.3. Активный режим работы транзистора.....	122
4.2.4. Ключевой режим работы транзистора.....	123
4.2.5. Допустимая мощность рассеяния на транзисторе.....	124
4.3. Силовые транзисторные ключи.....	124
4.3.1. Применяемые транзисторы.....	124
4.3.2. Силовые модули на транзисторах.....	125
4.4. Тиристорные ключи.....	127
4.4.1. Применяемые тиристоры.....	127
4.4.2. Вольт-амперная характеристика тиристора.....	127
4.4.3. Основные параметры, характеризующие работу тиристора.....	129
4.4.4. Некоторые разновидности тириستоров.....	129
4.5. Безопасная работа полупроводниковых ключей.....	131
4.5.1. Коммутационные процессы.....	131
4.5.2. Потери энергии в ключе.....	132
4.5.3. Область безопасной работы ключа.....	132
4.5.4. Обобщенные показатели полупроводниковых приборов, используемых в силовых электронных ключах.....	134
4.6. Сравнительная характеристика силовых ключей.....	134
4.6.1. Показатели функционирования силовых ключей.....	134
4.6.2. Сопоставление свойств коммутирующих контактов и электронных ключей.....	136
4.7. Формирователи импульсов управления полупроводниковыми ключами.....	137
4.7.1. ФИУ биполярного транзистора.....	137
4.7.2. ФИУ полевого транзистора.....	139
4.7.3. ФИУ тиристора.....	139
4.8. Интегрированные функциональные элементы и устройства.....	141
4.8.1. Интегральные схемы.....	141
4.8.2. Основные логические элементы.....	142
4.8.3. Логическая схема с памятью.....	143
4.8.4. Цифровые устройства.....	144

3.3. Электромагнитные приводные устройства	78
3.3.1. Электромагнит – входное устройство дистанционно управляемого аппарата ...	78
3.3.2. Электромагнитный механизм	80
3.3.3. Рабочий магнитный поток и поток рассеяния	81
3.3.4. Электромагнитная сила тяги	81
3.3.5. Механическая характеристика электромагнитного аппарата	82
3.3.6. Особенности действия механической передачи с электромагнитным механизмом	83
3.3.7. Нейтральные электромагнитные приводы	84
3.4. Электромагнитный привод постоянного тока	84
3.4.1. Переходные процессы в электромагнитном приводе	84
3.4.2. Динамические характеристики электромагнитного привода	86
3.4.3. Установившийся режим работы электромагнитного привода, тяговая характеристика	88
3.4.4. Характеристика управления электромагнитного привода	89
3.4.5. Коэффициент возврата электромагнитного привода	91
3.4.6. Магнитные системы нейтральных электромагнитных приводов постоянного тока	91
3.5. Поляризованный электромагнитный привод	93
3.5.1. Особенности конструкции и работы	93
3.5.2. Характеристика управления поляризованного привода с переключающей пружиной	95
3.5.3. Характеристика управления поляризованного привода с возвратной пружиной	96
3.6. Электромагнитный привод переменного тока	98
3.6.1. Катушка привода, индуктивность катушки	98
3.6.2. Вибрация якоря электромагнитного механизма	100
3.6.3. Устранение вибрации якоря с помощью короткозамкнутого витка	101
3.6.4. Тяговая характеристика привода	102
3.6.5. Характеристика управления привода	102
3.6.6. Коэффициент возврата	104
3.6.7. Магнитные системы электромагнитных приводов переменного тока	104
3.7. Ускорение и замедление срабатывания электромагнитного привода	105
3.7.1. Повышение быстродействия привода	106
3.7.2. Замедление действия привода	108
3.7.3. Применение замедлителя в составе электромагнитного механизма	109
3.7.4. Применение замедлителя в составе передаточного устройства	110
3.8. Магнитоуправляемые контакты – герконы	112
3.8.1. Геркон	112
3.8.2. Разновидности герконов	113

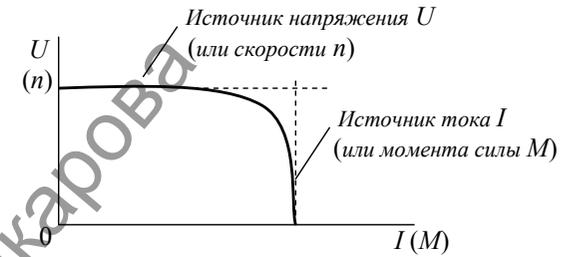


Рис. 1.3. Типовая внешняя характеристика источника энергии

На определенных участках вольтамперной характеристики источник электрической энергии может рассматриваться как источник напряжения U или как источник тока I . Эти участки отмечены на рис. 1.3.

Подобное выделение источника скорости n и источника силы F (или момента силы M) можно представить для источника механической энергии по его механической характеристике. Например, если в электроприводе источником механической энергии служит электродвигатель, то механическая характеристика $n=f(M)$ электропривода, т. е. зависимость скорости вращения n двигателя от момента M на его валу (рис. 1.3), может иметь два характерных участка. На одном из участков (горизонтальном) механической характеристики n не зависит от M , на другом участке (вертикальном) M не зависит от n . На первом участке электродвигатель работает как источник скорости n , на втором – как источник силы, точнее, момента силы M .

1.2.3. Возмущающие воздействия

Кроме управляющего сигнала x на формирование аппаратом воздействия y на объект влияют также другие факторы – это различные процессы, протекающие в канале связи КС, например, ток, вызывающий нагрев частей аппарата и изменение их функциональных свойств, процессы, происходящие в окружающей среде, например, электромагнитное излучение, влияющее на работу аппарата и т.д. Эти факторы в совокупности называют *возмущающими воздействиями* или *возмущениями*. Они искажают процесс управления, т. е. требуемую за-

висимость y от x , и могут в некоторых случаях привести к потере работоспособности ЭА. На рис. 1.2 возмущения обозначены буквой s , и действие их на ЭА показано стрелкой.

1.3. Представление аппаратов с помощью изобразительных моделей и электрических схем

Каждый ЭА состоит функциональных частей, которые в том или ином виде, отличаясь, быть может, по конструкции и размерам, присутствуют и в других аппаратах.

1.3.1. Изобразительная модель

Изобразительная модель⁹ ЭА в упрощенной форме показывает функциональные части аппарата, дает представление об их конструкции, взаимодействии и принципе действия аппарата в целом.

В качестве примера рассмотрим изобразительную модель электрического аппарата, называемого *кнопкой управления* (рис. 1.4).

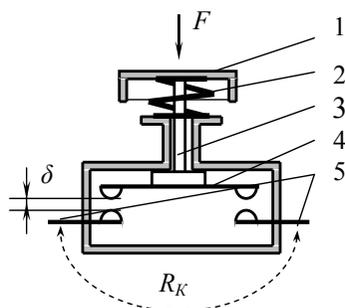


Рис. 1.4. Изобразительная модель кнопки управления

Кнопка управления предназначена для замыкания и размыкания, иначе говоря, для *коммутации*¹⁰ электрической цепи.

Кнопку управления присоединяют к разрыву электрической цепи при помощи токопроводящих деталей 5, закрепленных в оболочке - корпусе аппарата. Корпус выполнен из изоляционного материала, не проводящего электрический

1.7.4. Возникновение и действие электродинамических сил	35
1.7.5. Электродинамическая устойчивость аппарата.....	37
1.8. Основные требования, предъявляемые к аппаратам	37
1.9. Классификация электроаппаратов	40
Глава 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ АППАРАТОВ	44
2.1. Общие сведения	44
2.2. Техническая реализация и параметры коммутирующих контактов	46
2.2.1. Конструктивный узел с мостиковым контактом.....	46
2.2.2. Основные параметры коммутирующего контакта.....	47
2.2.3. Характеристики управления подвижного контактного узла	48
2.2.4. Конструктивный узел с пальцевым контактом	49
2.2.5. Другие разновидности контактных узлов	50
2.3. Переходное сопротивление контакта.....	51
2.3.1. Переходное сопротивление и основные факторы, от которых оно зависит.....	51
2.3.2. Глубина контактной коммутации электрической цепи.....	53
2.4. Электрическая дуга коммутирующего контакта	54
2.4.1. Возникновение электрических разрядов на коммутирующем контакте	54
2.4.2. Влияние электрической дуги на коммутируемую цепь	55
2.4.3. Условия гашения электрической дуги постоянного тока	55
2.4.4. Особенности горения и гашения электрической дуги переменного тока	56
2.5. Способы гашения электрической дуги, горящей на коммутирующем контакте	57
2.5.1. Механическое растягивание электрической дуги.	57
2.5.2. Охлаждение электрической дуги.	58
2.5.3. Повышение давления в зоне дуги.	60
2.5.4. Гашение дуги в вакууме	61
2.5.5. Размыкание контакта в цепи переменного тока при прохождении тока через ноль	61
2.5.6. Разрыв дуги на несколько коротких дуг	62
2.5.7. Перевод тока с коммутирующего контакта в ключ, присоединенный параллельно контакту в электрической цепи.....	62
2.6. Достоинства и недостатки контактной коммутации	63
Глава 3. ПРИВОДНЫЕ УСТРОЙСТВА АППАРАТОВ КОНТАКТНОЙ КОММУТАЦИИ ...	66
3.1. Общие сведения	66
3.2. Механические передачи	69
3.2.1. Основные типы механических передач	69
3.2.2. Механическая передача с возвратной пружиной	71
3.2.3. Механическая передача с защелкой	71
3.2.4. Механическая передача с переключающей пружиной	73
3.2.5. Особенности механических передач с переключающей пружиной	75

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОАППАРАТАХ КАК ЭЛЕМЕНТАХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	6
1.1. Основные понятия и определения	6
1.1.1. Электрические и электронные аппараты - электроаппараты	6
1.1.2. Входные и выходные воздействия	7
1.1.3. Источники управляющих воздействий и объекты управления	8
1.2. Представление аппарата элементом системы	9
1.2.1. Структура системы с электроаппаратом	9
1.2.2. Источники энергии	10
1.2.3. Возмущающие воздействия	11
1.3. Представление аппаратов с помощью изобразительных моделей и электрических схем	12
1.3.1. Изобразительная модель	12
1.3.2. Структурные, функциональные и принципиальные схемы	14
1.3.3. Пример схемы системы управления передачей энергии по электрической цепи	17
1.4. Аппараты ручного управления и дистанционно управляемые аппараты	18
1.4.1. Аппараты в системе дистанционного управления	18
1.4.2. Функциональные узлы с электроаппаратами	19
1.5. Особенности управления передачей энергии по электрической цепи	20
1.5.1. Система управления передачей электрической энергии	20
1.5.2. Схемы подключения электроаппарата к электрической цепи	21
1.5.3. Оценка потерь электрической энергии	22
1.5.4. Передача электрической энергии импульсами	23
1.6. Преобразование входных воздействий аппаратами	24
1.6.1. Оператор преобразования функций времени (процессов)	24
1.6.2. Представление аппарата линейным или нелинейным элементом системы	25
1.6.3. Характеристика управления и внешняя характеристика аппарата	27
1.6.4. Характеристика управления с логическими переменными	29
1.6.5. Аппараты без памяти	30
1.6.6. Аппараты с памятью	31
1.7. Проявление электрического тока в тепловом и механическом воздействиях на аппарат	33
1.7.1. Источники теплоты в электроаппаратах	33
1.7.2. Предельная допустимая температура нагрева	34
1.7.3. Термическая устойчивость аппарата	34

ток. Замыкание и размыкание электрической цепи осуществляется подвижной токопроводящей деталью 4, которую называют *мостиком*.

В исходном состоянии аппарата между мостиком 4 и неподвижными деталями 5 имеет место максимальный по величине воздушный зазор δ , благодаря пружине 2, которую называют *возвратной пружиной*. Предварительно сжатая при установке в аппарат пружина 2, стремясь расправиться, воздействует на корпус аппарата нижним концом, а верхним концом – на подвижную деталь 1, которая является *органом управления* аппарата. Поэтому подвижный узел, состоящий из органа управления 1, мостика 4 и соединяющей их детали 3, называемой *толкателем*, поднят до предела, и контактного соприкосновения мостика 4 с деталями 5 нет. Электрическая цепь разомкнута. Это означает, что благодаря воздушному зазору $\delta > 0$, электрическое сопротивление R_K между деталями 5 в разрыве электрической цепи очень большое ($R_K \rightarrow \infty$).

Орган управления 1, в данном случае *кнопка*, является частью оболочки аппарата. Она выполнена из непроводящего ток материала и предназначена для восприятия мускульного усилия F , создаваемого человеком при управлении аппаратом. Сила F является входным управляющим воздействием для этого аппарата. Если приложено усилие F , и оно превышает силу F_{II} противодействия со стороны возвратной пружины 2, то орган управления 1 с помощью толкателя 3 переместит вниз токопроводящий мостик 4, и мостик войдет в соприкосновение с неподвижными деталями 5. При $\delta = 0$ и $F - F_{II} > 0$ образуется *электрический контакт* - соприкосновение *контактных деталей* 5 и . В результате электрическая цепь стала замкнутой. Это означает, что сопротивление R_K в цепи на участке между контактными деталями 5 уменьшилось до очень малого значения ($R_K \rightarrow 0$) и протекание тока по цепи стало возможным.

Когда усилие F перестанет действовать ($F = 0$), возвратная пружина 2, расправляясь, вернет орган управления 1, толкатель 3 и мостик 4 в исходное положение, при котором электрический контакт между неподвижными контактными деталями 5 и подвижным контактным мостиком 4 будет нарушен. Электрическая цепь окажется разомкнутой контактным мостиком 4. Сопротивление R_K

в разрыве электрической цепи между деталями 5 примет большое значение ($R_K \rightarrow \infty$). Ток по цепи протекать не сможет.

Итак, с помощью кнопки управления создается и нарушается электрический контакт токопроводящих (контактных) деталей электрической цепи. Такой электрический контакт называют *коммутирующим контактом* (см. п. 2.1). Входным управляющим воздействием для кнопки управления является сила F , прикладываемая к органу управления. Выходным воздействием на электрическую цепь является сопротивление R_K , создаваемое коммутирующим контактом в электрической цепи. Кнопка управления позволяет изменять сопротивление R_K в широких пределах, практически от нуля до бесконечности, и тем самым позволяет управлять передачей энергии по электрической цепи.

1.3.2. Структурные, функциональные и принципиальные схемы

Кнопку управления, показанную на рис. 1.4, можно представить в виде той или иной схемы. Вообще в виде схемы может быть изображен аппарат или иное электротехническое или электронное устройство, если в нем выделяют несколько частей.

Схема структурная показывает основные части рассматриваемого устройства, их назначение и взаимосвязи. Структурная схема служит для общего ознакомления с частями устройства и взаимодействием этих частей. Составные части устройства изображают упрощенно в виде прямоугольников произвольной формы и размеров. Входы и выходы устройства и его составных частей показывают в виде стрелок. Например, кнопку управления, показанную на рис. 1.4, можно представить структурной схемой, как показано на рис. 1.5 а.

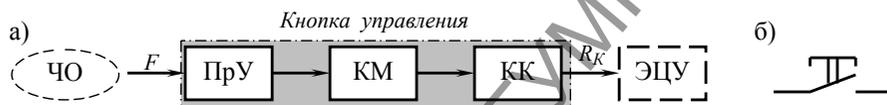


Рис. 1.5. Структурная схема кнопки управления (а) и ее изображение на принципиальной электрической схеме (б)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алиев И. И., Абрамов М. Б. Электрические аппараты: Справочник. – М.: ИП РадиоСофт, 2004.
2. Марков Э. Т. Судовые электрические аппараты. – Л.: Судостроение, 1982.
3. Родштейн Л. А. Электрические аппараты. – М.: Энергия, 1980.
4. Розанов Ю. К. Электронные устройства электромеханических систем: Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / Ю. К. Розанов, Е. М. Соколова. – М.: Издат. центр «Академия», 2004.
5. Таев И. С. Электрические аппараты управления. – М.: Высш. шк., 1984.
6. Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов / Г. Н. Александров, В. В. Борисов, Г. С. Каплан и др.; под ред. проф. Г. Н. Александрова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.
7. Терехов В. М. Элементы автоматизированного электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Тырва В. О. Электрические и электронные аппараты. Элементы и узлы электроаппаратов: учеб. пособие. – СПб.: ФГО ВПО СПГУВК, 2009.
9. Тырва В. О. Электрические и электронные аппараты. Ч. 2. Аппараты электроприводов и распределительных устройств низкого напряжения: учеб. пособие. – СПб.: СПГУВК, 2010.
10. Чунихин А. А. Электрические аппараты: учебн. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
11. Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов/ под ред. Ю. К. Розанова. 2-е изд. – М.: Информэлектро, 2001.

словарь по автоматике, информатике и вычислительной технике/ В. В. Зотов, Ю. Н. Маслов, А. Е. Пядочкин и др. – М.: Высш. шк., 1989.

34. См. п. 15.

35. Термин *датчик* часто употребляется как синоним более общего термина *преобразователь* (см. например, *Бриндли К.* Измерительные преобразователи: Справочное пособие: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1991).

Датчик – устройство, преобразующее физическую величину в сигналы для обработки техническими средствами (Першиков В. И., Савинков В. М. Толковый словарь по информатике. – М.: Финансы и статистика, 1991).

36. *Модуляция* – изменение параметров некоторого физического процесса (переносчика информации) в соответствии с текущими значениями передаваемого сигнала (модулирующего сигнала). Устройство, осуществляющее модуляцию, называют *модулятором*. (Терминологический словарь по автоматике, информатике и вычислительной технике: Справ. Пособие для СПТУ/В. В. Зотов, Ю. Н. Маслов, А. Е. Пядочкин и др. – М.: Высш. шк., 1989). См. также п. 7.

Для наглядности представления кнопки управления (как элемента системы) к структурной схеме кнопки добавлены внешние связи этого аппарата ручного управления с человеком-оператором (ЧО) и с электрической цепью управления (ЭЦУ).

На структурной схеме выделены функциональные части кнопки управления - коммутирующий контакт (КК), контактный мостик (КМ) и приводное устройство (ПрУ) – узел, состоящий в соответствии с рис. 1.4 из органа управления и толкателя. Структурная схема может быть детализирована. Например, в составе ПрУ можно выделить орган управления и толкатель.

Схема электрическая принципиальная определяет полный состав электрических, электромеханических и электронных элементов устройства и дает детальное представление о принципе работы этого устройства.

Изображения элементов на принципиальных электрических схемах и их буквенные обозначения выполняют в соответствии с ГОСТ. Например, на рис. 1.5 б показано установленное ГОСТ 2.755-74 обозначение кнопки управления, изобразительная модель которой представлена на рис. 1.4 а.

Необходимо учитывать следующие *правила* построения принципиальных электрических схем:

элементы любого устройства изображаются при обесточенном состоянии этого устройства; если устройство приводится в действие механическим воздействием, то оно изображается в нулевом или отключенном положении (например, на рис. 1.4 б контакт кнопки управления разомкнут тогда, когда к кнопке не приложена сила F);

изображение элементов какого-либо устройства может быть совмещенным или разнесенным. В первом случае все элементы устройства располагаются на схеме в непосредственной близости друг к другу, и всем им присваивается единое буквенно-цифровое обозначение. Во втором случае элементы устройства размещаются в разных частях электрической схемы, и каждому из них присваивается буквенно-цифровое обозначение. Условные обозначения некоторых элементов электрических схем приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Наименование	Обозначение
Линия электрической связи с ответвлением	
Резистор постоянный	
Конденсатор постоянной емкости	
Обмотка трансформатора, дросселя, магнитного усилителя, катушка индуктивности	
Коммутирующие контакты: закрывающий размыкающий	
переключающий	
Незакрываемые контакты: разборный разъемный	
Привод электромагнитный (коммутирующих контактов аппарата)	
Привод с помощью биметалла	
Предохранитель плавкий	
Диод полупроводниковый	
Тиристор триодный незапираемый	
Транзистор биполярный типа <i>n-p-n</i>	
Транзистор полевой с каналом <i>n</i> -типа	

26. Тиристорные контакторы с естественной коммутацией служат в качестве выключателей, а также регуляторов переменного напряжения с широтно-импульсным управлением. Тиристорные контакторы ТКЕО-250/380 используются для коммутации линий нагрузки, а ТКЕП-100/380 – для переключения нагрузки – см. Алиев И.И., Абрамов М.Б. Электрические аппараты. Справочник. – М.: Издательское предприятие РадиоСофт, 2007.

27. Использованы материалы издания: Клевцов А. В. Средства оптимизации потребления электроэнергии. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005.

28. В настоящее время термин «реле» используют также в названии некоторых аппаратов коммутации силовых цепей с токами свыше 10 А. Например, «твердотельные реле» (ТТР) относят к классу современных модульных полупроводниковых приборов, выполненных по гибридной технологии, содержащих в своем составе мощные силовые ключи на симисторных, тиристорных либо транзисторных структурах. Они используются для замены традиционных электромагнитных реле, контакторов и пускателей. В качестве примера: ТТР типа GDM – «однофазные твердотельные реле» в корпусе промышленного исполнения рассчитаны на коммутацию электрических цепей с токами до 500 А.

29. Компаратор – устройство сравнения контролируемой величины с эталоном и выдачи сигнала типа «больше» или «меньше», а в логической форме – либо 1, либо 0.

30. Команда – управляющий сигнал, инициирующий выполнение определенной операции в исполнительном устройстве (см. Першиков В.И., Савинков В.М. Толковый словарь по информатике. – М.: Финансы и статистика, 1991).

31. В определении понятия «выдержка времени» есть некоторая неопределенность. Она обнаруживается уже в п. 3.7.3 и п. 3.7.4, так как выдержка времени определяется или через увеличение *времени трогания* или через увеличение *времени движения* применительно к электромагнитному приводу аппарата. Для реле времени понятие «выдержка времени» имеет смысл *задержки* во времени передачи команды из одной электрической цепи в другую электрическую цепь. Причем, исполнением команды является коммутация электрической цепи. Поэтому для устранения отмеченной неопределенности удобно вместо слова *выдержка* применять слово *задержка*.

32. Система «Человек-машина» – эргатическая система, в которой один или несколько человек взаимодействуют с техническим устройством (см. Энциклопедия кибернетики. Том 2. – Киев.; Главная редакция Украинской Советской энциклопедии, 1974.

33. Сервопривод – силовой элемент исполнительного механизма системы автоматического регулирования, преобразующий энергию вспомогательного источника в механическую энергию перемещения (перестановки) регулирующего органа в соответствии с сигналом управления – см. Терминологический

сторных либо транзисторных структурах. Они с успехом используются для замены традиционных электромагнитных реле, контакторов и пускателей. Обеспечивают наиболее надежный метод коммутации цепей.

21. Интегральная схема (ИС) – функционально законченная полупроводниковая схема в герметичном корпусе, состоящая из активных элементов – полупроводниковых приборов, и пассивных элементов – резисторов, конденсаторов, индуктивностей. Элементы ИС и соединения между ними не имеют индивидуального конструктивного оформления. Они выполнены с применением специальных технологий. ИС является неразборным изделием и не подлежит ремонту – см. Опадчий Ю. Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000.

22. Операционный усилитель (ОУ) – унифицированный многокаскадный усилитель постоянного тока, удовлетворяющий следующим требованиям к электрическим параметрам:

- коэффициент усиления по напряжению стремится к бесконечности;
 - входное сопротивление стремится к бесконечности;
 - выходное сопротивление стремится к нулю;
 - если входное напряжение равно нулю, то выходное напряжение также равно нулю;
 - полоса пропускания частот стремится к бесконечности.
- см. Опадчий Ю. Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров; Под ред. О. П. Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000.

23. Булева алгебра (алгебра логики) – раздел математики, изучающий методы оперирования логическими (булевыми) переменными, принимающими только два значения – «истина» или «ложь». Предложен английским математиком Дж. Булем. Основные операции алгебры логики дизъюнкция (ИЛИ), конъюнкция (И), отрицание (НЕ) – см. Першиков В.И., Савинков В.М. Толковый словарь по информатике. – М.: Финансы и статистика, 1991.

24. См., например, Таев И.С. Электрические аппараты управления. Высшая школа, 1984.

25. Коммутатор – устройство для коммутации (установления связи) двух или более устройств (см. Першиков В.И., Савинков В.М. Толковый словарь по информатике. – М.: Финансы и статистика, 1991) В рассматриваемом приложении коммутатор обеспечивает электрическую связь между приемником электрической энергии (нагрузкой электрической цепи) и источником электрической энергии. С помощью коммутатора нагрузка подключается на питание от источника электрической энергии на некоторое продолжительное время, например, в сравнении с периодом переменного напряжения промышленной частоты.

Схема функциональная занимает промежуточное положение между структурной схемой и принципиальной схемой. Она разъясняет определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных частях устройства и в устройстве в целом. По сравнению со структурной схемой она подробнее раскрывает функции отдельных элементов устройства. Некоторые элементы на функциональной схеме могут быть изображены в виде прямоугольников, как на структурной схеме, другие – условными обозначениями в соответствии с ГОСТ, как на принципиальной схеме.

1.3.3. Пример схемы системы управления передачей энергии по электрической цепи

На рис. 1.6 а приведен пример функциональной электрической схемы устройства управления передачей энергии от источника электрической энергии (ИЭЭ) до приемника электрической энергии (ПЭЭ) с помощью электронного (тиристорного) ключа. ИЭЭ является источником напряжения переменного тока (см. п. 1.2.2).

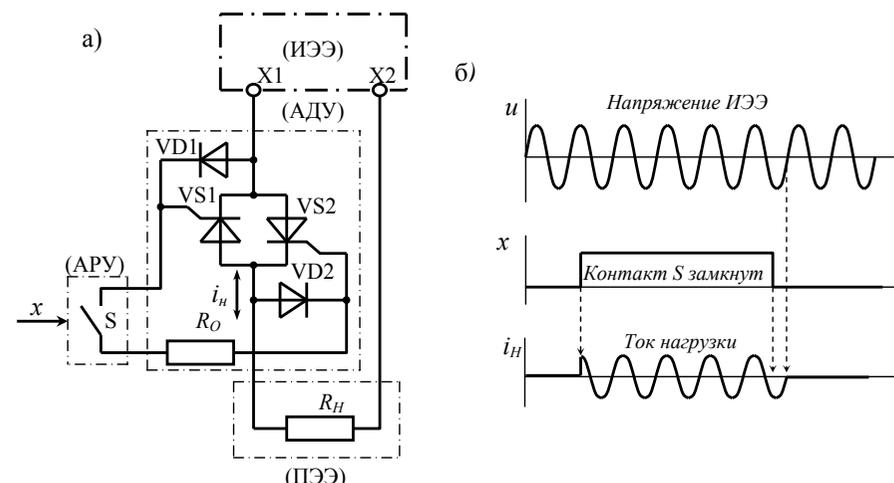


Рис. 1.6. Функциональная схема устройства управления передачей энергии (а) и диаграммы, поясняющие действие этого устройства во времени (б)

Управление передачей электрической энергии нагрузке R_H (ПЭЭ) на рис. 1.6 а осуществляется путем коммутации электрической цепи с помощью тиристоров VS1 и VS2. Тиристоры включены встречно-параллельно. Каждый из этих тиристоров пропускает по цепи нагрузки R_H источника ИЭЭ переменный ток $i_H = I_m \sin(\omega t)$ только в одном направлении и только тогда, когда тиристор «открыт». Чтобы тиристор открылся, необходимо замкнуть контакт S. При замкнутом S приемнику ПЭЭ от ИЭЭ передается в единицу времени энергия $P = I^2 R_H$, где I – действующее значение тока i_H (использованы общепринятые обозначения). Если контакт S разомкнут, то тиристоры сохраняют «закрытое» (непроводящее) состояние, $I=0$, и энергия приемнику ПЭЭ от ИЭЭ не передается. Временные диаграммы, поясняющие процесс управления передачей энергии, показаны на рис. 1.6 б (подробнее см. п. 5.4.2).

Электрическая схема на рис. 1.6 а отражает возможность дистанционного управления передачей энергии от ИЭЭ до ПЭЭ. Например, контакт, обозначенный буквой S, может принадлежать некоторому *аппарату ручного управления* (АРУ), находящегося на удалении от другого дистанционно управляемого аппарата (АДУ). При этом сигнал от АРУ до АДУ передается по электрическим связям – проводам, и АРУ принципиально может находиться на любом расстоянии от АДУ.

1.4. Аппараты ручного управления и дистанционно управляемые аппараты

1.4.1. Аппараты в системе дистанционного управления

Для того чтобы человек-оператор (ЧО) мог управлять передачей энергии по силовой электрической (ЭЦС) и по кинематической (КЦС) цепям, например, электропривода, находясь на удалении от этих цепей, применяется *система дистанционного управления* с одним или с несколькими электроаппаратами (рис. 1.7).

16. Необходимо отметить, что в различных источниках, в том числе и в учебной литературе, даются не одинаковые определения электрического контакта. Например, Л. А Родштейн [3] отмечает, что двойное значение слова *контакт* (как место соприкосновения контактных деталей, так и сами эти детали) «представляет некоторый недостаток терминологии, который, однако, широко укоренился. Различать о чем идет речь надо по смыслу». Например, понятие *коммутирующий контакт* раскрыто в [Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов/ Г. Н. Александров, В. В. Борисов, Г. С. Каплан и др.; Под ред. проф. Г. Н. Александрова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.] следующим предложением: «Коммутация тока в электрических цепях осуществляется электрическими коммутационными аппаратами посредством *контактных элементов – коммутирующих контактов*».

17. Привод электрического аппарата представляет собой систему взаимосвязанных устройств и механизмов, предназначенную для выполнения требуемых механических операций и их циклов, обеспечивающих работоспособность аппарата в условиях эксплуатации. В электрических аппаратах широко используются ручные, электромагнитные, электродвигательные, пружинные, пневматические и гидравлические (пневмогидравлические) приводы – см. Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов/ Г. Н. Александров, В. В. Борисов, Г. С. Каплан и др.; Под ред. проф. Г. Н. Александрова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.

18. Орган управления механического привода представляет собой входную часть привода (рукоятку, штурвал, педаль и др.) непосредственно воспринимающую мускульное усилие человека или воздействие от некоторого механизма. К органу управления человек прикладывает усилие, создаваемое сжатием и расширением мускулов. Кратковременные усилия, создаваемые мускулами рук, могут достигать четырехсот ньютон, мускулами спины и ног – тысяч ньютон. Органы ручного управления обычно проектируют с учетом критической чувствительности человека на различные величины усилий -см. Инженерная психология в авиации и космонавтике. Денисов Ю.Г., Онищенко В. Ф., М., «Машиностроение», 1972.

19. Электронное устройство – *электронное средство*, представляющее собой функционально законченную сборочную единицу, выполненную на несущей конструкции, реализующее функции (ю) передачи, приема и преобразования информации или техническую задачу на их основе. Электронное средство – изделие и его составные части (элементы), в основу функционирования которых положены принципы электроники. – см. Опадчий Ю. Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000.

20. Твердотельные реле и контакторы – это класс современных модульных полупроводниковых приборов, выполненных по гибридной технологии, содержащих в своем составе мощные силовые ключи на симисторных, тири-

9. *Изобразительная модель* – один из видов моделей, получивших распространение при проектировании технических устройств. Она является упрощенным геометрическим подобием оригинала – см. Воронов А. А. Исследование операций и управление. М. «Наука», 1970.

10. *Коммутация* представляется как установление связи – см. Першиков В.И., Савинков В.М. Толковый словарь по информатике. – М.: Финансы и статистика, 1991.

Коммутация электрической цепи характеризуется быстрым, скачкообразным изменением электрического сопротивления участка цепи, когда это сопротивление изменяется в предельном случае от бесконечности до нуля или в обратном направлении, чем устанавливается или нарушается электрическая связь между источником и приемником электрической энергии, т. е. возможность протекания электрического тока по цепи. Говорят также «коммутация тока».

11. См., например, Опадчий Ю. Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров; Под ред. О. П. Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000.

12. См., например, Основы автоматического управления. Под редакцией В.С. Пугачева.- М, Физматгиз, 1961.

13. Теория автоматического управления является составной частью науки «Техническая кибернетика». В ней содержатся методы анализа и синтеза систем автоматического управления с применением математических моделей.

14. Терминология, принятая в теории систем автоматического управления, стала распространяться в теории электрических аппаратов особенно с появлением электронных аппаратов. Например, в некоторых *тиристорных пускателях* в качестве составной части выделяют систему импульсно-фазового управления (СИФУ), для которой объектом управления являются тиристоры, также входящие в состав пускателя.

15. Измерительные преобразователи имеют неодинаковые определения в различных научных дисциплинах. В общем смысле измерительный преобразователь является устройством, которое «преобразует изменение одной в изменение другой» – см. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

В данном учебном пособии используются понятия и терминология по изданию: Семенов С. П., Горелейченко А. В., Богачев Э. Ю. Судовые электроизмерительные приборы и информационные системы. Учебник. – М.: Транспорт, 1982. По определению *измерительный преобразователь* – это средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

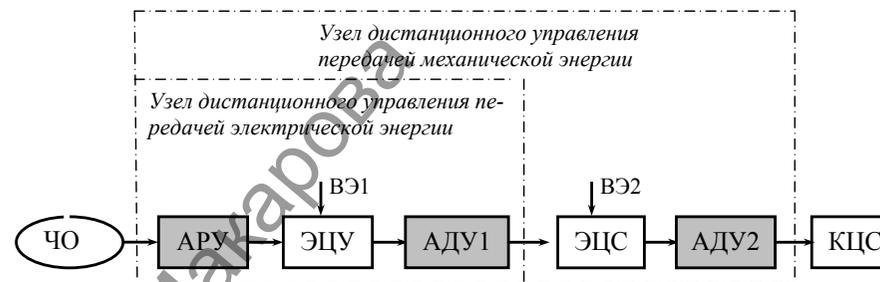


Рис. 1.7. Схема системы дистанционного управления передачей энергии

В состав простой системы дистанционного управления входит *аппарат ручного управления АРУ* и *дистанционно управляемые аппараты АДУ1, АДУ2*. На АРУ человек воздействует непосредственно, обычно мускульным усилием. Сигнал с АРУ в АДУ1 передается на расстоянии по слаботочной электрической цепи – цепи управления ЭЦУ. Энергия, необходимая для передачи сигнала по ЭЦУ, вводится в цепь от некоторого источника электрической энергии. Соответствующее воздействие на цепь источником энергии, не является управляющим воздействием и отмечено на рис. 1.7 как ввод энергии ВЭ1. Аппарат АДУ1 является приемником электрической энергии и информации из ЭЦУ. Реагируя на входной электрический сигнал, АДУ1 воздействует на силовую электрическую цепь ЭЦС, для которой аппарат АДУ2 является приемником электрической энергии и информации. Энергия передается воздействием ВЭ2 в цепь ЭЦС от источника электрической энергии силовой цепи. По входному воздействию из ЭЦС аппарат АДУ2 формирует на своем выходе механическое воздействие на кинематическую цепь КЦС.

1.4.2. Функциональные узлы с электроаппаратами

В системе дистанционного управления на рис. 1.7 выделены два узла с аппаратами, выполняющими в совокупности определенные функции. С помощью аппаратов АРУ, АДУ1 осуществляется дистанционное управление передачей электроэнергии по силовой электрической цепи. Узел, состоящий из аппа-

ратов АРУ, АДУ1, АДУ2, обеспечивает дистанционное управление передачей энергии по кинематической цепи.

Некоторые аппараты, например, АРУ и АДУ1 (см. рис. 1.7) могут быть скомпонованы в единое функциональное устройство. Такое устройство называют *комплектным аппаратом*. Например, в электроприводе применяют комплектный аппарат - *пускатель*. Он предназначен для пуска, остановки и в некоторых технических исполнениях также для реверсирования и защиты электродвигателя. Структурная схема простого (неревверсивного) пускателя показана сплошными линиями на рис. 1.8.

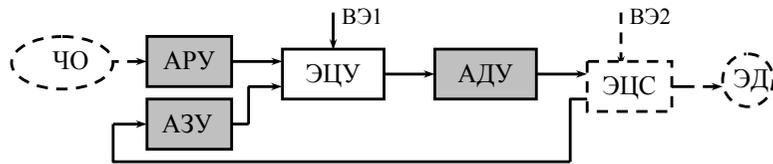


Рис. 1.8. Схема системы с аппаратами ручного управления, дистанционного управления и защиты (схема пускателя)

В составе пускателя кроме узла с аппаратами ручного (АРУ) и дистанционного (АДУ) управления обычно предусматривают аппарат (АЗУ), который выполняет функцию автоматической защиты электродвигателя (ЭД) привода от токов перегрузки, вызывающих повышенный нагрев двигателя. АЗУ (например, тепловое реле) по цепи ЭЦУ подает аппарату АДУ (контактору) сигнал на отключение питания двигателя ЭД при возникновении перегрузки.

1.5. Особенности управления передачей энергии по электрической цепи

1.5.1. Система управления передачей электрической энергии

Допустим, что в схеме на рис. 1.2 источником энергии ИЭ является источник электрической энергии, канал связи КС представляет собой электрическую цепь (ЭЦ), источник информации ИИ – это источник управляющего воздействия (ИУВ) на аппарат ЭА. Представим структурной схемой (рис. 1.9) си-

ССЫЛКИ

1. Управление можно представить как такую организацию того или иного процесса, которая обеспечивает достижение определенных целей – см., например, Основы автоматического управления. Под ред. В. С. Пугачева. – М., Физматгиз, 1961; Растринин Л. А. Современные принципы управления сложными объектами. – М., «Сов. Радио», 1980.

Управление есть такое использование причинно-следственных связей, при котором образуется поведение, приводящее к желаемому результату – см. Пospelов Г. С., Ириков В. А. Программно-целевое планирование и управление. – М., «Сов. Радио», 1976.

2. Энергию представим как способность совершать работу.

3. Информация есть одна из форм проявления зависимости между разными явлениями. Можно представить, что информация – это как бы «след», оставляемый одним явлением на другом. Благодаря этому следу можно по результатам наблюдения одного явления определить некоторые черты другого явления (см. Основы автоматического управления. Под редакцией В.С. Пугачева. – М., Физматгиз, 1961).

4. Сигнал – процесс, несущий сообщение (информацию) о каком-либо событии, явлении, состоянии объекта наблюдения либо передающий команды управления, указания, оповещения и т.д. для передачи по каналу – см. Терминологический словарь по автоматике, информатике и вычислительной технике/ В. В. Зотов, Ю. Н. Маслов, А. Е. Пядочкин и др. – М.: Высш. шк., 1989.

5. Канал связи – физическая среда, аппаратные средства и, возможно, программы, осуществляющие передачу информации от отправителя к получателю – см. Першиков В.И., Савинков В.М. Толковый словарь по информатике. – М.: Финансы и статистика, 1991.

6. Характеризуя структуру системы с электроаппаратом, мы будем отделять от электрической цепи источник электрической энергии (ИЭ) и приемник энергии (ПЭ), представляя электрическую цепь каналом связи между ИЭ и ПЭ.

7. Модулятор – устройство, осуществляющее изменение параметров некоторого физического процесса (переносчика информации) в соответствии с текущими значениями передаваемого сигнала (модулирующего сигнала) – см. Терминологический словарь по автоматике, информатике и вычислительной технике/ В. В. Зотов, Ю. Н. Маслов, А. Е. Пядочкин и др. – М.: Высш. шк., 1989

8. Усилитель – устройство, воспроизводящее сигнал и усиливающее его по амплитуде и мощности за счет энергии вспомогательного источника питания (источника энергии ИЭ) – см. Терминологический словарь по автоматике, информатике и вычислительной технике/ В. В. Зотов, Ю. Н. Маслов, А. Е. Пядочкин и др. – М.: Высш. шк., 1989

Вращающий момент, переданный таким образом от якоря на индуктор, является асинхронным моментом, т.е. в муфте существует скольжение. Следовательно, частота вращения ω_2 ведомого вала всегда меньше частоты вращения ω_1 ведущего вала, так как только при этом условии в якоре индуцируются вихревые токи.

10.5.2. Особенности асинхронных муфт

Свойства электромагнитной асинхронной муфты определяются ее механической характеристикой (рис. 10.4б). Зависимость частоты вращения ω_2 ведомого вала от момента нагрузки M_H у муфты более значительна, чем у асинхронного двигателя. Механическая характеристика мягкая. Частоту вращения ведомого вала можно изменять, варьируя силой тока I_B в обмотке возбуждения.

Достоинства асинхронной муфты: плавность передачи вращающего момента на ведомый вал; простота конструкции; возможность плавного регулирования частоты вращения; отсутствие фрикционных элементов, подверженных механическому износу.

Недостатки: низкий КПД из-за значительных потерь на вихревые токи; невысокие массогабаритные показатели.

В некоторых конструкциях асинхронных муфт для повышения КПД предусматривают короткозамкнутую обмотку на якоре, и сердечники индуктора и якоря выполняют шихтованными.

стему управления передачей электрической энергии с помощью электроаппарата ЭА.

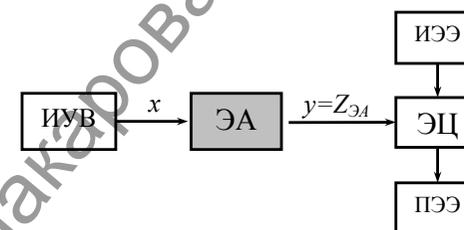


Рис. 1.9. Структурная схема простой системы управления передачей электрической энергии

ЭА преобразует входной сигнал x , поступающий от источника управляющего воздействия ИУВ, например, от человека, в выходное воздействие y на электрическую цепь ЭЦ, по которой передается электрическая энергия от источника ИЭ до приемника ПЭ. Аппарат ЭА изменяет своим *исполнительным устройством*, например, коммутирующим контактом (см. п. 1.3.1) электрическое сопротивление $Z_{ЭА}$ в цепи ЭЦ. Поэтому положим $y=Z_{ЭА}$.

1.5.2. Схемы подключения электроаппарата к электрической цепи

Исполнительное устройство ЭА может быть подключено к электрической цепи по одной из схем, показанных на рис. 1.10. Аппарат ЭА на схемах условно выделен штрихпунктирной линией. Приемник (ПЭЭ) электрической цепи ЭЦ является *нагрузкой*, которая характеризуется сопротивлением Z_H .

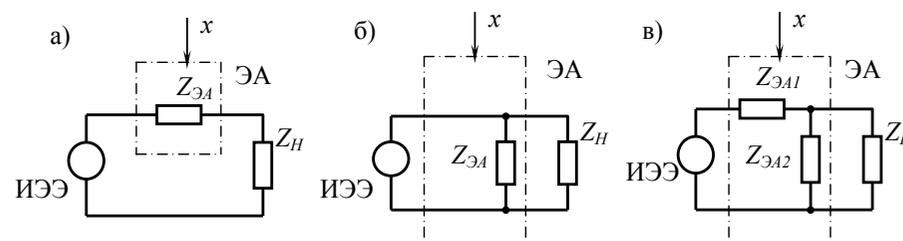


Рис. 1.10. Функциональные схемы подключения аппарата ЭА к электрической цепи при управлении передачей электроэнергии от источника ИЭ до приемника ПЭ

Схему, показанную на рис. 1.10 а, называют *последовательной схемой*¹¹. Схемы на рис. 1.10 б и на рис. 1.10 в – соответственно *параллельная схема* и *смешанная схема*.

Для управления передачей энергии от источника напряжения (см. п. 1.2.2) постоянного или переменного тока обычно применяется последовательная схема, а от источника тока – параллельная схема. Во всех схемах аппаратом изменяется сопротивление $Z_{ЭА}$ в электрической цепи. Универсальной в применении является схема, показанная на рис. 1.5 в (смешанная схема), в которой ЭА изменяет величины сопротивлений $Z_{ЭА1}$ и $Z_{ЭА2}$. Наибольшее распространение на практике получила схема рис. 1.10а с источником напряжения.

1.5.3. Оценка потерь электрической энергии

Оценим потери энергии в электрической цепи для схемы на рис. 1.10а, рассмотрев идеализированный случай, когда $Z_{ЭА} = R \geq 0$, $Z_H = R_H > 0$ - активные сопротивления и ИЭЭ – источник напряжения U . Допустим, что номинальная мощность приемника энергии определена величиной

$$P_{ном} = \frac{U^2}{R_H}.$$

Приемнику ПЭ в единицу времени передается энергия P_H , величина которой зависит от сопротивления R , создаваемого в электрической цепи аппаратом. Потери энергии $\Delta P = P_{ном} - P_H$ в единицу времени, возникающие на R в результате преобразования электрической энергии в тепловую энергию, составят:

$$\Delta P = \left(\frac{U}{R_H + R} \right)^2 R = P_{ном} (1 - \sqrt{\kappa_P})^2 \kappa_P,$$

где κ_P – коэффициент передачи энергии (мощности)

$$\kappa_P = \frac{P_H}{P_{ном}} = \left(\frac{R_H}{R_H + R} \right)^2, \quad 0 \leq \kappa_P \leq 1.$$

Потери энергии в относительных единицах:

ют момент трения в полтора раза больший, чем фрикционные муфты. Повышенное быстродействие является основным достоинством порошковой муфты.

Недостатками являются: сложность конструкции; необходимость защиты подшипников от попадания в них порошка; необходимость периодической замены ферромагнитного наполнителя из-за постепенного его «старения» и утраты ферромагнитных свойств.

Промышленность выпускает порошковые муфты серии БПМ.

10.5. Электромагнитные асинхронные муфты

10.5.1. Составные части и принцип действия асинхронной муфты

Электромагнитные асинхронные муфты называют также муфтами скольжения. Свойства асинхронной муфты схожи со свойствами асинхронного двигателя.

Асинхронная муфта состоит (рис. 10.4а) из якоря 2, закрепленного на ведущем валу 1 и индуктора 4 с катушкой возбуждения 3. Индуктор закреплен на ведомом валу 6. Катушка питается от источника постоянного тока через контактные кольца и щетки 5.

Якорь 2 вращается в магнитном поле, созданном обмоткой катушки 3 индуктора 4. В якоре индуцируются вихревые токи. Они взаимодействуют с полем индуктора в результате чего создается вращающий момент, направленный в сторону вращения якоря. Под действием этого момента индуктор приходит во вращение.

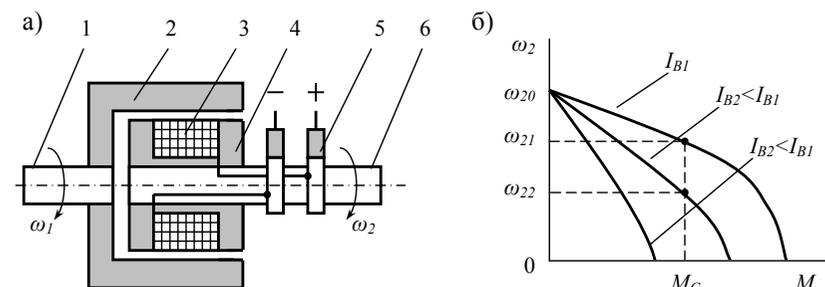


Рис. 10.4. Изобразительная модель асинхронной муфты (а) и ее механические характеристики (б)

10.4. Электромагнитные порошковые муфты

10.4.1. Особенности конструкции и принципа действия

Принцип действия электромагнитной порошковой муфты основан на свойстве жидкой или порошкообразной ферромагнитной массы (наполнителя муфты) увеличивать свою вязкость и прилипать к поверхности намагниченных элементов конструкции муфты под действием магнитного поля. Такие муфты выполняют двух типов: дисковые и цилиндрические.

Ферромагнитный наполнитель с жидкой основой представляет собой частицы карбонильного железа диаметром $10^{-2} \dots 10^{-4}$ мм, взвешенные в масле или в другой химически малоактивной жидкости. Ферромагнитная масса с твердой основой – это смесь порошкообразного железа с порошком графита или талька.

По существу порошковая муфта является фрикционной. Но в отличие от рассмотренной в п. 10.4 муфты передача вращающего момента от ведущей части муфты ведомой части (например, от ведущего диска ведомому диску) в порошковой муфте происходит не за счет трения сжимаемых поверхностей, а за счет повышения вязкости ферромагнитного наполнителя муфты. Когда катушка, по обмотке которой протекает ток, создает магнитное поле, частицы железа, располагаясь по силовым линиям поля, образуют цепочки. Наполнитель как бы загустевает, связывая в единое целое ведущий и ведомый подвижные элементы муфты. В результате возникает момент трения, величина которого зависит от напряженности магнитного поля.

10.4.2. Достоинства и недостатки порошковых муфт

Порошковую муфту можно применять как релейное или как линейное исполнительное устройство. В последнем случае возможность плавного (по линейному закону) управления передачей механической энергии основана на пропорциональной зависимости момента трения муфты от управляющего тока в обмотке намагничивающей катушки.

Порошковые муфты экономичнее фрикционных муфт, имеют меньшие габариты. Например, при одинаковом токе управления порошковые муфты созда-

$$\frac{\Delta P}{P_{ном}} = (1 - \sqrt{\kappa_p})\sqrt{\kappa_p}.$$

График зависимости $\Delta P/P_{ном}$ от κ_p показан на рис. 1.11.

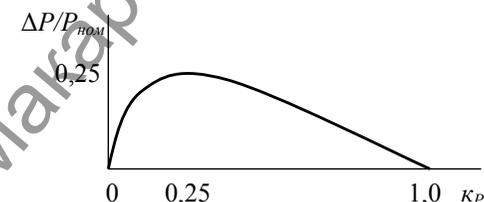


Рис. 1.11. График зависимости потерь энергии от коэффициента передачи κ_p

Из графика видно, что максимальные потери энергии возникают, когда $\kappa_p=0,25$ (когда $R=R_H$). В этом случае в единицу времени теряется энергия, равная четвертой части от номинальной мощности электроприемника. Потери энергии равны нулю, когда $\kappa_p=0$ или $\kappa_p=1$. Поэтому, если при управлении передачей энергии с помощью аппарата попеременно вносить в цепь сопротивление $R=\infty$ (при этом $\kappa_p=0$) и $R=0$ (при этом $\kappa_p=1$), осуществляя коммутацию электрической цепи и передачу энергии импульсами, то потери энергии будут приближены к нулю. На практике подобное управление передачей электрической энергии осуществляется с помощью коммутирующих контактов и электронных ключей (см. п. 4.6). Управление с большой частотой следования импульсов реализуется только с помощью электронных (тиристорных и транзисторных) ключей.

1.5.4. Передача электрической энергии импульсами

На рис. 1.12 приведены диаграммы (идеализированный пример), характеризующие изменение во времени t падения напряжения u на нагрузке R_H при передаче электрической энергии импульсами по цепи от источника напряжения U постоянного тока (рис. 1.12 а) и по цепи от источника напряжения $u(t)=U_m \sin \omega t$ переменного тока частотой ω (рис. 1.12 б).

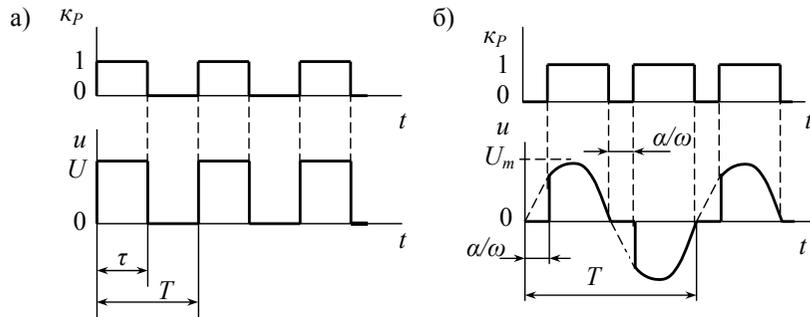


Рис. 1.12. Временные диаграммы напряжения на нагрузке постоянного тока (а) и переменного тока (б) при передаче энергии импульсами

При достаточно большой частоте следования импульсов передачу энергии характеризуют осредненными по времени на периоде T значениями коэффициента передачи энергии. Для примеров диаграмм на рис. 1.12 а и рис. 1.12 б осредненные по времени значения коэффициента передачи энергии равны соответственно:

$$\bar{k}_{P(a)} = \frac{\tau^2}{T^2} \quad (0 \leq \tau < T), \quad \bar{k}_{P(b)} = \left[1 - \frac{1}{\pi}(2\alpha - \sin 2\alpha)\right]^2 \quad (0 \leq \alpha < \pi),$$

где τ – длительность импульса, α – угол управления электронным ключом (измеряемый в радианах). Управление передачей энергии в этих случаях осуществляется путем изменения длительности τ импульсов и угла α управления электронным ключом.

1.6. Преобразование входных воздействий аппаратами

1.6.1. Оператор преобразования функций времени (процессов)

Входное воздействие x и выходное воздействие y электроаппарата характеризуют физическими величинами (электрическим сопротивлением, электрическим напряжением, силой, скоростью и др.), которые в динамических режимах работы ЭА изменяются во времени t . При математическом описании их называют *переменными*. Они представляются в виде функций времени $x(t)$, $y(t)$. Тогда преобразование аппаратом входного воздействия в выходное воздей-

Потери в муфте за счет скольжения

$$P_{\Pi} = P_{Д} - P_{Н} = M_{Д}\omega_1 - M_{Н}\omega_2.$$

Такая мощность расходуется на нагрев муфты в переходном режиме ее включения и наряду с потерями мощности в обмотке электромагнита определяет температуру нагрева муфты.

В установившемся режиме $M_{Д} = M_{Н}$, $\omega_2 = \omega_1$ и $P_{\Pi} = 0$.

Временем включения муфты называют промежуток времени от момента подачи напряжения на катушку электромагнита до достижения вращающим моментом значения $M_{М} = 0,9M_{Н}$ (величина $M_{Н}$ здесь принимается для установившегося режима). Время включения муфты составляет обычно от 0,07 до 0,3 с.

10.3.3. Особенности отключения муфты

При отключении катушки электромагнита от питания сила тяги пропадает, и трение между кольцами перестает действовать. Вращающий момент ведомому валу не передается. Запаздывание определяется временем трогания ($\tau_{тр2}$) при отключении (см. п. 3.4.2). В переходном режиме скорость вращения ω_2 определяется решением дифференциального уравнения (10.2) при $M_{М} = 0$.

Время отключения муфты представляет собой промежуток времени от обесточивания электромагнита до спада вращающего момента до 0,05 номинального значения. Это время составляет от 0,1 до 0,4 с.

Электромагниты муфт выполняют для постоянного тока, что упрощает технологию изготовления и уменьшает габаритные размеры муфты. Электромагниты имеют большую постоянную времени. При отключении муфты на контактах коммутирующего аппарата возникает электрическая дуга, которая замедляет процесс отключения и вызывает износ контактов. Для облегчения процесса отключения обмотка катушки электромагнита шунтируется разрядным резистором.

вращающий момент в зависимости от габарита и модификации муфты составляет от 16 до 1000 Нм.

10.3.2. Особенности включения муфты в работу

При включении муфты различают три этапа.

Первый этап – от момента приложения напряжения к катушке до момента соприкосновения фрикционных колец 3 и 4 (рис. 10.3). Продолжительность первого этапа составляет суммарное время трогания и движения ($\tau_{мп1} + \tau_{дел}$).

Второй этап – с момента соприкосновения фрикционных колец до окончания их проскальзывания относительно друг друга. При соприкосновении фрикционных колец возникает момент трения

$$M_T = M_M = f R_K F_K,$$

где F_K – сила нажатия фрикционного диска, обусловленная силой тяги электромагнита, R_K – средний радиус фрикционного кольца, f – коэффициент трения.

Когда момент трения M_T превысит момент нагрузки M_H , приложенный к ведомому валу, вращение будет передаваться от ведущего вала ведомому валу (и шестерне 9 на рис. 10.3). Движение ведущего вала и ведомого вала в переходном режиме $\omega_2 \rightarrow \omega_1$ описывается дифференциальными уравнениями (10.1), (10.2). Скорость скольжения ведущего фрикционного кольца относительно ведомого кольца $\omega_c = \omega_1 - \omega_2$ определяется по решению системы дифференциальных уравнений (10.1), (10.2).

Третий этап – с момента начала вращения фрикционных колец без проскальзывания до перехода к скорости ω_2 , равной 0,9 скорости установившегося движения, когда $\omega_2 = \omega_1$.

Сумма продолжительностей всех трех этапов определяет время разгона ведомого вала.

Мощность, отдаваемая двигателем при включении муфты

$$P_D = M_D \omega_1,$$

мощность, отдаваемая в нагрузку,

$$P_H = M_H \omega_2.$$

стве $x(t) \rightarrow y(t)$ можно охарактеризовать математически с помощью оператора G_i :

$$y(t) = G_i[x(t)].$$

Оператор G_i представляет собой совокупность математических действий: сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и др. Оператор G_i является математической моделью аппарата. С помощью оператора G_i можно математически описывать работу ЭА в динамике. Примером служит оператор дифференцирования d/dt , который определяет зависимость $y(t)$ от $x(t)$ в виде $y(t) = dx(t)/dt$. Это математическое выражение означает, что выходное воздействие $y(t)$ по величине равно скорости изменения входного воздействия $x(t)$ в каждый момент времени t . На рис. 1.13 показано представление переменных x и y в виде графиков их зависимости от времени t .

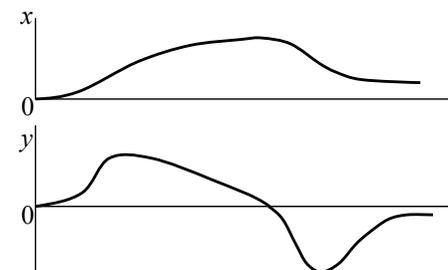


Рис. 1.13. Пример графического представления во времени t входной переменной x и выходной переменной y

1.6.2. Представление аппарата линейным или нелинейным элементом системы

По характеру преобразования входного сигнала в выходное воздействие аппарат может рассматриваться как *линейный* или как *нелинейный* элемент системы. Аппарат, характеризуемый оператором G_i , относится к линейным элементам системы, если для него выполняется принцип суперпозиции¹²

$$y(t) = G_i [c_1 x_1(t) + c_2 x_2(t)] = c_1 G_i [x_1(t)] + c_2 G_i [x_2(t)]$$

для любых функций $x_1(t)$, $x_2(t)$ и действительных чисел c_1 , c_2 . Нетрудно проверить, что электроаппарат, для которого преобразование $x(t) \rightarrow y(t)$ определено оператором дифференцирования d/dt является линейным элементом системы. К линейным элементам относятся также аппараты, для которых

$$y(t) = ax(t),$$

где a – постоянная величина.

Аппарат относится к нелинейным элементам системы, если принцип суперпозиции для его оператора G_t не выполняется.

Реальные электроаппараты, строго говоря, в большинстве случаев нелинейные, и лишь в известных пределах их можно считать линейными элементами системы. Так, например, закон Ома определяет линейную зависимость падения напряжения U на сопротивлении R от силы тока I :

$$U = RI.$$

Однако в действительности сопротивление проводника зависит от его температуры, которая в свою очередь зависит от протекающего по проводнику тока. Вследствие этого зависимость падения напряжения от тока получается значительно более сложной и не линейной. Такого типа нелинейности называют *слабыми* (или *гладкими*) *нелинейностями*. Они при малом диапазоне изменения входного сигнала могут быть заменены линейными зависимостями.

Большое количество аппаратов имеют *существенно нелинейные* характеристики. К таким аппаратам относятся реле, контакторы, командоаппараты, автоматические выключатели, а также те аппараты, которые были представлены в качестве примеров на рис. 1.4 и рис. 1.6. В рабочих режимах эти аппараты, производя коммутацию электрических цепей с помощью коммутирующих контактов или электронных ключей, скачкообразно изменяют коэффициент передачи энергии k_p практически от 0 до 1 и в обратную сторону от 1 до 0 (см. п. 1.5.3 и п. 1.5.4). У некоторых из них (например, у электромагнитных реле) выходная переменная y и величина k_p зависят не только от значения входной переменной x , но и от направления ее изменения, т. е. от знака скорости dx/dt . В табл. 1.2

В зависимости от конструкции муфты катушка 6 электромагнита может быть размещена на ведущей полумуфте, либо отдельно и неподвижно. В первом случае питание на катушку подается через щетки и кольца, образующие скользящие электрические контакты. Такие муфты называют *контактными* электромагнитными муфтами. Во втором случае скользящие электрические контакты отсутствуют. Эти муфты называют *бесконтактными* электромагнитными муфтами.

Большинство муфт имеют несколько ведущих и ведомых дисков.

При подаче питания на катушку 6 электромагнита возникнет сила тяги, действующая на якорь 7. Под действием силы тяги якорь переместится влево вместе с ведомым валом (и шестерней 8). Фрикционное кольцо 4 ведомого диска 5 прижмется к фрикционному кольцу 3 ведущего диска 2. Этот диск и ведущий вал 1, на котором диск закреплен, не имеют возможность смещаться в осевом направлении.

Момент M_M , создаваемый муфтой, проявляет себя как движущий момент для ведомого вала и как тормозной момент для ведущего вала. Поэтому, если ведущий вал вращается с угловой скоростью ω_1 и ведомый вал вращается со скоростью ω_2 при действующем моменте M_H нагрузки, то эти скорости в динамике удовлетворяют дифференциальным уравнениям

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_D - M_M, \quad (10.1)$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_M - M_H, \quad (10.2)$$

где M_D – движущий момент, создаваемый электродвигателем; J_1 , J_2 – моменты инерции ведущей и ведомой частей.

Промышленность выпускает электромагнитные фрикционные муфты серий ЭТМ, Э11М десяти габаритов в нескольких конструктивных модификациях с контактными токоподводами и с бесконтактными токоподводами. Муфты рассчитаны на включение в сеть постоянного тока напряжением 24 В. Номинальный

Тормозные электромагниты переменного тока имеют пологие тяговые характеристики по сравнению с электромагнитами постоянного тока. Они имеют меньшее время втягивания и время отпадания, меньшую износоустойчивость, допускают меньшее количество включений в час. У них значительные пусковые токи. Например, трехфазные электромагниты серии КТМ, рассчитанные на напряжение 220/380 В, допускают до 20 включений в час при длительном режиме работы и до 500 включений в час при повторно-кратковременном режиме с ПВ=40%. В зависимости от типа электромагнита ход его якоря варьируется от 50 до 80 мм, тяговое усилие от 340 до 1380 Н. Кратность пускового тока по отношению к номинальному току составляет 10...30.

10.3. Электромагнитные фрикционные муфты

10.3.1. Составные части и принцип действия электромагнитной фрикционной муфты

Передача вращающего момента M_M с ведущего вала на ведомый вал с помощью фрикционной муфты происходит за счет сил трения между контактирующими поверхностями фрикционных дисков (рис. 10.3).

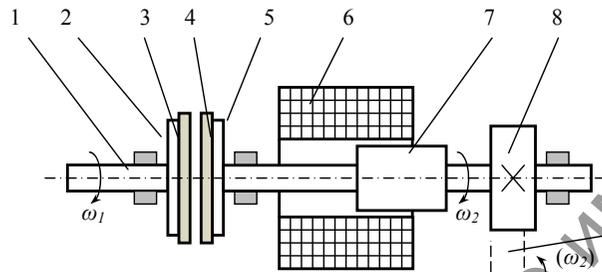


Рис. 10.3. Изобразительная модель электромагнитной фрикционной муфты

Один диск (2) расположен на ведущей полумуфте (ведущий вал 1), другой диск (5) – на ведомой полумуфте (ведомый вал). В переходных режимах скорости вращения $\omega_2 \neq \omega_1$.

приведены некоторые типовые нелинейности, с помощью которых моделируют реакцию аппарата на входное управляющее воздействие x при коммутации электрической цепи. Аппарат с любой нелинейной характеристикой как в табл. 1.2 называют *аппаратом прерывистого управления* [10].

1.6.3. Характеристика управления и внешняя характеристика аппарата

Характеристикой управления аппарата $y=f(x)$ называют функциональную зависимость выходной переменной y от входного *управляющего воздействия* x на ЭА для установившегося режима работы аппарата.

Внешней характеристикой называют функциональную зависимость $y=\varphi(s)$ выходной переменной y от внешнего *возмущающего воздействия* s аппарата для установившегося режима работы аппарата.

Можно рассматривать выходную переменную y как функцию $y=\psi(x, s)$ от двух входных переменных x и s . Тогда представим $f(x)=\psi(x, s=\text{const})$ и $\varphi(s)=\psi(x=\text{const}, s)$. Совокупность функций $\psi(x, s=\text{const})$ при нескольких фиксированных значениях s определяет *семейство характеристик управления* и совокупность функций $\psi(x=\text{const}, s)$ при нескольких фиксированных значениях x – *семейство внешних характеристик*.

Характеристики управления и внешние характеристики часто представляют в виде графиков.

На рис. 1.13 в качестве примера показаны в упрощенном виде семейства характеристик управления и внешних характеристик кнопки управления, изображенной на рис. 1.4. Сохранены принятые для кнопки в п. 1.3 обозначения переменных: $x=F$ – мускульное усилие, прикладываемое к кнопке (входное управляющее воздействие), F_{II} – сила противодействия со стороны возвратной пружины, $y=R_K$ – сопротивление коммутирующего контакта кнопки (выходная переменная). Через θ обозначена температура окружающей среды, которая принята за возмущающее воздействие.

Таблица 1.2

Типовые существенные нелинейности электроаппаратов

№	Вид нелинейности	$\kappa_p = f(x)$
1		$\kappa_p = 0$ при $x < 0$; $\kappa_p = 1$ при $x > 0$
2		$\kappa_p = 0$ при $ x < A$ $\kappa_p = 1$ при $ x > A$
3		$\kappa_p = 0$ при $-A < x < B$ } $dx/dt > 0$ $\kappa_p = 1$ при $x < -A, x > B$ } $\kappa_p = 0$ при $-B < x < A$ } $dx/dt < 0$ $\kappa_p = 1$ при $x < -B, x > A$ }
4		$\kappa_p = 0$ при $x < B$ } $dx/dt > 0$ $\kappa_p = 1$ при $x > B$ } $\kappa_p = 0$ при $x < A$ } $dx/dt < 0$ $\kappa_p = 1$ при $x > A$ }
5		$\kappa_p = 0$ при $x < A$ } $dx/dt > 0$ $\kappa_p = 1$ при $x > A$ } $\kappa_p = 0$ при $x < -A$ } $dx/dt < 0$ $\kappa_p = 1$ при $x > -A$ }

10.2.3. Электромагниты тормозных устройств

Все тормозные электромагниты представляют собой неполяризованные электромагнитные системы. Их классифицируют:

- по роду тока – электромагниты постоянного и электромагниты переменного (однофазного и трехфазного) тока;
- по конструкции – длинноходовые и короткоходовые ;
- по схеме включения намагничивающей катушки – параллельного и последовательного возбуждения;
- по исполнению защиты от воздействия окружающей среды – защищенные, водозащищенные, взрывобезопасные.

Катушки тормозных электромагнитов постоянного тока могут включаться на полное напряжение главной цепи двигателя или последовательно с обмоткой якоря двигателя, если они выполнены соответственно как катушки напряжения или как токовые катушки. Номинальный ток катушки обычно задается для трех режимов работы при продолжительности включения ПВ равной 15, 25 и 40% . Если действительная величина ПВ_д превышает 40% , тогда ток катушки ограничивают до величины

$$I_d = \sqrt{\frac{40}{ПВ_d}} \cdot I_{40} ,$$

где I_{40} – ток при ПВ=40%.

Катушки электромагнитов переменного тока включаются в сеть только параллельно на полное напряжение сети.

Собственное время втягивания тормозных электромагнитов постоянного тока составляет в зависимости от типа магнита от 0,1 до 3 с. Время отпадания от 0,1 до 1 с. Эти электромагниты имеют крутую тяговую характеристику и отличаются друг от друга создаваемой силой тяги. Например, короткоходовой электромагнит серии МП, рассчитанный на напряжение 110 и 220 В, создает тяговое усилие 1920 Н при ходе якоря 4,5 мм. Длинноходовой электромагнит серии ВМ, рассчитанный на такие же напряжения, обеспечивает тяговое усилие 570 Н при ходе якоря 120 мм.

При включении контактора КМ его контакты замыкаются, и трехфазное напряжение U подается на статорную обмотку электродвигателя М. Одновременно получает питание электромагнит Y тормоза. Вал двигателя растормаживается и приходит во вращение. Освобождения вала колодками происходит за время, равное времени трогания τ_{mp1} якоря электромагнита (см. п. 3.4.2). На интервале времени τ_{oe1} движения якоря тормозной момент уже равен нулю ($M_T=0$).

Выключают тормоз обычно одновременно с отключением двигателя электропривода. На интервалах времени τ_{mp2} трогания и времени τ_{oe2} движения якоря имеем $M_T=0$. Далее характер изменения тормозного момента M_T будет зависеть от ряда факторов, в том числе от схемы подключения обмотки электромагнита, рода тока, момента времени отключения и др. Например, тормозной момент может возрастать по экспоненциальной зависимости, практически достигнув значения M_{T0} за время, равное трем-четырем постоянным времени электромагнита при оттянутом якоре.

Режим торможения описывают уравнением

$$J \frac{d\omega}{dt} = -(M_T + M_H),$$

где ω – частота вращения вала; J – приведенный момент инерции подвижных частей механической связи; M_H – момент, создаваемый нагрузкой (приемником механической энергии).

Обычно полагают, что величина $\tau_{s2} = \tau_{mp2} + \tau_{oe2}$ определяет время запаздывания при отключении тормоза, и считают M_T , M_H постоянными величинами. Тогда частота вращения вала при торможении будет уменьшаться по линейному закону во времени до тех пор, пока вал не остановится. После остановки вал останется в неподвижном состоянии, если тормоз способен создавать момент M_T , достаточный по величине, чтобы выполнялось равенство

$$M_T = -M_H.$$

Обычно тормоз выбирают из условия $M_T \geq 2M_{Hmax}$, где M_{Hmax} – максимальное значение момента силы, создаваемого нагрузкой электропривода

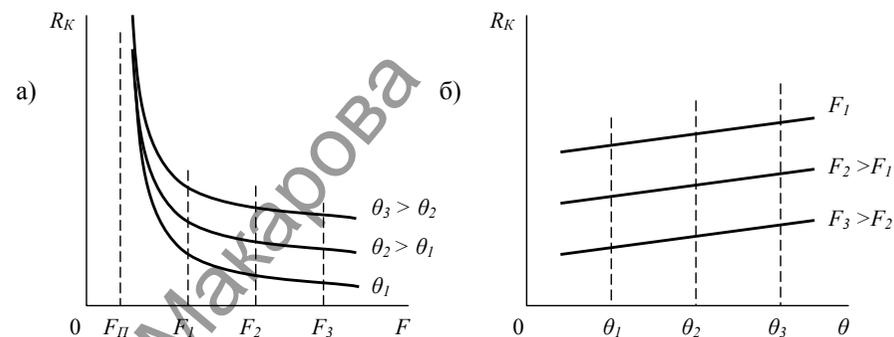


Рис. 1.13. Семейства характеристик управления (а) и внешних характеристик (б) кнопки управления

У кнопки управления нелинейная характеристика управления и линейная внешняя характеристика. Из графиков характеристик управления и внешних характеристик аппарата для каждого входных воздействий (например, F_1 , F_2 , F_3 и θ_1 , θ_2 , θ_3) могут быть определены соответствующие им значения R_K .

1.6.4. Характеристика управления с логическими переменными

Для описания работы некоторых аппаратов (обычно аппаратов прерывистого управления) при определенных условиях могут быть использованы логические выражения. В формализованном виде они определяют оператор G , аппарата через совокупность логических операций, выполняемых с логическими переменными по определенным правилам. Процесс описываемый логическими переменными представляется в виде последовательной смены тактов (интервалов времени), на каждом из которых логические переменные сохраняют постоянные значения.

Логическая переменная может принимать одно из двух значений – либо 0, либо 1. Например, для рассмотренной выше кнопки управления (см. п. 1.3.1) входная логическая переменная X может быть определена высказыванием

$$X = \langle \text{к кнопке приложено усилие } F \rangle.$$

Тогда, если усилие F действительно приложено к кнопке, то $X=1$. Если же усилие F не приложено, то $X=0$. Уточняя, можно принять, например, следующие условия (см. рис. 1.13 а):

$$X=1 \text{ при } F_2 \leq F \leq F_3,$$

$$X=0 \text{ при } 0 \leq F \leq F_{II}.$$

Выходная логическая переменная задается высказыванием

$$Y = \langle \text{контакт замкнут} \rangle.$$

Можно также принять, что (см. п. 1.5.3)

$$Y=1 \text{ при } \kappa_p=1,$$

$$Y=0 \text{ при } \kappa_p=0.$$

Характеристика управления в этом случае описывается простейшим логическим выражением

$$Y=X,$$

из которого, в частности, следует, что при $X=0$ имеем $Y=0$, т. е. контакт не замкнут ($\kappa_p=0$), иначе говоря, разомкнут. При $X=1$ соответственно $Y=1$ ($\kappa_p=1$) – контакт замкнут.

1.6.5. Аппараты без памяти

На примере кнопки управления, показанной на рис. 1.4, представим, что управляющее воздействие $x=F$ (например, $F=F_2$ – см. п. 1.6.3, п. 1.6.4), поступившее на вход аппарата в некоторый момент времени t_0 , действует в течение некоторого конечного промежутка времени τ . Затем $x=0$ в течение некоторого времени. Затем снова $x=F$ и т.д. Тогда входной и выходной сигналы аппарата, выраженные с помощью логических переменных X и Y , можно представить в виде импульсов на временных диаграммах (рис. 1.14). Каждому импульсу и отсутствию импульса соответствует определенный такт работы аппарата. Эти такты можно последовательно пронумеровать, и тогда процесс на входе и процесс на выходе аппарата можно рассматривать на последовательности натуральных чисел – номеров тактов вместо непрерывного времени.

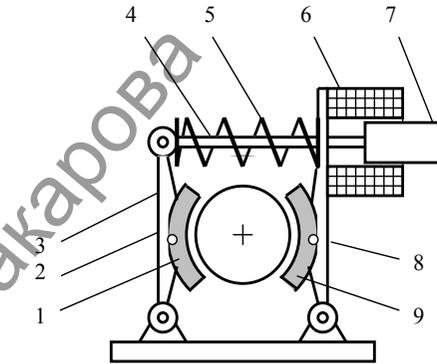


Рис. 10.1. Изобразительная модель колодочного электромагнитного тормоза

Если на катушку 6 электромагнита подать питание, то под действием возникшей электромагнитной силы тяги якорь 7 втянется в катушку 6, переместившись влево, и стойки 3, 8 раздвинутся. Колодки 1, 9 отойдут от вала, дав возможность валу вращаться. При этом возвратная пружина 5, предварительно растянутая для обеспечения необходимого тормозного момента M_{T0} , получит дополнительное растяжение.

10.2.2. Совместная работа тормоза и электродвигателя

Тормоз включают одновременно с включением двигателя электропривода. На рис. 10.2 приведена электрическая схема, поясняющая совместную работу электродвигателя M и электромагнитного тормоза с электромагнитом Y .

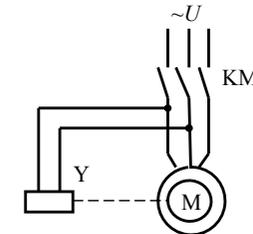


Рис. 10.2. Электрическая схема узла электропривода с электромагнитным тормозом

ционных частей вследствие их проскальзывания (пробуксовки). Поэтому фрикционные муфты используют в кратковременных режимах включения и отключения. Они позволяют повысить быстродействие электропривода за счет снижения инерционности части кинематической цепи, управляемой муфтой.

Асинхронные муфты скольжения не имеют фрикционных частей и поэтому не нагреваются так, как фрикционные муфты. Асинхронные муфты используют при длительных режимах управления скоростью вращения ведомого вала. Ведущий вал вращается, как правило, с постоянной скоростью за счет того, что двигатель электропривода работает в режиме источника скорости (см. п. 1.2.2).

10.2. Электромагнитные тормозы

10.2.1. Составные части и принцип действия электромагнитного тормоза

Электромагнитный тормоз представляет конструкцию, состоящую из механического тормоза и электромагнита. Тормоз служит для предотвращения самопроизвольного перемещения элементов кинематической цепи электропривода и производственного механизма при отключенном приводном двигателе, а также для ограничения свободного выбега двигателя.

В электроприводе получили применение тормозы различных конструкций с неполяризованными электромагнитами постоянного тока (типа ТКП) и электромагнитами переменного тока (типа ТКТ). Катушка электромагнита обычно подключается под полное напряжение сети.

Изобразительная модель колодочного электромагнитного тормоза показана на рис. 10.1.

Принцип действие тормоза состоит в следующем.

Если катушка 6 электромагнита не подключена под напряжение, то пружина 5 сжимает стойки 3, 8. Колодки 1, 9, закрепленные на стойках, прижимаются к валу 2, фиксируя вал в неподвижном состоянии.

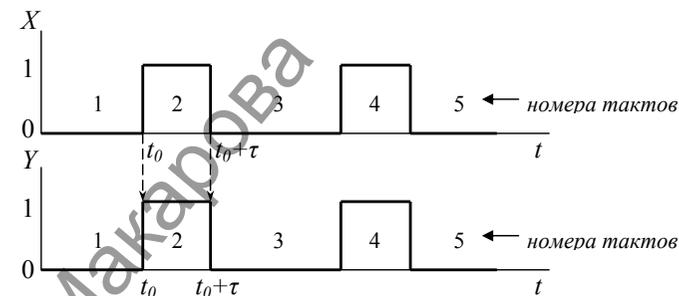


Рис. 1.14. Временные диаграммы входного (x) и выходного (y) сигналов кнопки управления с самовозвратом (без памяти)

На такте 1 до момента времени t_0 ($t < t_0$) входной сигнал $X[1]=0$ (считаем, что $F=0$) и выходной сигнал $Y[1]=0$ (контакт не замкнут, $\kappa_p=0$). В момент t_0 поступления на вход $X=1$ выходная переменная Y изменяет свое значение от 0 до 1 (контакт замыкается, $\kappa_p=1$) и на такте 2 сохраняет свое значение $Y[2]=1$ пока на входе $X[2]=1$. Затем при $t=t_0+\tau$ входная переменная X изменяется от 1 до 0, что приводит к одновременному изменению выходной переменной Y от 1 до 0. Для кнопки управления на такте 3 значение $Y[3]=0$ сохраняется пока $X[3]=0$. Такая зависимость

$$Y[K]=X[K], K=1, 2, 3, \dots$$

определяет оператор кнопки управления с возвратной пружиной (см. п. 1.3.1) и характеризует кнопку управления как аппарат без памяти. У такого аппарата значение выходной переменной Y в любой момент времени t на любом такте зависит только от значения входной переменной X в этот же момент времени на том же такте и не зависит от значений X на предшествующих тактах.

1.6.6. Аппараты с памятью

Аппаратом с памятью называют такой аппарат, значение выходной переменной Y которого зависит не только от текущего значения входной переменной X , но и от значений X на предшествующих тактах. Это означает, что в общем случае значение выходной логической переменной $Y[K]$ на рассматриваемом

мом такте с номером K ($K=1, 2, 3, \dots$) зависит от значения входной переменной $X[K]$ на текущем такте K и от значений $X[K-1]$, $X[K-2]$, ..., следовательно, и от $Y[K-1]$, $Y[K-2]$, ... на предшествующих тактах (для полной определенности должны быть заданы также начальные условия на первом такте).

Элементы памяти аппарата в зависимости от их технической реализации могут быть механическими, пневматическими, электрическими, электронными, виртуальными (программируемыми). Например, в номенклатуре кнопок управления есть кнопки с механическими элементами памяти. Конструкция таких кнопок отличается от конструкции кнопки без памяти, показанной на рис. 1.4 (условное графическое изображение на электрической схеме также отличается).

Временные диаграммы, характеризующие действие кнопки управления с памятью, показаны на рис. 1.15. Переключение контакта у этой кнопки осуществляется путем повторного воздействия на нее импульсом мускульного усилия $x=F$.

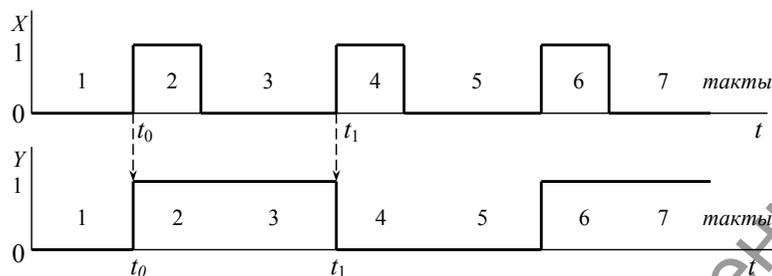


Рис. 1.15. Временные диаграммы входного (x) и выходного (y) сигналов кнопки управления с памятью

Действие кнопки управления с памятью в рассматриваемом случае может быть описано оператором в виде следующего логического выражения:

$$Y[K] = X[K] \cdot \bar{Y}[K-1] + \bar{X}[K] \cdot Y[K-1]$$

с начальным условием $X[1]=0$, $Y[1]=0$. Точкой обозначена операция логического умножения переменных, знаком $+$ операция логического сложения, чертой над буквой обозначения логической переменной – операция отрицания.

Глава 10

ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫЕ ТОРМОЗНЫЕ УСТРОЙСТВА И МУФТЫ

10.1. Общие сведения

В составе кинематической цепи некоторых электроприводов предусматриваются электромеханические аппараты, с помощью которых осуществляется управление передачей механической энергии от двигателя до рабочего органа механизма и в обратном направлении (см. п. 1.1.3, п. 1.2.1). К таким устройствам относятся дистанционно управляемые тормозы и муфты (см. п. 1.4.1).

В электроприводах грузоподъемных механизмов, ворот шлюзов и др. применяются механические тормозные устройства для быстрой остановки и удержания в определенном положении рабочего органа механизма. Конструкции тормозов (колодочные, дисковые, ленточные) разнообразны. Наибольшее применение получили колодочные тормозы. Торможение вала колодочным тормозом создается за счет прижатия колодок к тормозному шкиву (барабану), закрепленному на валу. Прижатие колодок тормоза к шкиву создается пружиной. Отжимаются колодки от шкива с помощью *электромагнита* (см. п. 3.3.1), якорь которого перемещается под действием электромагнитной силы тяги, преодолевая силу противодействия со стороны пружины. Фактически в таком *электромагнитном тормозе* используется электромагнитный привод, рассмотренный в разделе 3 (см. п. 3.2.2, п. 3.3).

С помощью муфты передается вращающий момент от ведущего вала до ведомого вала. В качестве дистанционно управляемых муфт наибольшее применение получили *электромагнитные фрикционные муфты* дисковые и порошковые, а также *асинхронные муфты скольжения*, аналогичные по принципу действия асинхронной электрической машине.

Продолжительная работа фрикционной муфты в режиме управления скоростью ведомого вала приводит к ее повышенному нагреву из-за трения фрик-

тора Т1; от среднего вывода обмотки трансформатора Т1 через источник сигнала u_2 , верхнюю секцию трансформатора Т2 (снизу вверх), диод VD2 к токе b .

По верхней секции обмотки трансформатора Т2 один коммутирующий ток, обозначим его i_\downarrow , протекает сверху вниз, другой i_\uparrow – снизу вверх. По нижней секции обмотки Т2 коммутирующие токи не протекают. При смене полярности напряжения u_k , т.е. в полупериоде, в котором плюс u_k приложен к точке b , коммутирующие токи i_\uparrow , i_\downarrow будут протекать по нижней секции обмотки трансформатора Т2. Результирующий ток $i_S = i_\downarrow - i_\uparrow$ равен нулю.

При $u_2=0$ имеем только $i_\uparrow = i_\downarrow$. Следовательно, тока во входной обмотке трансформатора Т2 нет, напряжение u_D на выходе модулятора и, соответственно, на входе амплитудного детектора равно нулю.

Если $u_2 \neq 0$, то потенциалы средних выводов обмоток трансформаторов Т1 и Т2 будут различаться. Следовательно, по одной секции обмотки Т2 в течение полупериода напряжения u_k будет протекать ток, созданный источником сигнала u_2 . В следующем полупериоде ток будет протекать по другой секции и т.д. В результате на выходе модулятора формируется переменное напряжение u_D , амплитуда которого пропорциональна величине напряжения u_2 . Амплитудная модуляция несущей u_k сигналом u_2 иллюстрируется левой и средней диаграммами на рис. 9.22в.

Демодулятор (в рассматриваемом случае амплитудный детектор) состоит из однополупериодного выпрямителя, выполненного на диоде VD5, и емкостного С-фильтра (см. рис. 8.25а). Получая на входе переменное напряжение u_D , амплитуда которого изменяется в соответствии с сигналом u_2 , детектор выделяет *огibaющую* этого напряжения (правая диаграмма на рис. 9.22в).

Амплитудный детектор имеет недостаток – он не реагирует на полярность напряжения u_2 . Этот недостаток может быть устранен, если в качестве демодулятора применить рассмотренный кольцевой модулятор, поменяв местами роли входа и выхода.

1.7. Проявление электрического тока

в тепловом и механическом воздействиях на аппарат

1.7.1. Источники теплоты в электроаппаратах

Каждый ЭА можно рассматривать как физическое тело со многими источниками теплоты и различными условиями его отвода в окружающую или специальную теплоотводящую среду. Если нагрев, которому подвергаются во время работы различные элементы ЭА, превышает определенный предел, то это может вызвать их повреждение, вывести из строя другие элементы конструкции, а также снизить долговечность и надежность аппарата в целом.

Важнейшим источником теплоты в любом ЭА является токоведущая система, включающая в свой состав электрические контакты, электронные ключи, катушки с витками провода и другие токоведущие элементы. Согласно закону Джоуля-Ленца потери электрической энергии при ее преобразовании в тепловую энергию в токоведущем элементе:

$$\Delta W_T = \int_0^T I^2 R_\Sigma dt,$$

где I – ток в цепи; R_Σ – сопротивление токоведущего элемента; T – длительность прохождения тока. Это уравнение применимо в равной мере как к постоянному, так и к переменному току, если понимать под I действующее значение переменного тока. Часть тепловой энергии ΔW_T расходуется на нагрев токоведущего элемента, другая часть рассеивается в окружающей среде. Этот токоведущий элемент нагревается, но его температура повышается до тех пор, пока количество выделенной в нем энергии в единицу времени не станет равной количеству рассеянной энергии за то же время.

В магнитных материалах магнитопроводов, находящихся в переменном магнитном поле, возникают потери, обусловленные явлениями гистерезиса и вихревых токов. Эти потери проявляются в нагреве магнитопровода. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы выполняют шихтованными для переменного магнитного потока, т.е. наборными из электрически

изолированных друг от друга пластин толщиной 0,2...0,5 мм. Для снижения потерь на гистерезис применяют легированные стали, которые имеют узкую петлю гистерезиса характеристики намагничивания.

1.7.2. Предельная допустимая температура нагрева

Максимальную температуру, при которой гарантируется надежная длительная работа ЭА и которую детали ЭА могут длительно выдержать без снижения их электрических и механических свойств, называют *предельной допустимой температурой* (ПДТ) [3]. ПДТ для изолированных проводников и деталей определяется свойствами изоляции и механической прочностью самих проводников. Например, ПДТ изоляционных волокнистых материалов из целлюлозы и шелка составляет 90 °С; ПДТ слюды, кремнийорганических материалов, стекла, кварца более 180 °С. Допустимая температура при кратковременном нагреве токами короткого замыкания неизолированных токопроводов принимается для меди 300 °С, алюминия 200 °С и стали 400 °С [2].

1.7.3. Термическая устойчивость аппарата

Токоведущие части ЭА, рассчитанные и выбранные по длительному режиму работы, проверяют на *термическую устойчивость* при коротком замыкании. Под термической устойчивостью аппарата понимают его способность выдерживать без повреждений и нагрева свыше норм тепловое действие тока короткого замыкания определенной длительности.

Термическое действие тока на ЭА зависит от длительности его прохождения по аппарату. Поэтому *ток термической устойчивости* относят к определенному времени его действия. Обычно термическая устойчивость аппарата нормируется 0,5-, 1-, 5- или 10-секундным током термической устойчивости.

Соотношение между токами термической устойчивости I_1 и I_2 при различных значениях времени воздействия T_1 и T_2 определяется по формуле

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}.$$

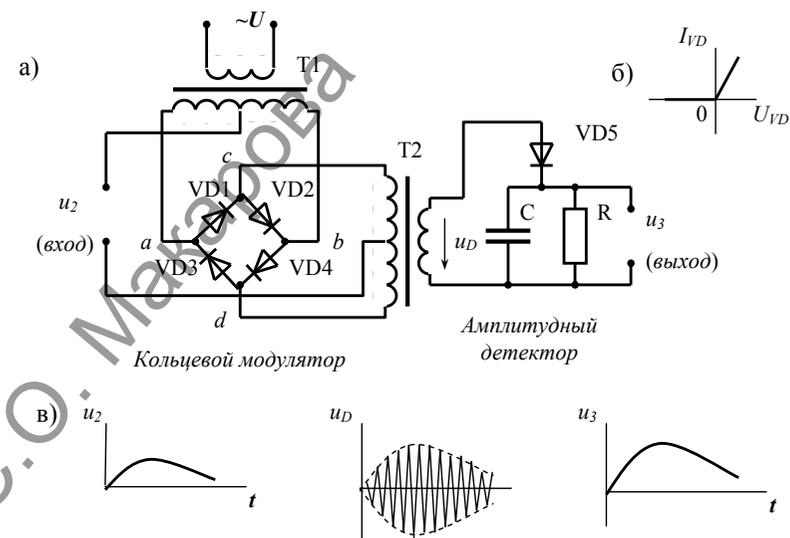


Рис 9.22. Электрическая схема потенциального разделителя (а), вольтамперная характеристика диодов (б) и временные диаграммы преобразования сигнала (б)

Принцип работы кольцевого модулятора основан на свойстве диодов пропускать ток в одном направлении и не пропускать его в противоположном направлении. Диоды VD1, VD2, VD3, VD4 кольцевого модулятора включены в плечи моста. Применяются диоды с одинаковыми вольтамперными характеристиками (ВАХ). На рис. 9.22б ВАХ диода представлена в виде кусочно-линейной зависимости тока I_{VD} от напряжения U_{VD} (для номинального режима работы модулятора). Вправо от начала координат ВАХ откладывается прямое напряжение на диоде, влево – обратное.

Режим работы модулятора определяется переменным *коммутирующим* напряжением u_k , которое приложено между точками a и b моста от вторичной обмотки трансформатора T1. В полупериоде коммутирующего напряжения, в котором его плюс приложен к точке a , коммутирующие токи идут в направлениях: от точки a через диоды VD1, VD2 к точке b ; от точки a через диод VD1 с точки c и далее через верхнюю секцию обмотки трансформатора T2 (сверху вниз), источник входного сигнала u_2 к среднему выводу обмотки трансформатора

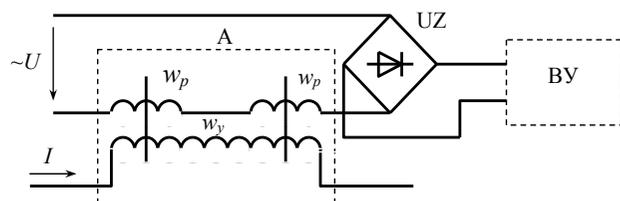


Рис. 9.21. Функциональная схема измерительного преобразователя с измерительным трансформатором постоянного тока А

Среднее значение напряжения на выходе выпрямителя UZ линейно зависит от тока I при $I < U_m / [(w_y/w_p)R_H]$, где U_m – амплитудное значение напряжения $\sim U$; R_H – входное сопротивление усилителя ВУ (см. п. 5.5).

9.7.4. Потенциальный разделитель

Потенциальный разделитель (ПР на рис. 9.19) представляет собой последовательное соединение модулятора, трансформатора и демодулятора.

Модулятор – это узел ПР, который осуществляет преобразование медленно изменяющегося сигнала u_2 постоянного тока (u_2 выделен на рис. 8.22) в сигнал u_M переменного тока (не обязательно синусоидального), имеющего амплитуду, пропорциональную u_2 . Этот процесс называют *амплитудной модуляцией* переменного тока (*несущей*) сигналом (u_2).

Для выделения передаваемого в ПР сигнала u_2 из модулированного переменного напряжения u_M необходимо преобразовать это напряжение в напряжение постоянного тока. Эту операцию называют *демодуляцией*.

Демодулятор – узел ПР, который осуществляет демодуляцию сигнала переменного тока. В радиотехнике операция выделения моделирующего сигнала обычно называется *детектированием* и в соответствии с этим устройство, выполняющее эту операцию, называют *детектором*. Для автоматических систем демодулятор называют также *фазовым дискриминатором*.

Упрощенная электрическая схема потенциального разделителя с кольцевым модулятором и амплитудным детектором показана на рис. 9.22а.

Аппараты не проверяются на термическую устойчивость, если они защищены быстродействующей защитной аппаратурой (плавкими предохранителями, автоматическими выключателями).

1.7.4. Возникновение и действие электродинамических сил

В токоведущей системе ЭА, состоящей из нескольких токоведущих частей, образуются магнитные поля от этих частей при протекании по ним токов.

На элемент проводника элементарной длины dl_1 с током i_1 , находящийся в магнитном поле с индукцией B , согласно закону Ампера действует механическая сила

$$dF = B i_1 dl_1 \sin \beta,$$

где β – угол между направлением тока i_1 в элементе проводника и вектором индукции B . На весь проводник длиной l_1 действует сила

$$F = \left(\int_0^{l_1} B \sin \beta dl_1 \right) i_1.$$

Силу F называют *электродинамической силой*. Эта сила распределена по длине проводника. Точка приложения силы зависит от конфигурации проводника, от характера распределения магнитного поля (индукции B) вдоль проводника и не зависит от силы тока i_1 .

Если магнитное поле, создано другим соседним проводником с током i_2 , и оба проводника находятся в воздушной среде, то сила F , действующая на весь проводник, определяется в соответствии с законом Био-Савара-Лапласа по выражению [6]:

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} k_k i_1 i_2,$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; k_k – коэффициент контура, значение которого зависит от геометрических размеров проводников, их взаимного расположения и не зависит от токов i_1 и i_2 . Например, для параллельных проводников малого сечения и одинаковой длины $l_1 = l_2 = l$:

$$k_{\kappa} = \frac{1}{a} (2\sqrt{l^2 + a^2} - 2a),$$

где a – расстояние между проводниками. При однонаправленных токах в проводниках они притягиваются друг к другу под действием электродинамической силы; при разнонаправленных токах они отталкиваются друг от друга (направление действия электродинамической силы определяется по «правилу левой руки»).

Электродинамическая сила возникает также в одиночном контуре с током, у которого нет внешнего (созданного другими элементами аппарата) магнитного поля. В любом случае электродинамическая сила возникает в местах, где искривляются линии электрического тока. Например, в замкнутом контуре витка с током электродинамическая сила своим действием стремится привести виток к форме окружности, разорвать виток, расположить провод витка по прямой линии. В некоторых случаях электродинамическая сила, вызванная достаточно большим током, протекающим по коммутирующему контакту, способна разомкнуть контакт.

При переменном токе электродинамическая сила пульсирует, изменяясь с частотой, в два раза большей частоты тока. Максимальное значение электродинамической силы оказывается в два раза большим, чем при постоянном токе той же силы (сравниваем по действующему значению переменного тока). Соответственно, разрушающее действие пульсирующей силы больше, чем постоянно действующей силы.

При больших токах, особенно при токах короткого замыкания электродинамические силы, возникающие в токоведущей системе ЭА, опасны для аппарата. Следует отметить, что при переменном токе, в зависимости от момента короткого замыкания, первая амплитуда ударного тока короткого замыкания $i_{уд.макс.}$ может существенно превосходить амплитудное значение установившегося тока короткого замыкания (до 1,8 раза). Максимальная величина электродинамической силы может достигать значения

шить габариты и массу датчика. Режим работы выбирают близким к режиму короткого замыкания (разрыв вторичной цепи приводит к аварийному режиму). Усилитель (ВУ) с малым входным сопротивлением подключают к вторичной цепи трансформатора тока через выпрямитель.

Трансформаторы тока изготавливают на номинальные первичные токи в диапазоне от 0,1 А до 40000 А. Вторичные номинальные токи могут иметь значения 1,2; 2,5; 5 А. Классы точности: 0,2; 0,5; 1; 3.

Измерительный трансформатор напряжения (ТВ на рис. 9.20б) работает в режиме близком к режиму холостого хода. Он понижает контролируемое переменное напряжение и гальванически развязывает электрические цепи. Сигнал, снимаемый с вторичной обмотки трансформатора, через выпрямитель подается на усилитель (ВУ) с большим входным сопротивлением.

Характеристики управления рассмотренных чувствительных элементов считают линейными в практических приложениях. Зависимость выходной переменной u_1 от входной переменной u определяют через номинальный коэффициент преобразования $k_{ЧЭном} = u_{1ном}/u_{ном}$, где «ном» означает номинальное значение соответствующего параметра. Тогда

$$u_1 = k_{ЧЭном} \cdot u.$$

9.7.3. Измерительный трансформатор постоянного тока

Измерительный трансформатор постоянного тока, выполненный на основе магнитного усилителя (см. п. 5.5 и п. 5.6), применяют для измерения постоянных токов свыше 5000 А. Использование шунтов в таких случаях нецелесообразно, так как шунты получаются весьма громоздкими и дорогими.

Обмотка управления w_y магнитного усилителя А подключается в разрыв контролируемой цепи, по которой протекает постоянный ток I (рис. 9.21). Она состоит из одного витка провода. Рабочие обмотки w_p получают питание от источника переменного напряжения $\sim U$.

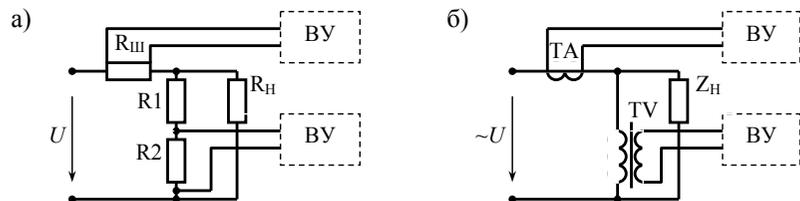


Рис. 9.20. Подключение к электрической цепи чувствительных элементов: шунта $R_{ш}$ и делителя напряжения R_1, R_2 (а); трансформатора тока TA и трансформатора напряжения TV (б)

Шунт ($R_{ш}$ на рис. 9.20а) представляет собой резистор с двумя токовыми и двумя потенциальными зажимами. С помощью токовых зажимов шунт подключают в разрыв (рассечку) контролируемой цепи. Напряжение, пропорциональное току контролируемой цепи, с потенциальных зажимов шунта подается на входной усилитель (ВУ) датчика тока и усиливается им в 100...200 раз. Линейная зависимость напряжения от тока обеспечивается при большом входном сопротивлении ВУ.

Классы точности шунтов: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5. Номинальные токи в пределах от 0,5 А до 7500 А. Номинальное падение напряжения на шунте составляет 75 мВ (это напряжение между потенциальными зажимами, когда по шунту протекает ток, равный номинальному току шунта).

Делитель напряжения в виде последовательного соединения резисторов R_1 и R_2 (рис. 9.20а) подключают под полное контролируемое напряжение. Выходное напряжение делителя, пропорциональное контролируемому напряжению, снимается с резистора R_2 . ВУ исполняет роль согласующего элемента, обладая высоким входным сопротивлением.

Измерительный трансформатор переменного тока (ТА) применяют вместо шунта на переменном токе (рис. 9.20б), что позволяет: уменьшить потери энергии, возникающие в процессе ее преобразования; реализовать гальваническую развязку между цепями; повысить безопасность эксплуатации; умень-

$$F_{\max.} = \frac{\mu_0}{4\pi} k_{\kappa} i_{\text{уд. макс.}}^2 = \frac{\mu_0}{4\pi} k_{\kappa} (1,8\sqrt{2} I)^2 = \frac{\mu_0}{4\pi} k_{\kappa} 6,48 I^2.$$

Это означает, что при переменном токе, в случае возникновения короткого замыкания, электродинамическая сила может быть почти в 6,5 раза больше, чем при постоянном токе с тем же установившемся значением I .

1.7.5. Электродинамическая устойчивость аппарата.

Способность аппарата выдержать без повреждений электродинамические силы, возникающие при прохождении тока определенной величины, называют электродинамической устойчивостью аппарата. При проектировании и заводских испытаниях ЭА определяется предельный ток электродинамической устойчивости $I_{\text{д.у}}$, и его значение приводится в паспорте ЭА в абсолютных единицах или в кратности к номинальному току $I_{\text{ан. ном}}$ аппарата, например, $I_{\text{д.у}} = 15 I_{\text{ан. ном}}$.

1.8. Основные требования, предъявляемые к аппаратам

Требования, предъявляемые к электроаппаратам, зависят от назначения, условий применения и эксплуатации аппарата.

Все электроаппараты должны удовлетворять следующим общим требованиям [3]:

1) ЭА должен надежно работать при колебаниях напряжения в заданных пределах относительно номинального значения напряжения $U_{\text{уст. ном}}$ электроустановки, где он применяется (обычно от $0,85U_{\text{уст. ном}}$ до $1,1U_{\text{уст. ном}}$); изоляция частей ЭА должна обеспечивать надежную работу аппарата при возможных перенапряжениях.

ЭА выбирают по номинальному напряжению так, чтобы выполнялось условие

$$U_{\text{уст. ном}} \leq U_{\text{ан. ном}},$$

где $U_{\text{ан. ном}}$ – номинальное напряжение ЭА (указывается на щитке аппарата).

При выборе ЭА следует сопоставлять наибольшее рабочее напряжение электрической установки $U_{\text{раб.макс}}$ с наибольшим допустимым напряжением аппарата $U_{\text{доп.макс}}$. Однако, как правило, $U_{\text{раб.макс}} = (1,1 \dots 1,15) U_{\text{уст.ном}}$, а $U_{\text{доп.макс}} = (1,1 \dots 1,15) U_{\text{ап.ном}}$. Тогда при выборе ЭА достаточно сопоставить номинальные напряжения установки и аппарата, чтобы гарантировать длительную работу без повреждений его изоляции.

2) Температура нагрева токоведущих частей ЭА, работающего в номинальном режиме, не должна превышать установленного допустимого значения.

ЭА выбирают по номинальному току из условия

$$I_{\text{н. макс}} \leq I_{\text{ап. ном}},$$

где $I_{\text{н. макс}}$ – максимальный длительный ток нагрузки цепи; $I_{\text{ап. ном}}$ – номинальный ток ЭА, т.е. ток, который аппарат может выдержать длительное время, если температура окружающей среды не превышает расчетную температуру $\theta_{\text{расч}}$ (например, 40 °С).

Если длительный ток нагрузки превысит номинальный ток ЭА, то температура его отдельных частей и контактов превысит допустимую температуру, что сократит срок службы ЭА, так как механические и электрические свойства материала частей аппарата с повышением температуры ухудшаются.

ЭА может работать и при температуре окружающей среды большей, чем расчетная температура $\theta_{\text{расч}}$, но при этом наибольший допускаемый ток $I_{\text{раб}}$ аппарата должен быть меньше номинального тока. Обычно $I_{\text{раб}}$ при температуре среды $\theta_{\text{среды}} > \theta_{\text{расч}}$ определяют по приближенной формуле

$$I_{\text{раб}} = I_{\text{ап. ном}} \left[(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{среды}}) / (\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{расч}}) \right]^{1/2},$$

где $\theta_{\text{доп}}$ – длительно допускаемая температура нагрева наиболее чувствительных к изменению температуры частей или узлов аппарата (например, коммутирующих контактов).

Если режим работы аппарата повторно-кратковременный, то в расчетах и при выборе аппарата учитывается относительная продолжительность вклю-

в электрический сигнал, у которого носителем информации обычно является напряжение. В датчиках может предусматриваться гальваническая развязка выходной (слаботочной) цепи от входной (силовой) цепи, а также нормирование сигнала (приведение его значений к определенной области, например, к напряжению из диапазона 0...10 В). В состав такого датчика входят следующие функциональные части: чувствительный элемент (первичный измерительный преобразователь), устройство гальванической развязки (потенциальный разделитель), усилительные устройства. Обобщенная структурная схема датчика тока и датчика напряжения показана на рис. 9.19.

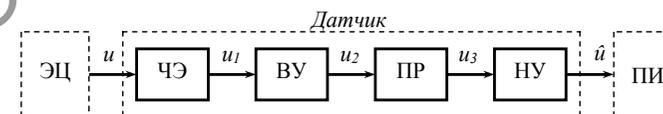


Рис. 9.19. Обобщенная структурная схема датчика тока и датчика напряжения

На схеме обозначены:

ЧЭ – чувствительный элемент (первичный измерительный преобразователь – шунт, трансформатор тока в датчиках тока; делитель напряжения, измерительный трансформатор напряжения в датчиках напряжения);

ВУ – входной усилитель;

ПР – потенциальный разделитель;

НУ – нормирующий усилитель;

ЭЦ – контролируемая датчиком электрическая цепь;

ПИ – приемник информации (например регулятор системы управления автоматизированного электропривода).

9.7.2. Первичные измерительные преобразователи датчиков

Первичные измерительные преобразователи датчиков тока и датчиков напряжения и схемы подключения преобразователей к электрической цепи с нагрузкой (R_H, Z_H) показаны на рис. 9.20.

его выходов в зависимости от направления вращения кодового диска. Импульсы частотой f_H длительностью τ_s поступают из ИП в кодовый преобразователь.

9.6.3. Кодовый преобразователь

Кодовый преобразователь КП (см. рис. 9.176) – счетчик импульсов – суммирует импульсы ИП за период времени T ($T \gg 1/f_H$) и формирует с периодичностью $1/T$ цифровой код $y^N \dots y^1 y^0$ суммарного количества импульсов

$$n_T = f_H T = \frac{\omega}{2\pi} nT.$$

Величина n_T характеризует среднее значение скорости ω на интервале времени T . Погрешность измерения скорости определяется зависимостью

$$\delta_\omega = 1/n_T,$$

так как младшему разряду y^0 КП соответствует один импульс.

Повышение точности цифрового датчика скорости достигается путем увеличения количества n окон на каждой дорожке кодового диска (реально $n \gg 4$) и путем увеличения интервала времени T суммирования импульсов. Однако чрезмерное увеличение T приводит к росту отклонения среднего значения скорости, определяемого числом $y^N \dots y^1 y^0$, от мгновенного значения ω . Из приведенных формул также следует, что погрешность δ_ω возрастает при малых скоростях ω . Поэтому для цифрового измерения малых значений ω применяют другой способ формирования цифрового кода – подсчитывается количество создаваемых высокочастотным генератором опорных импульсов, которые умещаются на интервале между двумя соседними импульсами на выходе импульсного преобразователя. Этот способ дает погрешность, возрастающую с увеличением скорости ω .

9.7. Датчики тока и датчики напряжения

9.7.1. Назначение и составные части датчиков

Датчики тока и датчики напряжения осуществляют преобразование текущих значений тока и, соответственно, напряжения (в контролируемой цепи)

чения (ПВ), равная в относительных единицах отношению продолжительности пребывания аппарата во включенном состоянии к продолжительности пребывания во включенном и отключенном состояниях на цикле работы. При повторно-кратковременном режиме работы температура аппарата не достигает установившегося значения, такого как при продолжительном режиме работы.

3) При возникновении ненормальных режимов (например, токов короткого замыкания или перегрузки) ЭА должен выдерживать термическое и электродинамическое воздействия тока без деформации деталей и нарушения свойств изоляции, препятствующих эксплуатации ЭА.

ЭА проверяют на термическую устойчивость, сопоставляя количество тепла $Q_{к.з.}$, выделяемое в аппарате током короткого замыкания за время короткого замыкания, с количеством тепла $Q_{доп.}$, допустимым для аппарата.

Количество выделяемого тепла прямо пропорционально произведению квадрата силы тока короткого замыкания на время его действия. Поэтому проверка на термическую устойчивость сводится к проверке неравенства

$$I_{к.з.}^2 \cdot T_{к.з.} < I_t^2 \cdot T,$$

где $I_{к.з.}$, $T_{к.з.}$ – расчетные значения тока и времени короткого замыкания; I_t – ток термической устойчивости при указанном заводом-изготовителем одной, пяти или десяти секундах времени его действия T .

Аппараты, защищенные токоограничивающими предохранителями, проверять на термическую устойчивость нет необходимости.

Выбираемый ЭА проверяют на электродинамическую устойчивость по условию

$$I_{к.з.} < I_{д.у.},$$

где $I_{к.з.}$ – расчетное ударное (при переменном токе) или наибольшее мгновенное (при постоянном токе) значение тока короткого замыкания, $I_{д.у.}$ – ток электродинамической устойчивости, т.е. мгновенное значение максимально допустимого тока через аппарат.

Аппараты, защищенные токоограничивающими предохранителями, проверять на электродинамическую устойчивость нет необходимости.

4) ЭА должен иметь минимальные массогабаритные характеристики и стоимость, быть удобным в эксплуатации, надежным, технологичным в производстве.

1.9. Классификация электроаппаратов

В зависимости от объекта, на который воздействует аппарат (см. п. 1.1.3), выделим аппараты управления передачей электрической энергии и аппараты управления передачей механической энергии.

Аппараты управления передачей электрической энергии осуществляют направленное воздействие на электрическую цепь, изменяя в ней электрическое (активное или (и) реактивное) сопротивление или электродвижущую силу. По выполняемым функциям их традиционно разделяют на коммутационные (называют также «коммутирующие»), пускорегулирующие, регулирующие, контролируемые аппараты и аппараты защиты. Однако четких границ между этими группами аппаратов нет.

Коммутационные аппараты предназначены для замыкания, размыкания и переключения электрических цепей, как правило, до нескольких десятков раз в сутки. В большинстве это аппараты, в которых имеется контактная система с коммутирующими контактами и механическое приводное устройство. В этот класс аппаратов включают кнопки управления, рубильники, пакетные выключатели и переключатели, выключатели нагрузки, представляющие собой аппараты ручного управления.

Пускорегулирующие аппараты предназначены либо для пуска, регулирования частоты вращения и остановки электрических машин, либо для подключения и отключения иных потребителей электроэнергии и регулирования процесса потребления электроэнергии. Большинство аппаратов этого класса имеет в составе исполнительного устройства электрические контакты или (и) электронные ключи, предназначенные для коммутации электрических цепей. В эту группу аппаратов включают контроллеры, контакторы, пускатели, реостаты и

$$f_H = \frac{\omega}{2\pi} n,$$

где n – количество окон на дорожке (на рис. 9.17а четыре окна на дорожке). Длительность τ импульса напряжения U_H , формируемого от окна наружной дорожки, и импульса U_B от окна внутренней дорожки тем меньше, чем больше скорость ω .

9.6.2. Блок формирования импульсов

Принцип формирования выходных сигналов $U_{\omega>0}$ и $U_{\omega<0}$ блоком И (блок формирования импульсов на рис. 9.17) в зависимости от направления вращения кодового диска иллюстрируется на рис. 9.18.

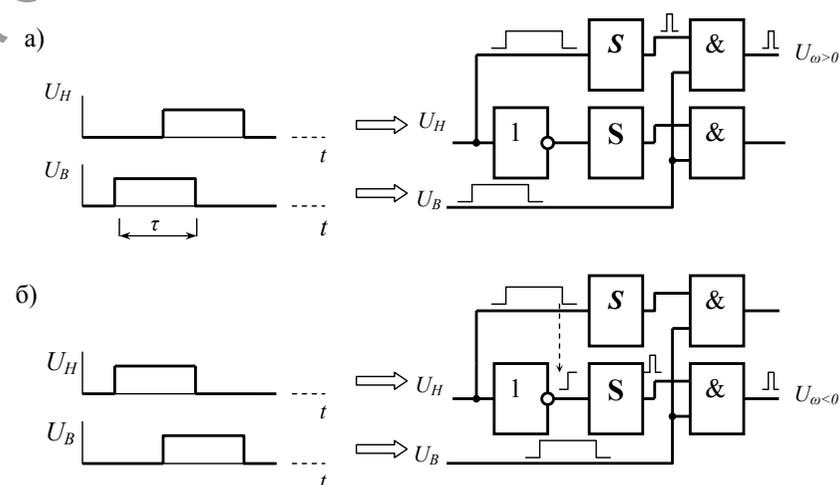


Рис. 9.18. Временные диаграммы сигналов и логические схемы обработки этих сигналов при положительной (а) и отрицательной (б) скорости ω вращения кодового диска

В блоке формирования импульсов И предусматривается одновибратор S, который генерирует на выходе одиночный импульс малой длительности τ_S ($\tau_S \ll \tau$). Запускается одновибратор передним фронтом входного импульса. Выходной сигнал импульсного преобразователя ИП снимается с одного из двух

тахогенератора постоянного напряжения, пропорционального ω , полярность которого зависит от направления вращения ротора.

9.6. Цифровые датчики скорости

9.6.1. Элементы конструкции

Цифровой датчик скорости обладает большей точностью по сравнению с тахогенераторами. Он состоит из двух основных частей: импульсного преобразователя скорости (ИП) и кодового преобразователя (КП).

Импульсный преобразователь ИП преобразует угловую скорость вала в импульсы напряжения частотой f , пропорциональной скорости вращения вала. ИП может быть выполнен на основе кодового диска с окнами, расположенными на двух concentric дорожках (рис. 9.17а). Две дорожки используются для того, чтобы определить направление вращения диска (вала). Окна внутренней дорожки сдвинуты на определенный небольшой угол по отношению к окнам внешней дорожки, как показано на рис. 9.17а.

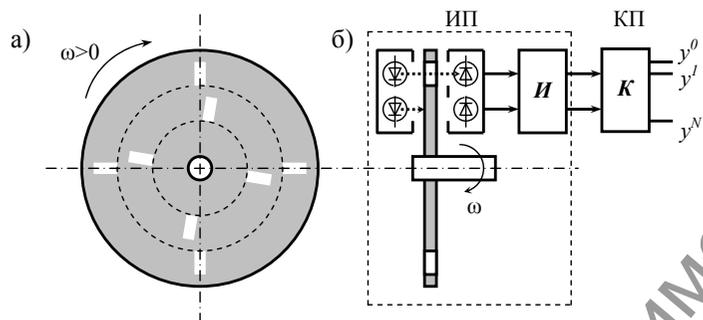


Рис. 9.17. Изобразительная модель кодового диска импульсного преобразователя (а) и функциональная схема цифрового датчика скорости (б)

Когда диск вращается с некоторой угловой скоростью ω , излучение от источников (светодиодов) через окна дорожек периодически попадает на фотодиоды (рис. 9.17б). При этом проводимость фотодиодов увеличивается. По сигналам с фотодиодов в блоке формирования импульсов И вырабатываются импульсы частотой

другие аппараты. Среди них аппараты ручного управления и дистанционно управляемые аппараты.

Регулирующие аппараты предназначены для регулирования по заданному закону или для поддержания на заданном уровне значений определенных параметров, характеризующих работу технической системы. Эти аппараты могут быть выполнены в виде электромеханических или электронных устройств. Например, регуляторы мощности с электронными ключами, работающими в импульсном режиме, используются для регулирования скорости вращения электродвигателей. Как правило, эти аппараты представляют собой системы автоматического управления, использующие информацию о возмущающем воздействии или (и) об отклонении регулируемой величины от заданного значения.

Контролирующие аппараты предназначены для измерения определенной физической величины (частоты вращения, температуры, электрического напряжения, освещенности или др.) и для сравнения контролируемой величины с заданным значением (уставкой). По результату сравнения контролируемой величины с уставкой аппарат осуществляет, воздействие на электрическую цепь, например, с помощью коммутирующего контакта. К аппаратам этого класса относят измерительные преобразователи¹⁵ различных физических величин (тока, давления, температуры и др.) в том числе и реле различного типа (напряжения, тока, скорости и др.).

Аппараты защиты выполняют функцию защиты электрических цепей и других элементов технической системы при возникновении ненормальных режимов (короткого замыкания, перегрузки, снижения частоты вращения электродвигателя ниже допустимого значения и т.д.). Аппарат защиты либо сам отключает электропитание цепи, в которой возник ненормальный режим, либо воздействует по электрической связи на другой аппарат, например, контактор, который отключает своими контактами поврежденную цепь.

Простейшим по конструкции аппаратом защиты является плавкий предохранитель. Он защищает электрические цепи от сверхтоков за счет разрушения

токопроводящей плавкой вставки. Наиболее эффективным и распространенным аппаратом защиты является автоматический выключатель с несколькими видами защит.

В зависимости от технического исполнения выделяют *электромеханические, статические* и *гибридные* аппараты. Основным признаком электромеханических аппаратов является наличие в них подвижных частей (например, коммутирующих контактов, механических передач и др). Статические аппараты не имеют подвижных частей. Их выполняют на основе полупроводниковых и магнитных элементов и устройств (диодов, транзисторов, тиристоров, управляемых дросселей и других полупроводниковых и иных устройств). В гибридных аппаратах, например, в гибридном контакторе конструктивно и функционально совмещены электромеханические и статические компоненты (например, коммутирующие контакты и электронные ключи).

Аппараты управления передачей электрической энергии классифицируют также:

- по рабочему (номинальному) напряжению: аппараты низкого (до 1000 В включительно) напряжения и аппараты высокого (свыше 1000 В) напряжения.
- по значению рабочих токов: аппараты слаботочные (до 10 А) и аппараты сильноточные (свыше 10 А);
- по роду тока: аппараты постоянного тока и аппараты переменного тока;
- по частоте рабочего напряжения: аппараты с нормальной (50 Гц) частотой напряжения и аппараты с повышенной (от 400 Гц и выше) частотой напряжения.

Аппараты управления передачей механической энергии осуществляют направленное воздействие на кинематическую цепь электромеханической системы. К ним относятся различные (колодочные, дисковые, ленточные) электромеханические тормозы, предназначенные для торможения вращающегося вала механической передачи и фиксации его в неподвижном положении, а также электромеханические муфты (скольжения, фрикционные, порошковые),

передаточный коэффициент. Амплитудная погрешность асинхронного тахогенератора менее 0,5%.

9.5.3. Синхронный тахогенератор

Синхронный тахогенератор представляет собой микромашину, подобную синхронному генератору, у которой ротор – постоянный магнит. В простейшей конструкции синхронного тахогенератора предусматривается одна генераторная обмотка.

При вращении ротора с угловой скоростью ω магнитный поток в обмотке изменяется по синусоидальному закону. Индуцируемая в генераторной обмотке переменная ЭДС

$$e_T(t) = E_{mT}(\omega) \sin(\omega t),$$

изменяется с частотой ω , полностью определяемой скоростью вращения ротора. Амплитуда $E_{mT}(\omega)$ ЭДС пропорциональна скорости вращения. При изменении угловой скорости вращения ротора изменяется и амплитуда, и частота ЭДС и напряжения на выходе тахогенератора (рис. 9.16)

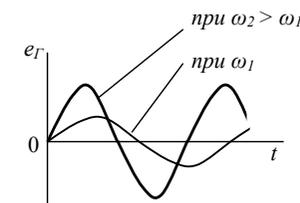


Рис. 9.16. Временные диаграммы ЭДС на выходе синхронного тахогенератора при разных скоростях вращения

Зависимость частоты ЭДС синхронного тахогенератора от угловой скорости вращения ротора является основным недостатком этого аппарата. Другой недостаток – выходной сигнал не содержит информацию о направлении вращения ротора. Эти недостатки устранены в реверсивных синхронных тахогенераторах. В них применяют дополнительные обмотки и электронные устройства в виде фазочувствительных схем, которые обеспечивают получение на выходе

При вращении ротора ($\omega = \text{const}$) в магнитном поле с переменным потоком Φ_d в роторе возникает ЭДС вращения

$$E_q = c_e \Phi_d \omega$$

(на рис. 9.15б показана с помощью кружков). ЭДС E_q и вызванный ею ток в роторе изменяются с частотой f . Они обуславливают появление переменного магнитного потока Φ_q , действующего вдоль оси $q-q$ (на рис. 9.15б показан стрелкой, направленная по оси $q-q$). В генераторной обмотке L_2 потоком Φ_q индуцируется переменная ЭДС

$$e_2(t) = E_{m2}(\omega) \sin(2\pi f t),$$

амплитуда $E_{m2}(\omega)$ которой пропорциональна угловой скорости ω вращения ротора тахогенератора. При изменении знака ω , т.е. направления вращения ротора, фаза $e_2(t)$ изменяется на 180° . На рис. 9.15в показаны выходные сигналы тахогенератора для двух разных значений ω при одинаковом направлении вращения ротора тахогенератора.

Подключение нагрузки к генераторной обмотке тахогенератора может вызвать существенные амплитудные и фазовые искажения выходного сигнала. Поэтому на практике обычно используют тахогенератор в режиме, близком к холостому ходу. Такой режим реализуют, например, соединяя нагрузку с тахогенератором через эмиттерный повторитель, обладающий высоким входным сопротивлением. В такой схеме удастся согласовать тахогенератор даже с низкоомной нагрузкой.

Характеристику управления тахогенератора представим в виде

$$U_2 = K_{ТГ} |\omega|,$$

где U_2 – напряжение на выходе тахогенератора, $K_{ТГ}$ – передаточный коэффициент, имеющий размерность В·с.

Полоса пропускания асинхронного тахогенератора ограничена частотой питающей сети. Поэтому для быстродействующих систем используются тахогенераторы с повышенной частотой питания. По сравнению с тахогенераторами постоянного тока асинхронные тахогенераторы имеют существенно меньший

предназначенные для передачи вращения от ведущего вала к ведомому валу. Тормозы применяют для кинематических цепей с источниками силы (момента силы), фрикционные муфты – для кинематических цепей с источниками скорости.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ АППАРАТОВ

2.1. Общие сведения

Электрическим контактом называют место соприкосновения двух или более токоведущих деталей, по которому электрический ток протекает из одной детали в другую; конструктивный узел с этими контактными деталями также называют электрическим контактом или *контактным узлом*¹⁶.

Электрические контакты принято разделять на три вида в зависимости от возможности перемещения деталей контакта (контактных деталей) во время работы ЭА. Контакт может быть *неразмыкаемым*, *скользящим* или *размыкаемым*.

К неразмыкаемым контактам относят такие узлы проводников тока, детали которых не перемещаются друг относительно друга, а остаются надежно скрепленными при работе ЭА. Обычно ЭА присоединяется к внешним электрическим цепям при помощи неразмыкаемых контактов. Они могут быть разъемными, разборными и неразборными.

В скользящих контактах одна контактная деталь перемещается относительно другой детали, не нарушая электрической связи между этими деталями. Например, электрический контакт неподвижной детали аппарата с вращающейся деталью создают при помощи щетки и кольца, расположенных соответственно на неподвижной и вращающейся частях ЭА.

Размыкаемые контакты при работе ЭА замыкаются, приходя в соприкосновение, и размыкаются, выходя из соприкосновения и разрывая электрическую цепь. Такие контакты называют *коммутирующими контактами*. Их применяют в качестве исполнительных устройств *аппаратов контактной коммутации* электрических цепей. Среди коммутирующих контактов выделяют замыкающие контакты, размыкающие контакты и переключающие контакты.

В табл. 2.1 приведены примеры условных обозначений контактов на электрических схемах.

Обмотка возбуждения $L1$ подключается под переменное напряжение U_1 частотой f равной 50 Гц или 400 Гц. С генераторной обмотки $L2$ снимается выходной сигнал – переменное напряжение U_2 частотой f . Амплитуда U_{m2} напряжения U_2 зависит от угловой скорости ω вращения ротора.

Для уменьшения момента инерции ротор 2 выполняют тонкостенным в виде стакана из немагнитного проводникового материала (обычно алюминиевого сплава). Внутри ротора размещается неподвижный шихтованный сердечник по которому замыкаются магнитные потоки.

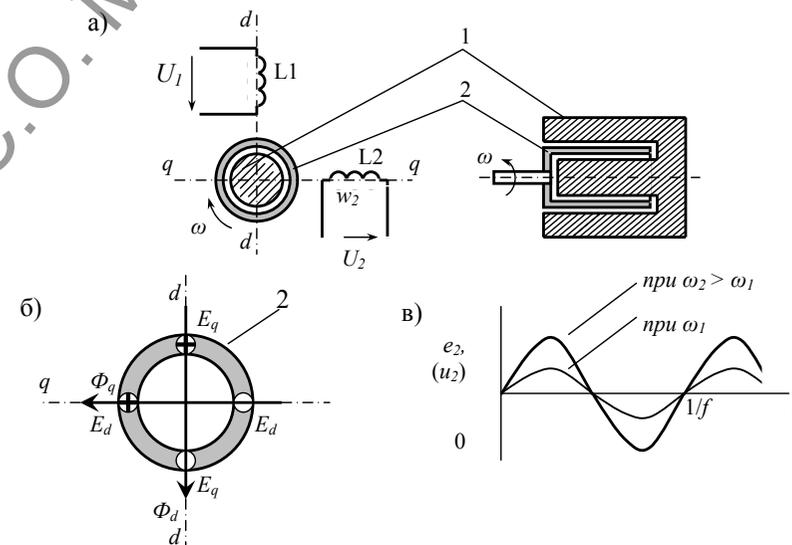


Рис. 9.15. Элементы асинхронного тахогенератора переменного тока (а,б) и временная диаграмма ЭДС генераторной обмотки (в)

Принцип действия асинхронного тахогенератора состоит в следующем.

Обмотка возбуждения $L1$ создает вдоль оси $d-d$ переменный магнитный поток Φ_d (на рис. 9.15б показан стрелкой, направленной по оси $d-d$). Поток Φ_d пульсирует с частотой f , изменяя направление через каждые $1/2f$ секунды. В роторе индуцируется трансформаторная ЭДС E_d (на рис. 9.15б показана с помощью кружков). Возбуждаемый этой ЭДС магнитный поток, как составляющая потока Φ_d , действует вдоль оси $d-d$ и поэтому не вызывает появление ЭДС в генераторной обмотке.

характеристика управления может быть приближенно представлена линейной зависимостью

$$U = \kappa_{ТГ} \omega.$$

Величина коэффициента $\kappa_{ТГ}$ определяется выражением

$$\kappa_{ТГ} = \frac{\kappa}{1 + \frac{R_{я}}{R_{н}}},$$

где $R_{я}$ – сопротивление якорной обмотки и щеточного контакта.

Для уменьшения коллекторных пульсаций напряжения U увеличивают количество пластин коллектора. Якорь выполняют полым, без пазов. Параллельно якорной обмотке подключают конденсатор C для сглаживания пульсаций напряжения. Постоянная времени емкостного фильтра

$$T = \frac{R_{я} C}{1 + \frac{R_{я}}{R_{н}}}$$

возрастает с увеличением емкости C . Однако при этом уменьшается полоса пропускания тахогенератора. При частотах сигнала на входе $f_{\omega} > 1/2\pi T$ амплитудная погрешность напряжения на выходе превышает 3 дБ, а фазовая превышает 45° .

Зависимость выходной величины U от входной величины ω в динамике описывают дифференциальным уравнением

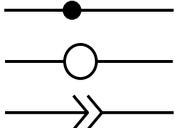
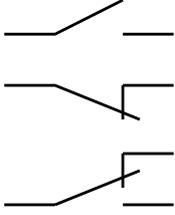
$$T \frac{dU}{dt} + U = \kappa_{ТГ} \omega.$$

9.5.2. Асинхронный тахогенератор переменного тока

Асинхронный тахогенератор переменного тока выполнен на базе асинхронной двухфазной машины (рис. 9.15а).

На статоре 1 имеются две обмотки с взаимно перпендикулярными осями: обмотка возбуждения $L1$, расположенная по оси $d-d$, и выходная (генераторная) обмотка $L2$, расположенная по оси $q-q$.

Таблица

Вид контакта	Изображение контакта на электрической схеме
1. Неразмыкаемый контакт	
неразборный	
разборный	
разъемный	
2. Скользящий контакт	
3. Коммутирующий контакт	
замыкающий	
размыкающий	
переключающий	

Место соприкосновения контактных деталей характеризуют «кажущейся» и действительной площадями соприкосновения. Вследствие того, что поверхности контактных деталей имеют шероховатость (бугорки и впадины), они касаются друг друга не по всей кажущейся площади соприкосновения, а по отдельным малым площадкам, образующим фактическую площадь соприкосновения. Количество таких площадок зависит от геометрических форм соприкасающихся поверхностей, силы F_K нажатия одной контактной детали на другую, твердости материала деталей.

В зависимости от кажущейся площади соприкосновения условно различают три типа контактов: *точечный*, *линейный*, *плоскостной*. Кажущееся соприкосновение контактных деталей у этих типов контактов имеет место соответственно в точке (по микроплощадке), по линии, по плоскости (по поверхности). В электрических аппаратах применяют коммутационные контакты всех трех типов.

2.2. Техническая реализация и параметры коммутирующих контактов

В зависимости от конструкции различают мостиковые, пальцевые, стыковые, врубные, розеточные и роликовые коммутирующие контакты. Их характеризуют следующими основными параметрами: раствор, провал, начальное нажатие, конечное нажатие.

2.2.1. Конструктивный узел с мостиковым контактом

Мостиковый контакт представлен на рис. 2.1 двумя изобразительными моделями контактного узла при разомкнутом состоянии (слева) и при замкнутом состоянии контакта (справа).

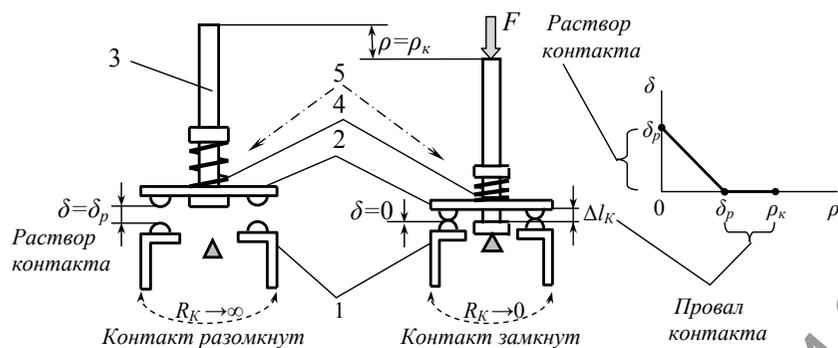


Рис. 2.1. Изобразительные модели контактного узла с мостиковым контактом при разомкнутом и при замкнутом состояниях контакта

В состав контактного узла входят неподвижные контактные детали 1, подвижная контактная деталь – контактный мостик 2, контактная пружина 4. Контактные детали 1 и 2 выполнены из проводникового материала (например, из меди) и образуют коммутирующий контакт. Неподвижные контактные детали 1 контакта подключаются к электрической цепи в месте ее разрыва. В цепи контакт создает электрическое сопротивление R_k , величина которого зависит положения (ρ и δ) толкателя 3 и подвижного контактного мостика 2 относительно неподвижных контактных деталей 1. Мостик 2, толкатель 3 и кон-

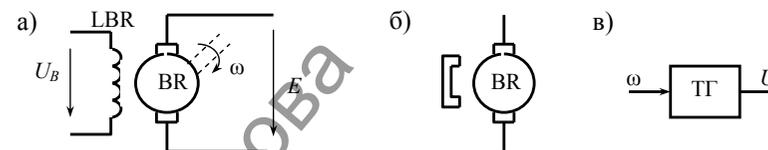


Рис. 9.13. Функциональные схемы тахогенераторов

Обмотка возбуждения LBR или постоянный магнит создает постоянный магнитный поток Φ в электрической машине. ЭДС на щетках тахогенератора

$$E = c_e \Phi \omega = \kappa \omega,$$

где c_e – конструктивная постоянная, $\kappa = c_e \Phi = \text{const}$.

Выходное напряжение $U = E$, если сопротивление нагрузки тахогенератора $R_H = \infty$. В этом случае характеристика управления тахогенератора представляет собой линейную зависимость U от ω (наклонная прямая на рис. 9.14). Если же сопротивление нагрузки имеет конечную величину $R_H < \infty$, то линейность преобразования $\omega \rightarrow U$ нарушается.

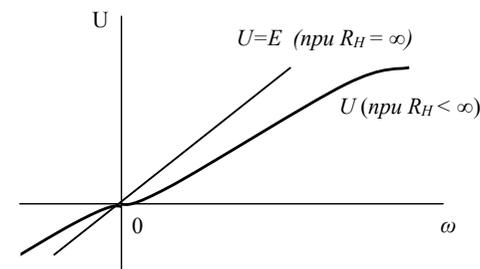


Рис. 9.14. Характеристики управления тахогенератора постоянного тока

Ток, протекающий по цепи якорной обмотки, вызывает реакцию якоря. Линейная характеристика искажается, как показано на рис. 9.14. В характеристике управления имеет место нелинейность в зонах малых и больших скоростей. Приближение характеристики управления к линейной зависимости U от ω достигается за счет увеличения сопротивления R_H нагрузки. Поэтому приемник сигнала от ТГ должен иметь большое входное сопротивление. Тогда харак-

9.4.4. Некоторые особенности вращающихся трансформаторов

Вращающиеся трансформаторы, как и сельсины, могут применяться парно в трансформаторном и индикаторном режимах. Для этого одноименные обмотки роторов двух вращающихся трансформаторов соединяют между собой. Точность преобразований, выполняемых вращающимися трансформаторами, как правило, выше, чем у сельсинов. У вращающихся трансформаторов высших классов (ВТМ-4, ВТМ-5) погрешность составляет 20...30".

Вращающиеся трансформаторы типа ВТМ в зависимости от способа подключения обмоток могут работать как СКВТ или ЛВТ. Они выполняются на напряжение 60 или 115 В, частоту 400 Гц, с коэффициентом трансформации 0,56 или 1, с частотой вращения не более 60 об/мин. Допустимая погрешность воспроизведения напряжения по тригонометрическому и линейному законам, отнесенная к максимальному значению напряжения, составляет: для нулевого класса точности $\pm 0,06\%$; для I класса – $\pm 0,1\%$; II класса – $\pm 0,2\%$; III класса – $\pm 0,3\%$.

Линейные вращающиеся трансформаторы типа ЛВТ-2 выполняют на напряжение 110 или 220 В частотой 427...500 Гц, с коэффициентом трансформации 0,56 и углом поворота ротора до $\pm 65^\circ$. Погрешность ЛВТ не превышает 1% (например, составляет 0,1...0,3% у вращающихся трансформаторов типа ВТМ-Б).

9.5. Генераторные преобразователи скорости вращения

Генераторными преобразователями скорости вращения – *тахогенераторы* (ТГ) постоянного тока, асинхронные и синхронные представляют собой микромашины постоянного или переменного тока, которые работают в генераторном режиме, создавая на выходе электродвижущую силу (ЭДС), величина которой зависит от скорости ω вращения ротора.

9.5.1. Тахогенератор постоянного тока

Тахогенератор постоянного тока – это электрическая машина постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 9.13а) или с возбуждением от постоянного магнита (рис. 9.13б).

тактная пружина 4 образуют *подвижный контактный узел* (ПКУ) 5. Перемещение ρ ($0 \leq \rho \leq \rho_k$) толкателя под действием приложенной к нему силы F условно ограничено затемненным треугольником.

Для разомкнутого состояния контакта создается необходимый по величине зазор $\delta = \delta_p$ между контактными деталями. У мостикового контакта два воздушных зазора. Поэтому мостиковый контакт можно представить как два последовательно соединенных контакта.

2.2.2. Основные параметры коммутирующего контакта

Минимальное расстояние между контактными поверхностями разомкнутого контакта называют *раствором* (δ_p) контакта.

Чтобы обеспечить надежное соприкосновение контактных деталей при замыкании контакта (ПКУ на рис. 2.1 перемещается вниз) под действием силы F , кинематику ПКУ предусматривают такой, чтобы контактные детали 2 и 1 вошли в соприкосновение раньше, чем толкатель 3 в контактном узле дойдет до конечного положения (до упора на рис. 2.1). Благодаря этому контактный мостик 2 после соприкосновения с контактными деталями 1 останавливается, а толкатель 3 продолжает перемещаться в прежнем направлении на некоторое расстояние (Δl_k), сжимая контактную пружину 4. Тогда, если при конечном положении толкателя 3 у замкнутого контакта убрать неподвижные контактные детали 1, то мостик 2 контакта сместится на расстояние Δl_k , называемое *провалом* контакта. На рис. 2.1 приведен график, поясняющий понятия «раствор» и «провал» контакта на примере мостикового контакта.

Когда контакт разомкнут, контактная пружина 4 в подвижном контактном узле ПКУ сжата на величину Δl_H относительно ее длины в свободном состоянии (предварительное сжатие Δl_H контактной пружины обеспечивается при сборке контактного узла). Тем самым контактной пружинной 4 создается так называемое *начальное нажатие* (сила нажатия):

$$F_{нач} = c \Delta l_H,$$

где c – жесткость контактной пружины.

При замкнутом положении контакта, когда толкатель 3 перемещен до нижнего упора (см. рис. 2.1), сила нажатия возрастает до значения

$$F_{\text{кон}} = F_{\text{нач}} + c \Delta l_K = c (\Delta l_H + \Delta l_K)$$

за счет дополнительного сжатия пружины 4 на величину Δl_K . Силу $F_{\text{кон}}$ называют *конечным нажатием*.

2.2.3. Характеристики управления подвижного контактного узла

Обычно мостик в контактном узле представляет собой симметричную конструкцию. Поэтому на каждую из двух деталей 1 (рис. 2.1) контактной стойки со стороны мостика 2 действует одинаковая по величине *сила контактного нажатия* F_K , изменяющаяся при $\delta = 0$ в диапазоне

$$F_{KH} = 0,5F_{\text{нач}} \leq F_K \leq 0,5F_{\text{кон}} = F_{KK},$$

где F_{KH} – начальное контактное нажатие, F_{KK} – конечное контактное нажатие. На рис. 2.2 представлены характеристики управления подвижного контактного узла, отображающие зависимость величины зазора δ и величины контактного нажатия F_K от перемещения ρ толкателя ПКУ.

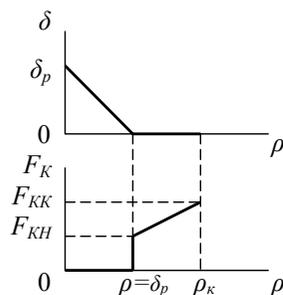


Рис. 2.2. Характеристики управления ПКУ

Для прямоходового ПКУ, показанного на рис. 2.1, полное перемещение ρ_k толкателя 3 равно сумме величин раствора δ_p и провала Δl_K контакта.

Когда контакт замыкается, контактное нажатие F_K возрастает от 0 до $F_{KK} > 0$ при $\rho = \delta_k$. В обратном порядке F_K изменяется, когда контакт размыкается.

где α – угол поворота ротора относительно положения, при котором оси обмоток С1-С2 и Р3-Р4 совпадают; k – коэффициент трансформации ($U_B \rightarrow E_S$, $U_B \rightarrow E_C$ – см. рис. 9.12б). Таким образом вращающийся трансформатор осуществляет преобразование угла поворота α в ЭДС E_S , E_C , которые изменяются соответственно по закону синуса и по закону косинуса в зависимости от угла α .

Если к синусной обмотке (или к косинусной обмотке) подключается какое-либо устройство с небольшим входным сопротивлением, то возникает искажение синусоидальной (косинусоидальной) зависимости E_S от α (E_C от α). Искажение идеальной зависимости обусловлено реакцией якоря, вызывающей появление поперечного магнитного потока. Он наводит дополнительные ЭДС на выходе СКВТ. Для подавления поперечного магнитного потока применяют специальные меры симметрирования вращающегося трансформатора. При *первичном симметрировании* квадратурную обмотку замыкают через сопротивление определенной величины. При *вторичном симметрировании* через сопротивление замыкают роторную обмотку, с которой не снимается выходной сигнал.

9.4.3. Линейный вращающийся трансформатор

Линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ) реализован по определенной схеме так, что первичное или вторичное симметрирование используют также для получения на выходе ЛВТ (на обмотке Р1-Р2) напряжения U_H (рис. 9.12в), удовлетворяющего условию

$$U_H = k U_B \frac{\sin \alpha}{1 + k \cos \alpha}.$$

При выборе значения коэффициента трансформации $k=0,52$ напряжение U_H с точностью до 0,1 % будет линейно зависеть от угла α поворота ротора в диапазоне $-50^\circ < \alpha < 50^\circ$.

зы статора и ротора уложены по две попарно одинаковые обмотки. Магнитные оси статорных обмоток C1-C2 и C3-C4 взаимно перпендикулярны и роторных обмоток P1-P2 и P3-P4 также взаимно перпендикулярны (рис. 9.12а).

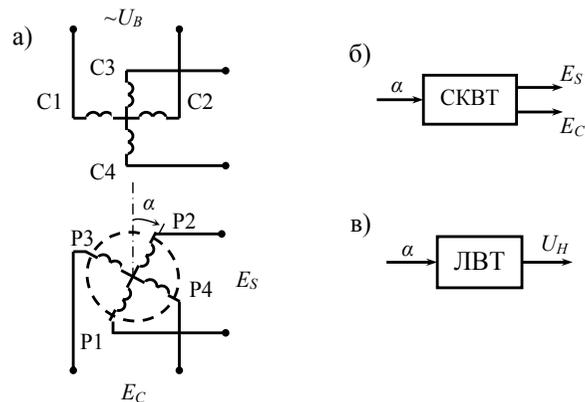


Рис. 9.12. Функциональная схема (а), входы и выходы синусно-косинусного (б) и линейного (в) вращающихся трансформаторов

Концы роторных обмоток соединены с внешней электрической цепью через контактные кольца и щетки, либо с помощью гибких проводников, если угол поворота ротора ограничен.

Обмотку C1-C2 статора называют обмоткой *возбуждения*. На нее подают переменное напряжение U_B . Обмотку C3-C4 называют *квадратурной* или *компенсационной* обмоткой. Обмотки ротора: P1-P2 – *синусная*, P3-P4 – *косинусная*.

9.4.2. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ) работает следующим образом. На обмотку возбуждения C1-C2 вращающегося трансформатора подают переменное напряжение U_B (рис. 9.12а). В таком случае обмотки ротора будут пронизываться пульсирующим магнитным потоком, созданным обмоткой возбуждения. В обмотках ротора будут индуцироваться трансформаторные ЭДС

$$E_S = kU_B \sin \alpha, \quad E_C = kU_B \cos \alpha,$$

2.2.4. Конструктивный узел с пальцевым контактом

Пальцевый контакт снабжен подвижной частью, совершающей поворотное движение. На рис. 2.3 с помощью изобразительных моделей показан контактный узел с пальцевым контактом в трех состояниях: в разомкнутом, в промежуточном и в замкнутом.

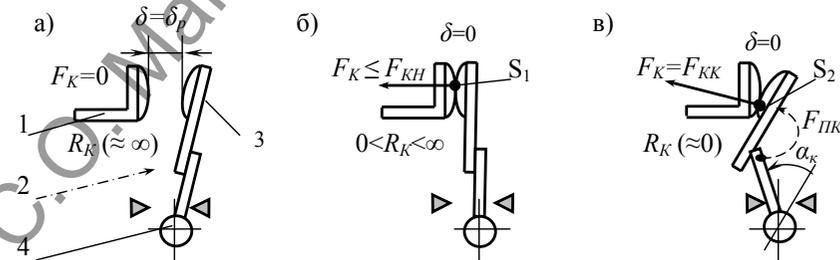


Рис. 2.3. Изобразительные модели контактного узла с пальцевым контактом для разомкнутого (а), промежуточного (б) и замкнутого (в) состояний контакта

В конструкции контактного узла предусматривают неподвижную контактную деталь 1 и подвижный контактный узел (ПКУ) 2 с контактной деталью 3. Контакт имеет один воздушный зазор между контактными деталями. Тип контакта – линейный.

Составные части ПКУ совершают угловые перемещения при повороте оси 4, что приводит к замыканию и размыканию контакта. Контактные детали 1 и 3 выполнены из проводникового материала. Они подключаются к разрыву электрической цепи и создают в ней сопротивление R_K . Конструкцией ПКУ обеспечивается необходимый раcтвор ($\delta = \delta_p$) контакта, начальное нажатие (F_{KH}) и конечное нажатие (F_{KK}). Контактная пружина в изобразительной модели ПКУ на рис. 2.3 не показана. Действие ($F_{ПК}$) контактной пружины представлено пунктирной линией со стрелкой на рис. 2.3 в.

При повороте ПКУ из положения, показанного на рис. 2.3 а, в положение, изображенное на рис. 2.3 в на угол α_K , подвижная контактная деталь 3 соприкасается с неподвижной деталью 1 сначала в точке S_1 (рис. 2.3 б), а затем, пере-

катываясь и скользя по ней, останавливается, имея точку соприкосновения S_2 (рис. 2.3 в).

Характеристики управления ПКУ, т.е. функциональные зависимости δ и F_K от угла α поворота ПКУ, по виду аналогичны характеристикам, которые представлены на рис. 2.2, с той лишь разницей, что вместо линейной координаты ρ нужно рассматривать угол поворота α .

2.2.5. Другие разновидности контактных узлов

Стыковой контакт состоит из двух основных деталей. Подвижная деталь в виде трубы или стержня перемещается вдоль своей оси, входя в соприкосновение и выходя из соприкосновения с неподвижной деталью соответственно при замыкании и размыкании контакта. Контактная поверхность может быть плоской или сферической.

Врубной контакт (рис. 2.4 а) состоит из двух контактных деталей: неподвижной контактной стойки 2 из упругого материала (твердотянутая медь, специальная бронза) и подвижного контактного ножа 1. Стойке придают специальную форму, чтобы она приобрела свойства пружины.

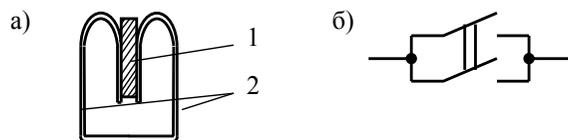


Рис. 2.4. Основные части врубного контакта (а) и его представление параллельным соединением элементарных контактов (б)

Контактный нож 1, перемещаясь вверх при размыкании контакта, выходит из соприкосновения с неподвижной стойкой 2 и, двигаясь вниз, входит в стойку (как показано на рис. 2.4 а), разжимая ее концы. Подвижный контактный узел поворотный. Сопротивление R_K создается между неподвижной контактной стойкой 2 и контактным ножом 1. Соприкосновение этих контактных деталей происходит по плоскости. Можно представить, что врубной контакт

тельного входного сигнала и получение информации об алгебраической сумме углов поворота роторов сельсинов.

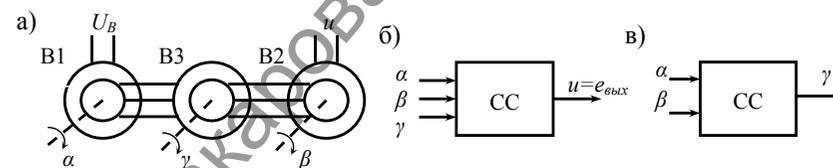


Рис. 9.11. Сельсинная система СС с дифференциальным сельсином (а) и ее входы-выходы в трансформаторном (б) и индикаторном (в) режимах работы

В *трансформаторном режиме* выходной сигнал u , снимаемый с однофазной обмотки сельсина В2, по аналогии с (9.5) определяется выражением

$$e_{\text{вых}} = E_m \cos(\beta - \alpha - \gamma) \sin \omega t,$$

где α , β , γ – углы поворота роторов относительно статоров у сельсинов В1, В2, В3 соответственно (рис. 9.11б). Функция дифференциального сельсина отличается от функции обычного сельсина тем, что дифференциальный сельсин является не только сельсином-датчиком (В3), но и осуществляет передачу сигнала к сельсину приемнику (В2) от другого сельсина-датчика (В1).

В *индикаторном режиме* на однофазные обмотки сельсинов В1 и В2 подается переменное напряжение U_B (в этом случае $u = U_B$ на рис. 9.11а). Входными сигналами сельсинной системы (рис. 9.11в) являются углы α и β . Выходной сигнал $\gamma = \alpha + \beta$ – угол поворота ротора дифференциального сельсина (В3) равен алгебраической сумме углов поворота роторов сельсинов В1 и В2.

Для алгебраического суммирования угловых перемещений применяют дифференциальные сельсины типов ДИД, НЭД.

9.4. Вращающиеся трансформаторы

9.4.1. Элементы конструкции

Вращающийся трансформатор (индукционный электромашинный датчик) – небольшая электрическая машина, аналогичная по конструкции асинхронной машине с фазным ротором с равномерным воздушным зазором. В па-

ростью ротор сельсина-приемника будет вращаться с той же скоростью и «следить» за ротором сельсина-датчика. Вращающий момент обеспечивает синхронность движения роторов, поэтому его называют *синхронизирующим моментом*. При малых углах рассогласования положений роторов величина синхронизирующего момента определяется формулой

$$M_{\text{синх}} = M_m \sin(\beta - \alpha),$$

где M_m – момент, действующий на ротор при рассогласовании $\beta - \alpha = \pi/2$.

На роторы сельсинов действуют синхронизирующие моменты противоположных направлений. Для сельсина-датчика $M_{\text{синх}}$ будет тормозным моментом, для сельсина-приемника – движущим. Положение роторов, при котором рассогласование $\beta - \alpha = \pi$ и момент $M_{\text{синх}} = 0$, является неустойчивым.

Под действием синхронизирующего момента устраняется рассогласование положений роторов ($\beta \rightarrow \alpha$) с некоторой погрешностью, на которую влияют скорость вращения, моменты трения в подшипниках и контактных кольцах, неточность балансировки роторов и другие факторы. Эту погрешность обычно определяют экспериментально. Для сельсинов первого и второго классов точности она не превышает $1,5^\circ$.

Для передачи углов поворота на расстояние применяют контактные сельсины-датчики типов НД, СТСМ и бесконтактные сельсины-датчики типов БД, СБМ. С датчиками типа НД используются сельсины-приемники типов БС и НС, с датчиками типа БД – бесконтактные сельсины-приемники типа БС. Максимальная статическая погрешность не превышает: $\pm 0,75^\circ$ для сельсинов I класса точности, $\pm 1,5^\circ$ для II класса точности, $\pm 2,5^\circ$ для III класса точности.

9.3.6. Система с дифференциальным сельсином

Дифференциальный сельсин имеет шесть обмоток. Три статорные обмотки, так же как и три роторные обмотки соединены в звезду. Магнитные оси, соединенных в звезду обмоток, сдвинуты относительно друг друга на угол $2\pi/3$.

Дифференциальный сельсин ВЗ включают между двумя обычными сельсинами В1 и В2 (рис. 9.11а). Он обеспечивает возможность введения дополни-

состоит из двух элементарных плоскостных контактов, соединенных параллельно (рис. 2.4 б).

Розеточный контакт – разновидность врубного контакта. Он состоит из подвижного контактного стержня и нескольких неподвижных сегментов (ламель). Контактный стержень совершает возвратно-поступательное движение вдоль своей оси, входя в соприкосновение с ламелями и выходя из соприкосновения при замыкании и размыкании контакта. ПКУ прямоходовой.

Роликовый контакт имеет три основные детали: две неподвижные, которые замыкаются и размыкаются третьей деталью – подвижным роликом. В зависимости от контактной поверхности ролика (цилиндрическая или шарообразная) контактное соединение может быть линейным или точечным.

2.3. Переходное сопротивление контакта

2.3.1. Переходное сопротивление и основные факторы,

от которых оно зависит

В месте перехода электрического тока из одной контактной детали в другую деталь замкнутого контакта (при $\delta=0$) возникает электрическое сопротивление R_{II} , которое называют *переходным сопротивлением*. Это сопротивление создается контактом в электрической цепи, к которой присоединен контакт. Оно составляет обычно основную часть сопротивления R_K коммутирующего контакта, когда контакт замкнут.

Величина сопротивления R_{II} зависит от ряда факторов, к числу которых относятся: сила нажатия F_K , температура θ в месте соприкосновения деталей, наличие поверхностных пленок окисления деталей и др. На основании опытных данных полагают [2] (в единицах измерения системы СИ) :

$$R_{II} = \frac{k}{(0,102 F_K)^n}, \quad (2.1)$$

где k – коэффициент, значение которого зависит от материала контакта, а также от способа обработки и состояния контактных поверхностей (например, принимают для медного контакта $k=(0,14 \dots 0,18)10^{-3}$, для серебряного –

$k=0,06 \cdot 10^{-3}$); n – коэффициент формы контактной поверхности (для точечного контакта $n=0,5$, для линейного $n=0,75$, для плоскостного $n=1$). Например, переходное сопротивление серебряного плоскостного контакта составляет: $R_{II} \approx 0,06$ Ом при $F_K=0,01$ Н и $R_{II} \approx 0,0001$ Ом при $F_K=5$ Н.

Общий вид графика зависимости переходного сопротивления R_{II} от контактного нажатия F_K показан на рис. 2.5а (семейство характеристик управления показано на рис. 1.13а).

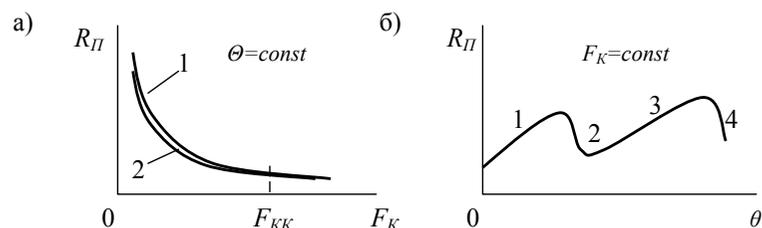


Рис. 2.5. Зависимость переходного сопротивления контакта от силы нажатия (а) и от температуры (б)

Кривая 1 соответствует процессу возрастания контактного нажатия F_K , кривая 2 – снижению нажатия F_K . Отличие кривой 2 от 1 объясняется существованием остаточных деформаций отдельных бугорков, по которым происходит соприкосновение контактных деталей. Величину конечного нажатия F_{KK} выбирают из условия, когда при $F_K > F_{KK}$ переходное сопротивление R_{II} изменяется незначительно. У высокоточных аппаратов создается контактное нажатие $F_{KK} > 20$ Н, обеспечивающее переходное сопротивление в единицы и десятки микро Ом на контакте, выполненном из серебра.

Характерная зависимость переходного сопротивления медного контакта от температуры показана на рис. 2.5б. Возрастание переходного сопротивления R_{II} по мере увеличения температуры θ нагрева контактной поверхности примерно до 200°C на участке 1 определяют по эмпирической формуле [2]

$$R_I = R_{I0} \left(1 + \frac{2}{3} k_0 \theta \right),$$

Для трансформаторного режима работы часто применяют сельсины, имеющие неявнополюсную конструкцию с распределенными обмотками на статоре и на роторе. Чувствительность примерно равна 1 В/град; погрешность измерения угла составляет $\pm(20-30)'$.

9.3.5. Индикаторный режим совместной работы двух сельсинов

В индикаторном режиме работы сельсинов реализуется дистанционная передача угла $\alpha \rightarrow \beta$ от сельсина-датчика ВС сельсину-приемнику ВЕ (рис. 9.10а).

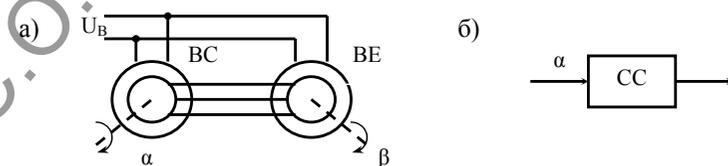


Рис. 9.10. Функциональная схема системы СС сельсинов, работающих в индикаторном режиме (а) и входы-выходы системы (б)

Статорная однофазная обмотка сельсина-приемника ВЕ, как и аналогичная обмотка сельсина-датчика ВС, подключена под переменное напряжение U_B , а положение ротора сельсина ВЕ не фиксируется. Он может свободно вращаться на своей оси.

При одинаковом положении роторов сельсинов ВС и ВЕ по отношению к статорным обмоткам возбуждения ($\beta=\alpha$) ЭДС индукции (9.1) в соответствующих фазовых обмотках равны между собой и противоположны по направлению. Следовательно, результирующие ЭДС в каждой паре соединенных между собой фазовых обмоток равны нулю, и ток в цепях роторов отсутствует. Равенство фазовых ЭДС будет нарушено, если $\beta \neq \alpha$. В цепи роторов возникнут токи. Взаимодействуя с магнитными потоками обмоток статоров, они создадут вращающие моменты. Поэтому, если ротор сельсина-датчика после поворота на заданный угол α остановить, то ротор сельсина-приемника под действием вращающего момента будет вращаться до тех пор, пока не встанет в положение $\beta=\alpha$. При непрерывном вращении ротора сельсина-датчика с определенной ско-

$$e_{\text{вых}} = E_m \cos(\beta - \alpha) \sin \omega t, \quad (9.5)$$

где α – угол поворота ротора сельсина-датчика, E_m – амплитудное значение ЭДС при $\beta = \alpha$.

Обычно угол поворота ротора сельсина-приемника фиксируют в положении $\beta = \pi/2$. Тогда

$$e_{\text{вых}} = E_m \sin \alpha \sin \omega t,$$

и амплитуда $E_{m \text{ вых}}$ ЭДС на выходе сельсина-приемника определяется выражением

$$E_{m \text{ вых}} = E_m \sin |\alpha|.$$

Для малых значений угла α принимают кусочно-линейную зависимость

$$E_{m \text{ вых}} = E_m |\alpha|$$

для характеристики управления датчика угла поворота.

Изменение знака угла α приводит к изменению фазы ЭДС $e_{\text{вых}}$ на угол, равный 180° . Таким образом, трансформаторный режим работы двух сельсинов аналогичен рассмотренному выше амплитудному режиму работы одного сельсина. Погрешность преобразования угла в ЭДС составляет $5 \dots 10'$.

На рис. 9.9а показана функциональная схема системы, состоящей из двух сельсинов, работающих в трансформаторном режиме. На этой схеме изображены сельсин-датчик ВС и сельсин-приемник ВЕ, у которых обмотка возбуждения расположена на статоре, а синхронизирующая трехфазная обмотка – на роторе. На рис. 9.9б показаны входной и выходные сигналы сельсинной системы (ССТ), работающей в трансформаторном режиме.

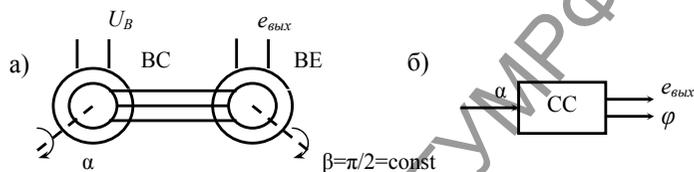


Рис. 9.9. Функциональная схема системы ССТ сельсинов, работающих в трансформаторном режиме (а) и входы-выходы системы (б)

где $R_{\text{по}}$ – переходное сопротивление (Ом) контакта при $\theta = 0^\circ \text{C}$, k_0 – температурный коэффициент сопротивления материала контакта ($^\circ \text{C}^{-1}$) (для этого участка показано семейство внешних характеристик на рис. 1.13 б). Снижение переходного сопротивления на участке 2 происходит вследствие размягчения материала и увеличения в результате этого действительной площади соприкосновения контактных деталей при неизменном нажатии F_K . При дальнейшем увеличении температуры переходное сопротивление увеличивается на участке 3, пока не происходит плавление контактных деталей в точках касания. Детали свариваются, и переходное сопротивление падает практически до нуля (участок 4).

Переходное сопротивление очень чувствительно к окислению контактных поверхностей, поскольку окислы многих металлов являются плохими проводниками тока. У медных открытых контактов вследствие их окисления переходное сопротивление может возрасти в тысячи раз. Интенсивность окисления растет при повышении температуры.

Серебро, олово, цинк в значительно меньшей мере, чем медь подвержены окислению. Кроме того, например, окислы серебра имеют электропроводность соизмеримую с электропроводностью чистого серебра. Поэтому размыкаемые контакты, длительно работающие под током не выключаясь, выполняют из серебра или из металлокерамики на основе серебра. Контакты, рассчитанные на малые токи и малые нажатия, могут быть выполнены из золота или платины.

2.3.2. Глубина контактной коммутации электрической цепи

Влияние контакта на коммутируемую им цепь характеризуют глубиной коммутации $h = R_{K\text{раз}} / R_{K\text{зам}}$, которая представляет собой отношение сопротивлений $R_{K\text{раз}}$ и $R_{K\text{зам}}$ контакта, когда он разомкнут и когда он замкнут соответственно. Для аппаратов контактной коммутации глубина коммутации находится в пределах от 10^7 до 10^{14} . На практике при правильной эксплуатации ЭА (когда выдерживается регламент технического обслуживания аппарата) считают, что контакт изменяет величину сопротивления в электрической цепи от бесконечности до нуля при замыкании, а при размыкании в обратную сторону – от нуля

до бесконечности. В этом случае, полагая для замкнутого контакта его сопротивление $R_K \approx R_{II} \rightarrow 0$, можно представить:

$$R_K = \begin{cases} \infty & \text{при } \delta = \delta_p, F_K = 0 - \text{контакт разомкнут,} \\ 0 & \text{при } \delta = 0, F_K = F_{KK} - \text{контакт замкнут.} \end{cases} \quad (2.2)$$

2.4. Электрическая дуга коммутирующего контакта

2.4.1. Возникновение электрических разрядов на коммутирующем контакте

Когда контакт замыкается в электрической цепи с источником напряжения, его контактные детали быстро сближаются, возрастает напряженность электрического поля между ними и происходит электрический пробой воздушного промежутка между контактными деталями при расстояниях, измеряемых долями миллиметра. Возникшая искра и другие формы газового разряда не развиваются, но во время действия электронной эмиссии, когда электроны бьют по аноду, металл анода откладывается на катоде в виде тонких игл. Из-за первоначального соударения контактных деталей возможны «отскоки» и вибрация подвижной контактной детали. Сопротивление R_K контакта в этот короткий период изменяется непредсказуемым образом.

Когда контакт размыкается, контактное нажатие уменьшается, возрастает переходное сопротивление (см. п. 2.3). При силе тока менее 0,1 А и напряжении на контакте 250...300 В возникает тлеющий разряд. Такой разряд характерен для маломощных реле. В более мощных аппаратах тлеющий разряд является переходным этапом к разряду в виде электрической дуги. Дуговой разряд имеет место только при относительно больших токах. Для металлических контактных деталей минимальный ток электрической дуги составляет примерно 0,5 А. Температура центральной части пламени дуги достигает 6000...7000 °К и более [2]. Поэтому электрическая дуга представляет большую опасность для аппарата и окружающей среды.

трехфазного напряжения с неизменной амплитудой. В сельсине образуется круговое вращающееся магнитное поле, и в обмотке ротора, ось которой сдвинута на угол α относительно оси обмотки фазы А (начала отсчета), наводится ЭДС

$$e_{\text{вых}} = \frac{3E_{1m}}{2k_T} \cos(\omega t - \varphi),$$

где E_{1m} – амплитуда фазной ЭДС статора. Характеристика управления приобретает вид

$$\varphi = \alpha. \quad (9.4)$$

Вход и выход сельсина-датчика (СДФ), применяемого режиме фазовращателя, показаны на рис. 9.8г.

9.3.4. Трансформаторный режим совместной работы двух сельсинов

Сельсины применяют попарно, создав между двумя сельсинами электрические связи. Такие сельсины могут работать в качестве датчиков угла поворота или в качестве элементов дистанционной передачи угла. Датчиками являются сельсины, работающие в трансформаторном режиме.

Трехфазные синхронизирующие обмотки двух сельсинов соединяют между собой одноименными фазами. Входной сигнал – это угол α поворота ротора – получает сельсин, называемый *сельсином-датчиком*. Его обмотка возбуждения подключена к однофазной сети переменного тока. В трехфазной обмотке сельсина-датчика индуцируются ЭДС в соответствии с выражениями (9.1). Поэтому по трехфазным обмоткам обоих сельсинов будут протекать переменные токи, возбуждая магнитные потоки.

Обмотка возбуждения второго сельсина, называемого *сельсином-приемником*, в этом режиме не подключена под напряжение. Возникающая в ней ЭДС индукции является выходным сигналом сельсина-приемника. Его ротор фиксируется в определенном положении.

Если ротор сельсина-приемника, повернут на угол β относительно осевой линии его обмотки А, то в обмотке возбуждения ротора будет наведена переменным магнитным потоком ЭДС

9.3.2. Сельсин-датчик, работающий в амплитудном режиме

При реализации амплитудного режима начало отсчета угла перемещают на $\pi/3$ по направлению к фазе В (линия $m-n$ на рис. 9.8а). Тогда относительно угла $\alpha' = \pi/3 - \alpha$ в новой системе отсчета

$$e_{AB} = e_A - e_B = \sqrt{3} k_T U_{Bm} \sin \alpha' \sin \omega t$$

Характеристика управления сельсина в амплитудном режиме приобретает вид

$$E_{ABm} = \sqrt{3} k_T U_{Bm} |\sin \alpha'| = k_C |\sin \alpha'|,$$

где E_{ABm} – амплитудное значение ЭДС e_{AB} , $k_C = \sqrt{3} k_T U_{Bm}$ – передаточный коэффициент сельсина в амплитудном режиме. При малых α' имеем приближительное равенство $\sin \alpha' \approx \alpha'$ и

$$E_{ABm} \approx k_C |\alpha'|. \quad (9.3)$$

При изменении знака входной величины α' фаза φ переменной ЭДС e_{AB} на выходе изменяется на угол π .

Вход и выходы сельсина-датчика (СДА), применяемого в амплитудном режиме работы, показаны на рис. 9.8в.

Из-за неточности изготовления магнитопровода и обмоток сельсина возникают статические погрешности, приводящие к отклонению амплитуды ЭДС от кусочно-линейной зависимости (9.3). Статические погрешности соизмеримы с полезным выходным сигналом при очень малых значениях α' .

При вращении ротора в выходном сигнале кроме статических погрешностей возникает так называемая скоростная погрешность. Она обусловлена появлением в обмотках индуцированных ЭДС. Скоростная погрешность растет с увеличением скорости вращения ротора сельсина. Поэтому скорость вращения ротора ограничивают до значений 250...500 об/мин.

9.3.3. Сельсин-датчик, работающий в режиме фазовращателя

Для режима фазовращателя применяется иная схема подключения сельсина, в соответствии с которой обмотка статора получает питание от источника

2.4.2. Влияние электрической дуги на коммутируемую цепь

Большая концентрация заряженных частиц (электронов и положительно заряженных ионов) в пламени электрической дуги способствует повышению электропроводности пламени до уровня электропроводности проводников. При этом дуга имеет практически активное сопротивление (R_D).

Можно представить, что коммутирующий контакт, разомкнувшись, при определенных условиях не прервет электрический ток в цепи из-за горячей на контакте электрической дуги. Нужно учитывать, что создаваемое им в электрической цепи сопротивление

$$R_K = \begin{cases} R_{II} & \text{при } \delta = 0, F_K > 0 \text{ (дуги нет)} \\ R_D & \text{при } \delta > 0, F_K = 0 \text{ (дуга горит)} \end{cases} \quad (2.3)$$

зависит не только от управляющего воздействия ρ (см. рис.2.2), которое изменяет величины зазора δ и контактного нажатия F_K , но и от возмущающих воздействий, к которым относятся отключаемый ток I_0 в цепи и напряжение U источника энергии. В начале коммутационного процесса при размыкании контакта его сопротивление $R_K = R_{II}$ возрастает (см. п. 2.3.1, рис. 2.5а) пока зазор $\delta=0$, а затем при $\delta>0$ и горячей дуге приобретает значение R_D , которое зависит от условий горения дуги.

2.4.3. Условия гашения электрической дуги постоянного тока

Представим, что коммутирующий контакт аппарата подключен к электрической цепи с источником напряжения U постоянного тока. Цепь реализована по последовательной схеме в соответствии с рис. 1.10а. Контакт размыкается, разрывая электрическую цепь. На контакте горит электрическая дуга.

На силу тока i в цепи влияют: сопротивление R проводников и приемника электроэнергии, индуктивность L цепи и сопротивление $R_K = R_D$, создаваемое в цепи электрической дугой. Поэтому

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + iR_D = iR + L \frac{di}{dt} + U_D, \quad (2.4)$$

где U_D – падение напряжения на дуге.

Для погасания дуги необходимо, чтобы ток i в цепи уменьшился от начального значения $I_0=U/R$ до нуля. Из этого требования и выражения (2.4) следует условия гашения электрической дуги:

$$\frac{di}{dt} < 0 \Rightarrow U_d > U - iR, \quad (2.5)$$

которые должны выполняться на всем времени горения электрической дуги на коммутирующем контакте.

Общий прием гашения дуги, как следует из (2.4) и (2.5), сводится к тому, что необходимо повысить сопротивление R_d дуги и, соответственно, повысить падение напряжения U_d на дуге до уровня, определяемого правой частью условий (2.5).

2.4.4. Особенности горения и гашения электрической дуги переменного тока

Представим, что коммутирующий контакт аппарата подключен к электрической цепи с источником напряжения U переменного тока.

Электрическая дуга может не загореться при размыкании контакта, если начало размыкания совпадает во времени с переходом тока через нулевое значение. При разрыве цепи контактом в середине полупериода переменного тока и возникновении дуги, условия (2.5) ее гашения сохраняются до конца полупериода переменного тока. Процесс гашения дуги переменного тока в этом случае аналогичен процессу гашения дуги постоянного тока. Если условия (2.5) не выполнены, то загоревшаяся дуга погаснет при последующем переходе переменного тока через ноль. Дуга не возобновится после *бестоковой паузы*, если во время *бестоковой паузы* рост электрической прочности ионизированного промежутка между контактными деталями будет опережать возрастание падения напряжения на контакте (падения напряжения U_d на дуге).

При погасании дуги падение напряжения между контактными деталями возрастает от значения напряжения гашения дуги до соответствующего мгновенного значения напряжения источника $u=U_m \sin \omega t$ или более (U_m – амплитуда

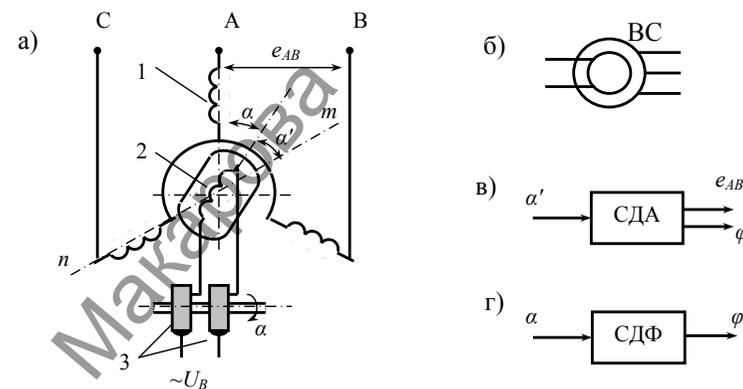


Рис. 9.8. Функциональная схема сельсина-датчика (а), его обозначение на электрической схеме (б), входы и выходы при работе в амплитудном (а) и фазовом (б) режимах

Обмотка возбуждения 2 расположена на роторе. Если она получает питание от однофазной сети $\sim U_B$ через кольца и щетки 3, то магнитный поток, действующий по осевой линии обмотки возбуждения 2, наводит соответствующие ЭДС в фазных обмотках статора:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= k_T U_{Bm} \cos \alpha \sin \omega t, \\ e_B &= k_T U_{Bm} \cos(\alpha - 2\pi/3) \sin \omega t, \\ e_C &= k_T U_{Bm} \cos(\alpha + 2\pi/3) \sin \omega t, \end{aligned} \right\} \quad (9.1)$$

где k_T – коэффициент трансформации между фазной статорной и роторной обмотками при их соосном расположении, ω – частота напряжения возбуждения (за начало отсчета угла α поворота ротора принята осевая линия обмотки А статора).

Линейная ЭДС:

$$e_{AB} = e_A - e_B = \sqrt{3} k_T U_{Bm} \sin(\pi/3 - \alpha) \sin \omega t \quad (9.2)$$

Таким образом, фазовые ЭДС e_A , e_B , e_C сельсина и линейная ЭДС, например, e_{AB} , зависят в соответствии с (9.1) и (9.2) от угла α поворота ротора. Поэтому сельсин может быть использован в качестве датчика угла.

щая в индикаторном режиме (см. рис. 9.11а), и дисковый кодовый преобразователь (рис. 9.6), соединяемый с ротором дифференциального сельсина. Расположение окон на дорожках кодового диска должно быть симметричным относительно диаметра диска, чтобы определить не только величину, но и знак угла рассогласования. Для получения кода знака рассогласования предусматривается дополнительная дорожка на диске и канал формирования логической переменной на выходе датчика.

9.3. Сельсины

9.3.1. Сельсин-датчик

Сельсин – наибольшая электрическая машина, которую применяют в качестве датчика угла поворота (индукционный электромашинный датчик).

В сельсине есть две обмотки: однофазная (обмотка возбуждения) и трехфазная (обмотка синхронизации). У сельсинов малой мощности трехфазная обмотка синхронизации обычно располагается в пазах статора, а обмотка возбуждения на роторе. Обмотка возбуждения подключается в электрической цепи переменного тока через контактные кольца. В сельсинах большой мощности на роторе располагается трехфазная синхронизирующая обмотка, обмотка возбуждения на статоре.

Применяются также бесконтактные сельсины. Конструктивно они выполняются одним из следующих способов. При первом способе кольцевая обмотка возбуждения располагается на статоре и, благодаря специальной конструкции магнитопровода ротора, создает в роторе магнитный поток, поворачивающийся вместе с ротором. Трехфазная обмотка синхронизации расположена также на статоре. При втором способе обмотка ротора получает питание от вращающейся совместно с ротором вторичной обмотки кольцевого трансформатора возбуждения, первичная обмотка которого расположена на статоре. Трехфазная обмотка синхронизации находится также на статоре.

На рис. 9.8а, рис. 9.8б изображены функциональные схемы сельсина, у которого трехфазная обмотка синхронизации 1 (А, В, С) размещена на статоре.

переменного напряжения, ω – угловая частота). Этот процесс называют процессом *восстановления напряжения на дуговом промежутке*. В зависимости от параметров цепи он может быть аperiodическим или колебательным. Напряжение на дуговом промежутке практически может достигать значения, равного $2U_m$. Частота переходного колебательного процесса составляет тысячи или один-два десятка тысяч герц [10].

2.5. Способы гашения электрической дуги, горящей на коммутирующем контакте

В контактной системе аппаратов контактной коммутации электрических цепей применяют устройства, способствующие гашению электрической дуги. С их помощью реализуются следующие способы гашения электрической дуги:

- 1) механическое растягивание электрической дуги;
- 2) охлаждение дуги;
- 3) повышение давления в зоне дуги;
- 4) гашение дуги в вакууме;
- 5) размыкание контакта в цепи переменного тока при прохождении тока через ноль;
- 6) разрыв дуги на несколько коротких дуг;
- 7) перевод тока с коммутирующего контакта в ключ, подключенный параллельно контакту в электрической цепи.

2.5.1. Механическое растягивание электрической дуги.

В конструкции некоторых контактных узлов предусматривается значительный по величине раствор контакта (см. п. 2.2.2) и быстрое перемещение подвижной контактной детали с помощью пружины.

Когда контакт замкнут, пружина сжата относительно своего свободного состояния, контакт размыкается – когда снимается упор, сдерживающий пружину, и она расправляется, перемещая подвижный контактный узел (ПКУ). Контактные детали расходятся. Длина дуги l_d увеличивается до критического значения $l_{кр}$, при котором она гаснет. Значение $l_{кр}$ тем больше, чем больше

сила тока I_0 отключаемой цепи. Так при $I_0=600$ А и $U=220$ В критическая длина дуги l_{KR} составляет примерно 25 см; градиент напряжения E_D в свободно горящей дуге: $E_D=10\dots 15$ В/см [3].

Механическое растягивание дуги не исключает значительное обгорание контактных деталей. Для уменьшения обгорания контакта стремятся получить большие скорости расхождения контактных деталей за счет применения мощных отключающих пружин.

В низковольтных аппаратах механическое растягивание дуги применяют при отключении относительно небольших токов.

2.5.2. Охлаждение электрической дуги.

Электрическую дугу можно охлаждать, обдувая ее потоком воздуха или инертного газа. Однако при таком способе требуется применять дополнительные весьма сложные устройства. Можно перемещать дугу в неподвижном воздухе. Тогда эффект увеличения теплоотвода от дуги будет принципиально таким же, как при обдувании ее воздухом. С ростом скорости движения дуги усиливается ее охлаждение, и градиент напряжения E_D резко возрастает. Так при токе $I=600$ А и напряжении $U=220$ В градиент напряжения E_D в перемещаемой со скоростью 100 м/с дуге составит примерно 45 В/см, критическая длина дуги l_{KR} будет около 5 см.

Для перемещения дуги используется так называемое *магнитное дутье*. Оно создается в результате взаимодействия тока дуги i_D с магнитным полем. В низковольтных аппаратах внешнее по отношению к дуге магнитное поле может быть создано:

- 1) катушкой, включенной последовательно с контактом, на котором возникает дуга;
- 2) катушкой, включенной на напряжение сети;
- 3) постоянным магнитом.

Дуга перемещается под действием электродинамической силы F (см. п. 1.7.4), возникающей при взаимодействии тока с магнитным полем. При этом

ИП2 в них применяется тот или иной ИПП из числа преобразователей, рассмотренных выше. Первичный измерительный преобразователь ИПП может быть изготовлен для конкретного объекта с целью контроля его определенного параметра. В специализированной конструкции ИПП в качестве чувствительного элемента может использоваться мембрана, преобразующая давление в перемещение своего центра; сильфон, изменяющий под давлением свою длину; поплавков, перемещаемый уровнем жидкости; биметаллическая пластина, деформирующаяся при изменении температуры и т. д.

В следящих и позиционных электроприводах помимо таких датчиков применяют *измерители рассогласования*, предназначенные для непрерывной оценки разности между входным задающим воздействием и фактическим уровнем переменной на выходе, которая должна следовать за изменением величины входного воздействия. Такие измерители рассогласования называют также *датчиками рассогласования*. На выходе они формируют электрический сигнал $\Delta U=c(\alpha_z-\alpha_o)$, пропорциональный разности углов α_z поворота задающего органа, например, рукоятки управления, и α_o его отработки электроприводом.

Первоначально для датчиков рассогласования использовались резистивные измерительные преобразователи (малый срок службы). В настоящее время применяются сельсины (см. п. 9.3) и вращающиеся трансформаторы (см. п. 9.4), работающие в трансформаторном режиме. Ротор сельсина-приемника обычно соединяют с задающим органом, ротор сельсина-датчика – с исполнительным органом электропривода (в этом случае положение ротора сельсина-приемника не фиксируется). Таким же образом реализуют датчик рассогласования на вращающихся трансформаторах. Одноименные синусные и косинусные обмотки двух вращающихся трансформаторов соединяют между собой. Выходной сигнал снимается с обмотки возбуждения одного из трансформаторов. У второго трансформатора обмотка возбуждения получает питание по цепи переменного тока.

Для синтеза датчика рассогласования с цифровым выходом может быть использована сельсинная система с дифференциальным сельсином, работаю-

9.2.5. Энкодеры

Энкодер (англ. *rotary encoder*) представляет собой устройство, предназначенное для преобразования угла поворота вращающегося объекта (вала) в электрические сигналы, позволяющие определить угол его поворота. По существу энкодер представляет собой датчик угла поворота, формирующий на выходе импульсный цифровой код.

По способу выдачи информации энкодеры подразделяют на *инкрементные* (накапливающие или можно встретить название «инкрементальные») и *абсолютные* (позиционные).

Инкрементный энкодер используется, когда нет необходимости сохранять информацию об абсолютном положении объекта после выключении энкодера. Если вновь включить инкрементный энкодер, то отсчет угла поворота начнется с нуля, а не с угла, на который он был выставлен до момента выключения. В энкодерах этого типа используются счетчики импульсов, формируемых в процессе поворота объекта. Поэтому инкрементные энкодеры используются для определения скорости вращения.

Абсолютный энкодер выдает цифровой код, различный для каждого положения объекта (см. п. 9.2.4). Он позволяет определить угол поворота в случае исчезновения и восстановления питания. Поэтому при возникновении такого случая нет необходимости в возвращении объекта в исходное положение, чтобы правильно производить отсчет угла поворота.

По принципу действия энкодеры подразделяют на оптические, резистивные, магнитные индуктивные, механические. По допустимому углу поворота вала – на с ограниченным по углу диапазоном работы и с неограниченным по углу диапазоном работы.

9.2.6. Датчики на основе измерительных преобразователей положения

На основе измерительных преобразователей положения (ИПП) реализуют датчики различных физических величин: давления, уровня, температуры и др. в соответствии со схемой рис. 9.1. В качестве измерительного преобразователя

возрастает плотность тока и давление в стволе дуги, что также способствует увеличению градиента напряжения E_D .

Конструкцию *дугогасительного устройства* (ДГУ) стремятся создать такой, чтобы гасить дугу в малом объеме, при малых звуковом и световом эффектах и при малом износе частей электрического аппарата. С этой целью применяют *дугогасительные камеры* (рис. 2.6а) с продольными (рис. 2.6б), зигзагообразными (рис. 2.6в) или иными специальной формы щелями в приемнике дуги 1, выполненном из изоляционного жаропрочного материала, например, из асбестоцемента.

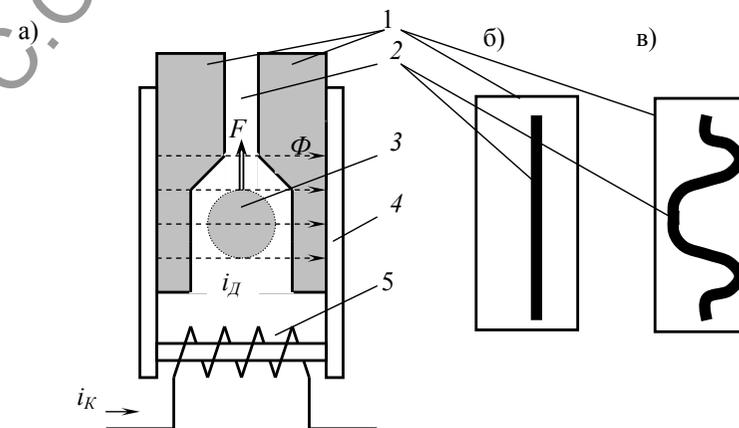


Рис. 2.6. Дугогасительная камера магнитного дутья (а), продольная щель, вид сверху (б), зигзагообразная щель, вид сверху (в)

Магнитный поток Φ (показанный пунктирными линиями на рис. 2.6а) создается катушкой 5, по виткам которой протекает ток i_K , и магнитопроводом 4, охватывающим приемник 1 электрической дуги.

При взаимодействии тока i_D дуги 3 с магнитным потоком Φ возникает электродинамическая сила F , под действием которой дуга перемещается в щель 2. В узкой щели теплоотвод от дуги увеличивается, и она гаснет.

В настоящее время для дугогасительной камеры чаще применяют последовательную катушку магнитного дутья. Дугогасительное устройство с после-

довательной катушкой магнитного дутья является неполяризованным устройством. При изменении направления тока i_K ($i_K = i_D$) в обмотке катушки (в цепи) изменяется направление магнитного поля, создаваемого катушкой, а направление электродинамической силы F_{Σ} , действующей на дугу, остается неизменным.

Если магнитопровод катушки магнитного дутья не насыщен, то величина силы F пропорциональна квадрату тока i_D дуги. При малых токах ($i_K = i_D$) сила F мала. Поэтому для быстрого гашения дуги приходится применять катушку с относительно большим количеством витков.

Дугогасительное устройство с катушкой, подключенной под напряжение сети, создает силу F , пропорциональную отключаемому току i_D ($i_D \neq i_K$), так как ток i_K катушки магнитного дутья не зависит от тока i_D дуги ($i_K = \text{const}$). При малом токе дуги i_D создаваемая электродинамическая сила F_{Σ} пропорциональна произведению $i_K i_D$. Соответственно, сила F больше аналогичной силы, создаваемой с помощью последовательной катушки. Недостатки дугогашения с катушкой, подключенной под напряжение сети, проявляются в том, что: а) при снижении напряжения в сети, например, при токах короткого замыкания, когда $i_K \rightarrow 0$, аппарат оказывается без надежного дугогашения; б) направление электродинамической силы F зависит от направлений токов i_K и i_D .

Дугогасительное устройство с постоянным магнитом позволяет устранить первый из отмеченных недостатков. Однако при этом электрический аппарат становится поляризованным. Поэтому приходится применять специальные меры для сохранения неизменным направления электродинамической силы, действующей на дугу, если направление тока i_D изменяется.

2.5.3. Повышение давления в зоне дуги.

В некоторых электрических аппаратах, например, пакетных выключателях, кнопках управления и др. коммутирующие контакты помещены в плотно закрытые камеры. Энергия загоревшейся электрической дуги расходуется на увеличение кинетической энергии молекул газа. Давление в камере увеличива-

той x , при которых неподвижные излучающие элементы находятся за пластиной. Например, позиции 5 соответствует положение пластины, при котором окна первой и третьей сверху дорожек открыли световой поток для соответствующих фотоприемников (фотодиодов). Через вторую и четвертую дорожки световые потоки не проходят к соответствующим фотоприемникам.

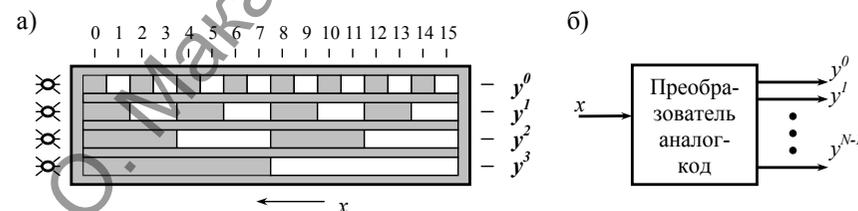


Рис. 9.7. Изобразительная модель кодовой пластины (а) и входы-выходы $N=4$ -разрядного кодового датчика (б)

Верхняя дорожка определяет нулевой разряд y^0 числа $y^3 y^2 y^1 y^0$, представляемого в двоичной системе счисления. Вторая дорожка сверху определяет первый разряд y^1 и т.д. Так, позиции 5 (можно считать $x=5$) соответствует число 0101.

Наибольшее распространение получили преобразователи аналог-код (рис. 9.7б), выполненные в виде кодирующего диска с фотоэлектрической (оптической) системой считывания. Границы дорожек с окнами у кодового диска представляют собой окружности. Внешняя дорожка определяет нулевой разряд числа в двоичной системе счисления. Ближайшей к центру диска дорожке соответствует максимальный $N-1$ разряд N -разрядного кода. Максимальный угол поворота диска (диапазон изменения входного сигнала x) составляет 360° .

Для уменьшения ошибок считывания применяют специальные методы кодирования, различающиеся расположением окон на дорожках. Например, применяется циклический код (код Грея), который сводит ошибку к единице младшего разряда.

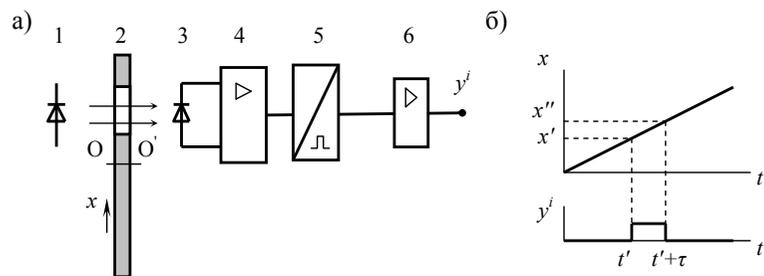


Рис. 9.6. Функциональная схема информационного канала кодового датчика (а) и временные диаграммы, поясняющие его действие (б)

В зависимости от конструкции датчика деталь 2 (пластина или диск) с окном совершает линейное (пластина по вертикали) или угловое (диск относительно оси $O-O'$) перемещение x , вызванное перемещением контролируемого объекта. При определенном положении пластины 2 (диска) световой поток от светодиода 1 попадает через окно на фотодиод 3, который является чувствительным элементом усилителя 4. По сигналу с усилителя 4 импульсный элемент (компаратор) 5 формирует прямоугольный импульс, длительность τ которого зависит от скорости изменения x , пока на интервале времени $(t', t'+\tau)$ фотодиод 3 освещен светодиодом 1 через окно пластины (диска) 2. Требуемый уровень выходного сигнала (напряжения) создается усилителем 6. Временные диаграммы, поясняющие преобразование x в логическую переменную y^i , показаны на рис. 9.6б. Выходная переменная $y^i=1$, когда координата x положения объекта удовлетворяет условию $x' < x < x''$. Если это условие не выполняется, то $y^i=0$.

На рис. 9.7а показана кодовая пластина (с горизонтальными дорожками), с помощью которой формируется обычный четырехразрядный код.

Слева от пластины показано расположение неподвижных излучающих элементов – светодиодов. Сверху от пластины пронумерованы от 0 до 15 позиции относительного расположения подвижной пластины и неподвижных светодиодов. Предполагаем в данном случае, что кодовая пластина перемещается влево, занимая такие промежуточные положения, характеризуемые координа-

ется. В результате уменьшается интенсивность процессов ионизации в столбе дуги и возрастает теплопроводность газа. Это приводит к увеличению градиента напряжения E_d и, в конечном счете, гашению дуги.

2.5.4. Гашение дуги в вакууме

В аппаратах, коммутирующих цепи переменного тока, например, в некоторых контакторах, контакты помещают в герметичную камеру, из которой откачан воздух до давления $10^{-4} \dots 10^{-5}$ Па. Перенос тока в *вакуумной дуге* осуществляется за счет электронов, эмитированных с катода контакта. Совместно с парами металла они образуют газоразрядную среду, в которой горит дуга.

Вакуум обладает способностью быстрого восстановления электрической прочности дугового промежутка. Поэтому дуга не возобновляется после достижения переменным током нулевого значения. Такая особенность вакуума позволяет применять контакты с малым раствором (до $1 \dots 2$ мм) и снизить продолжительность горения дуги до $0,01$ с для токов промышленной частоты 50 Гц (дуга гаснет при первом переходе тока через ноль после начала расхождения контактных деталей при размыкании контакта).

2.5.5. Размыкание контакта в цепи переменного тока при прохождении тока через ноль

В некоторых аппаратах, например, в *синхронных контакторах*, предусматривается устройство, синхронизирующее начало размыкания контакта с моментом перехода переменного тока через нулевое значение. Контактные детали начинают расходиться непосредственно перед моментом перехода тока через ноль. Тогда электрическая дуга на контакте не загорается. Сигнал на размыкание контакта формируется синхронизирующим устройством на основе информации о текущих значениях тока и напряжения. Синхронизирующее устройство может быть встроено в контакт аппарата для повышения быстродействия.

2.5.6. Разрыв дуги на несколько коротких дуг

Электрическая дуга разрывается на несколько коротких дуг с помощью металлических изолированных друг от друга пластин, которые образуют *дугогасительную решетку* (рис.2.7).

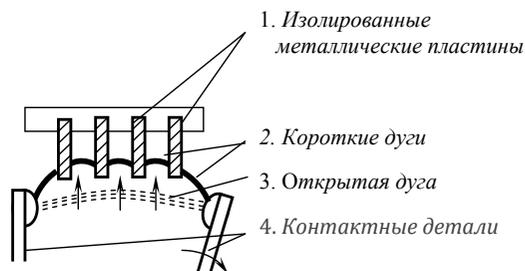


Рис. 2.7. Разрыв дуги на короткие дуги в дугогасительной решетке

При размыкании контакта дуга под действием электродинамических сил последовательно входит в промежутки между пластинами. При этом падение напряжения на дуге возрастает приблизительно по линейному закону. Продолжительность горения дуги тем меньше, чем больше скорость размыкания контакта и количество пластин, приходящихся на единицу длины дуги.

Если дугогасительная решетка состоит из m пластин, то дуга разбивается на $m + 1$ коротких дуг. У каждой пластины падает напряжение $U_{\text{э}}$ ("околоэлектродное" падение напряжения, которое составляет 20...30 В [2]). Количество пластин, необходимое для гашения электрической дуги, определяют из условия

$$m = \frac{(2 \dots 2,5) U_{\text{сети}}}{U_{\text{э}}}$$

где $U_{\text{сети}}$ – напряжение электрической сети.

2.5.7. Перевод тока с коммутирующего контакта в ключ, присоединенный параллельно контакту в электрической цепи

В некоторых аппаратах, например, в автоматических выключателях и в гибридных контакторах применяется специальное устройство – *ключ*, присо-

положение которого контролируется этим преобразователем. Электрическая емкость конденсатора

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{q}{l}$$

пропорциональна площади пластины q и обратно пропорциональна расстоянию l между пластинами ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-5}$ Ф/м – электрическая постоянная, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды).

Конструктивное исполнение емкостных преобразователей положения может быть таким, что входной сигнал – перемещение объекта приводит к изменению расстояния l между пластинами, либо к изменению взаимной площади пластин q . В первом варианте исполнения преобразователя его характеристика управления, то есть зависимость C от l , нелинейная (гипербола), во втором – линейная.

Емкостной датчик положения реализуют в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 9.1.

Емкостные измерительные преобразователи и датчики применяют при питающих напряжениях повышенной частоты в условиях отсутствия внешних электрических полей. Они обладают высокой чувствительностью, но выходной сигнал преобразователя требует усиления. Поэтому в состав емкостного датчика включают усилитель переменного тока.

9.2.4. Кодовые датчики положения

Кодовые датчики положения преобразуют линейное или угловое перемещение объекта в цифровой код. Рассмотренные ниже кодовые датчики называют также *аналого-цифровыми преобразователями пространственного кодирования*.

На рис. 9.6а приведена функциональная схема канала передачи одного (i -го) разряда цифровой информации о положении объекта, характеризуемого координатой x . Элементы, входящие в состав датчика, пронумерованы от 1 до 6.

зависит фаза φ напряжения U_α на выходе датчика. При переходе α через нулевое значение фаза φ изменяется на 180° . Величины U_α , φ характеризуют выход дифференциального датчика (рис. 9.5б). Характеристики управления датчика показаны на рис. 9.5в.

Увеличение диапазона изменения контролируемого датчиком угла почти до 360° позволяют получить индуктивные датчики иной конструкции, которую можно представить по рис. 9.5а, если вместо якоря в воздушный зазор поместить профилированный диск из ферромагнитного материала. При соответствующем профилировании диска можно получить зависимость $L=f(\alpha)$ практически любого вида. Если в зазор ввести диск из немагнитного электропроводящего материала, то это аналогично появлению в магнитной цепи короткозамкнутого витка. Тем самым в магнитной цепи создается магнитное сопротивление, которое зависит от формы диска, его электрической проводимости и положения в рабочем зазоре. При повороте диска изменяется магнитное сопротивление, а следовательно, индуктивность L и напряжение U_α на выходе датчика. С целью повышения чувствительности датчика индуктивный преобразователь может быть включен в колебательный контур с частотой $10 \dots 15$ кГц [10].

Недостатком индуктивных датчиков является сильная зависимость их характеристик от частоты питающего напряжения $\sim U$. Недостатками являются также: работа только на переменном токе, трудность регулировки датчиков. Основное достоинство индуктивных датчиков – высокая надежность, обусловленная отсутствием скользящих контактов. Положительными качествами являются также: больший, чем у потенциометрических датчиков, коэффициент усиления; высокая чувствительность. Разрешающая способность некоторых индуктивных датчиков при тщательной экранировке и регулировке может измеряться сотыми долями микрона.

9.2.3. Емкостные измерительные преобразователи

Емкостной измерительный преобразователь по существу представляет собой конденсатор, емкость которого изменяется при перемещении объекта,

единенный к электрической цепи параллельно с коммутирующим контактом (КК). В качестве такого ключа применяется *дугогасительный контакт* (ДК) или полупроводниковый прибор – обычно тиристор.

При размыкании коммутирующего контакта ток переходит из него в ключ, который затем сам разрывает электрическую цепь, не давая протекать по ней электрическому току. Электрическая дуга на коммутирующем контакте не возникает. Например, при размыкании электрической цепи двумя контактами – обычным коммутирующим КК и дугогасительным ДК, вначале размыкается КК, при этом ток цепи продолжает протекать по ДК, а затем размыкается ДК, разрывая цепь. При замыкании электрической цепи вначале замыкается ДК, затем замыкается КК. Обычно ДК представляет собой стыковой контакт (см. п. 2.2.5), стойкий по отношению к электрической дуге. Его сопротивление R_K выше, чем сопротивление КК.

2.6. Достоинства и недостатки контактной коммутации

Основное достоинство коммутирующего контакта – это возможность получить малое значение сопротивления $R_K \rightarrow 0$ в электрической цепи, когда контакт замкнут, и большое сопротивление $R_K \rightarrow \infty$, когда контакт разомкнут (глубина коммутации $h=10^7 \dots 10^{14}$). При реализации такой возможности контакт приближается по своим коммутирующим свойствам к идеальному ключу.

Потери электрической энергии на коммутирующем контакте в статическом режиме работы аппарата минимальны. Падение напряжения на замкнутом контакте обычно составляет единицы милливольт.

Коммутирующий контакт выдерживает практически любые перенапряжения; пробивное напряжение воздушного промежутка между контактными деталями составляет до десятков киловольт (для зазора $\delta=1$ см около 30000 В).

Коммутирующий контакт выдерживает практически любые токовые перегрузки (при протекании тока по времени до 0,01 секунды допустима перегрузка током примерно в 700 раз в сравнении с номинальной нагрузкой контакта).

Электрические контакты способны коммутировать высоковольтные электрические цепи при напряжениях в десятки и сотни киловольт. Они являются основными коммутационными элементами аппаратов высокого напряжения.

Аппараты контактной коммутации компактные в исполнении; легко осуществляется создание аппарата для коммутации нескольких цепей, причем контакты аппарата обеспечивают гальваническую развязку цепей друг от друга.

Основные недостатки коммутирующего контакта обусловлены его относительно низким быстродействием, возникновением электрического разряда при замыкании и размыкании, механическим и электрическим износом, а также вибрацией, возникающей при соударении подвижных и неподвижных частей контактного узла. Эти недостатки характерны для переходных режимов коммутации электрических цепей. Часто коммутационные процессы сопровождаются значительными звуковыми явлениями.

Быстродействие коммутирующего контакта находится в обратной зависимости от коммутационной способности контакта, т. е. от допустимого максимального по величине коммутируемого тока. С целью увеличения быстродействия и уменьшения времени горения электрической дуги повышают скорость перемещения подвижного контактного узла. Однако сближение контактных деталей с большой скоростью приводит к удару и последующему отскоку и вибрации подвижной контактной детали (например, мостика). Удаление с малой скоростью затягивает время горения электрической дуги. Эти факторы учитывают при конструировании привода¹⁷ электрического аппарата.

Увеличение силы воздействия привода на коммутирующий контакт связано с увеличением габаритов и утяжелением конструкции, а также с увеличением затрат мощности на управление. В низковольтных аппаратах мощность управления может составлять десятки ватт. В аппаратах высокого напряжения она значительно выше. Увеличение силы привода встречает ограничение по этим показателям, а также ограничения из-за необходимости смягчения ударов подвижных частей для повышения механической износоустойчивости, снижения шума при работе аппарата и вибрации контакта.

Существенным недостатком такого индуктивного датчика является возникновение большой по величине электромагнитной силы тяги, действующей на якорь (см. п. 3.3.4). Эта сила может повлиять на положение контролируемого объекта. Отмеченный недостаток практически полностью устраняется в дифференциальном индуктивном датчике (ДИД). Функциональная схема, отражающая принцип построения ДИД, показана на рис. 9.5а.

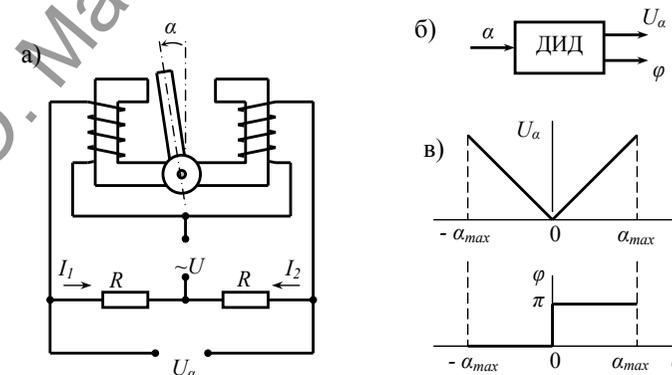


Рис. 9.5. Функциональная схема дифференциального индуктивного датчика (а), его вход и выходы (б), характеристики управления (в)

Якорь ДИД поворачивается на угол $\pm\alpha$ относительно вертикального положения, изменяя воздушные зазоры до левого и до правого полюсов магнитопровода. Максимальный угол поворота α_{max} . Электромагнитные силы, действующие на якорь от двух катушек, взаимно компенсируются. Конструкцию преобразователя и параметры схемы выбирают такими, что ток I_1 пропорционален величине $(\alpha_{max} - \alpha)$ и ток $I_2 \sim$ пропорционален величине $(\alpha_{max} + \alpha)$. Коэффициент пропорциональности S_I – чувствительность по току. Выходное напряжение:

$$U_a = I_2 R - I_1 R = S_I (\alpha_{max} + \alpha) R - S_I (\alpha_{max} - \alpha) R = 2S_I R \cdot \alpha = S_U \alpha,$$

где $S_U = 2S_I R$ – коэффициент, называемый *чувствительностью по напряжению*.

Действующее значение U_a напряжения на выходе датчика не зависит от знака входной величины α . Поэтому $U_a = S_U |\alpha|$. От знака входной величины

Класс точности пленочных потенциометров достигает 0,01%. Для обеспечения стабильной работы датчики должны иметь сопротивление R_0 , превышающее 1000 Ом.

9.2.2. Индуктивные измерительные преобразователи и датчики

Простейший индуктивный измерительный преобразователь является своеобразным электромагнитным механизмом переменного тока (см. п. 3.3.2), но другого назначения, который преобразует перемещение якоря в изменение индуктивности L (см. п. 3.6.1) своей обмотки:

$$L = \mu_0 S_p w^2 \frac{1}{\rho},$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; S_p – площадь воздушного зазора между сердечником и якорем; ρ – длина воздушного зазора, w – количество витков обмотки. В этом случае величина воздушного зазора ρ между якорем и полюсом сердечника однозначно определяется положением контролируемого объекта, который механически связан с якорем измерительного преобразователя.

Если к обмотке индуктивного преобразователя приложено переменное напряжение $u(t) = U_m \sin \omega t$, то обмотка создает реактивное сопротивление $X_L = \omega L$, в электрической цепи. Примем, что переменное напряжение создано источником напряжения (см. п. 1.2.2) с действующим значением U . Тогда по электрической цепи полученного таким образом индуктивного датчика (см. рис. 9.1) будет протекать ток

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{\omega \mu_0 S_p w^2} \rho = S_I \rho,$$

где $S_I = U / (\omega \mu_0 S_p w^2)$ – чувствительность датчика по току.

Таким образом, при малом по величине активном сопротивлении обмотки индуктивного измерительного преобразователя датчика положения сила тока I , протекающего по его обмотке, пропорциональна величине перемещения ρ якоря и, следовательно, пропорциональна перемещению контролируемого объекта.

Наибольшую частоту коммутации цепи до десятков герц получают у герметизированных контактов – герконов (см. п. 3.8). Это достигается снижением массы подвижных частей и исключением контактной пружины, как отдельной детали контактного узла. Силовые герконы – герсиконы позволяют коммутировать цепи с токами до 10 А.

Некоторые из отмеченных недостатков устранены у так называемых *жидкометаллических контактов* (ЖМК). В основу создания ЖМК положено использование жидкого металла (ртуть, галлий, индий и др.) для электрического соединения между собой токоведущих твердометаллических контактных деталей. Аппараты с ЖМК способны коммутировать цепи с токами 200 кА и выше. При этом нет необходимости в больших контактных нажатиях и применении дефицитных материалов для снижения переходного сопротивления коммутирующего контакта. Для ЖМК снимаются проблемы сваривания, вибрации и отброса контактных деталей.

ПРИВОДНЫЕ УСТРОЙСТВА АППАРАТОВ КОНТАКТНОЙ КОММУТАЦИИ

3.1. Общие сведения

Аппарат контактной коммутации – это электрический аппарат, который производит коммутацию электрических цепей своими коммутирующими контактами. Для приведения в действие коммутирующих контактов в аппарате предусматривается приводное устройство.

В общем представлении приводное устройство, иначе, *привод* электрического аппарата определяют как *систему* взаимосвязанных устройств и механизмов, предназначенную для выполнения требуемых механических операций и их циклов, обеспечивающих работоспособность аппарата в условиях эксплуатации¹⁷. В аппаратах контактной коммутации привод предназначен для замыкания и размыкания коммутирующих контактов путем перемещения подвижного контактного узла каждого контакта (см. п. 2.2). В аппаратах применяют механические, электромагнитные, магнитоэлектрические и иные типы приводов.

Механический привод применяют в аппаратах ручного управления (см., например, АРУ на рис. 1.8), путевых и конечных выключателях. Он преобразует управляющее механическое воздействие (см. п. 1.1.3) в перемещение (поступательное ρ или поворотное α) подвижного контактного узла – ПКУ (см. п. 2.2). Для непосредственного восприятия управляющего механического воздействия в аппарате предусматривается *орган управления*¹⁸ (кнопка, рукоятка, штурвал, педаль или др.),

Аппарат контактной коммутации с механическим приводом представим с помощью структурной схемы, показанной на рис. 3.1.

Входное управляющее воздействие на механический привод аппарата во многих случаях может рассматриваться как силовое воздействие, создаваемое источником силы F или момента силы M (см. п. 1.2). В зависимости от назначе-

Схема простейшего датчика представлена на рис. 9.4б. Если сопротивление нагрузки (приемника сигнала), подключенной к выходу датчика, велико, то, характеристика управления близка к линейной зависимости

$$U_x = \frac{U_0}{x_{\max}} x, \quad 0 \leq x \leq x_{\max},$$

где x_{\max} – максимальное значение входной переменной x ($x=l$ для датчика линейного перемещения, $x=\alpha$ для датчика углового перемещения).

Напряжение питания U_0 должно быть стабильным, т. к. его флюктуации вызывают погрешности преобразования $x \rightarrow U_x$.

Датчик, представленный схемой на рис. 9.4в, реагирует на знак входного сигнала. При постоянном напряжении питания U_0 напряжение U_x на выходе датчика изменяет полярность при переходе подвижной детали контакта (ползунок) через среднее положение.

В схеме на рис. 9.4г предусматривается синхронное перемещение ползунков контактов относительно среднего положения (отмечено пунктирной линией). Если левый ползунок перемещается относительно среднего положения вниз на величину x , то правый ползунок поднимается вверх также на величину x . Чувствительность (крутизна характеристики управления) такого двухтактного датчика в два раза выше чувствительности одноктактного датчика на рис. 9.3в).

Характеристика управления резистивного датчика приближается к линейной при больших значениях $\beta = R_H / R_0$, где R_H – активное сопротивление нагрузки, R_0 – полное сопротивление потенциометра. При $\beta = 10 \dots 100$ нелинейность характеристики составляет $3 \dots 0,1\%$ соответственно. Чувствительность $S = dU_x / dx = (3 \dots 5) \cdot 10^{-3}$ В/мм.

Различные по виду нелинейные зависимости U_x от x можно получить путем соответствующего профилирования каркаса резистивного преобразователя.

Минимальная погрешность проволочных датчиков $0,05\%$. Недостаток – ступенчатость характеристики управления из-за дискретного изменения сопротивления R_x при перемещении щетки движка по виткам.

На каркасе цилиндрической или кольцевой формы (рис. 9.3а и рис. 9.3б) уложена обмотка из витков проволоки, по которым скользит подвижная деталь электрического контакта – щетка движка. Вместо витков проволоки может использоваться пленочное покрытие из проводникового или полупроводникового материала.

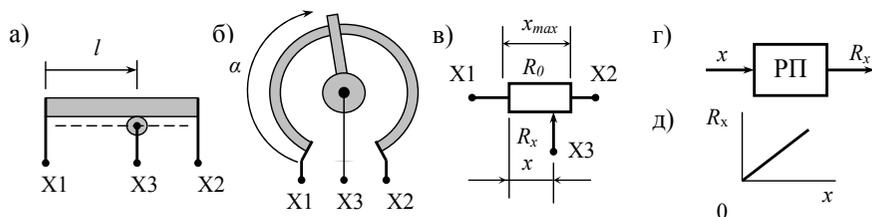


Рис. 9.3. Резистивные преобразователи линейного и углового положения

Линейное перемещение l движка (рис. 9.3а), или угловое перемещение – угол поворота α (рис. 9.3б), характеризуемые координатой x , вызывают изменение сопротивления R_x между клеммами X1 и X3 (рис. 9.3в). Если каркас имеет одинаковое сечение по всей длине, витки обмотки уложены равномерно по каркасу и сопротивление обмотки равно R_0 , то $R_x = (R_0/x_{max})x$. Таким образом, при выполнении указанных условий сопротивление R_x резистивного преобразователя (РП на рис. 9.3г) линейно зависит от перемещения движка x (рис. 9.3д).

Резистивный преобразователь используют в резистивном датчике (РД на рис. 9.4а), выходной переменной которого является электрическое напряжение U_x .

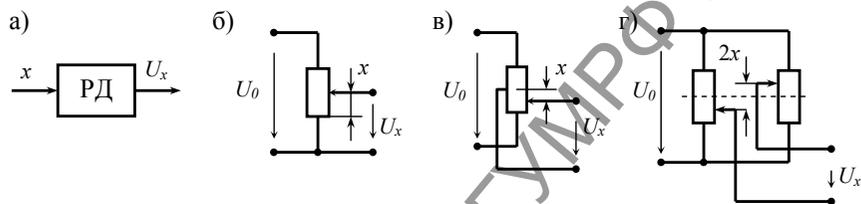


Рис. 9.4. Резистивные датчики с выходным напряжением U_x , пропорциональным перемещению x

ния и конструкции аппарата источником управляющего воздействия ИУВ может быть человек (см., например, п. 1.3, рис. 1.4; п. 1.4), может быть какой-либо механический объект, перемещающийся относительно аппарата с некоторой скоростью. Силовое соприкосновение объекта с органом управления ОпУ аппарата вызывает перемещение ОпУ и изменение его линейной (λ) или угловой (β) координаты в зависимости от конструкции ОпУ.

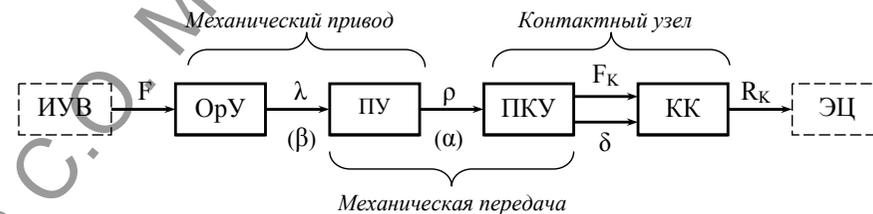


Рис. 3.1. Структурная схема аппарата контактной коммутации с механическим приводом

Перемещение органа управления ОпУ передается подвижному контактному узлу ПКУ через передаточное устройство ПУ, которое обычно представляет собой пружинный механизм, способный запасать механическую энергию. Перемещение (ρ) ПКУ приводит к изменению зазора δ и контактного нажатия F_k коммутирующего контакта КК (см. п. 2.2), с помощью которого изменяется сопротивление R_k в электрической цепи ЭЦ (см. п. 2.6).

Механическая передача (МП) представляет собой совокупность звеньев кинематической цепи, по которой передается механическая энергия управляющего воздействия от органа управления ОпУ к коммутирующему контакту КК. В состав МП входят подвижные звенья передаточного устройства ПУ и подвижного контактного узла ПКУ. Механическая передача МП предназначена для замыкания и размыкания коммутирующего контакта КК за счет энергии источника управляющего воздействия ИУВ, а также за счет энергии, накопленной в ПУ и ПКУ. Обычно для накопления энергии в МП используются пружины.

Аппарат в зависимости от конструкции может иметь один КК (см. рис. 3.1) или несколько КК и соответствующее количество механических передач

МП. С помощью механической передачи МП может передаваться управляющее воздействие на КК от нескольких ОрУ, если это предусмотрено в конструкции электрического аппарата. Например, в автоматическом выключателе АП-50 предусмотрено механическое приводное устройство с двумя кнопками, которые используются в качестве органов управления. Мускульным нажатием на одну кнопку производится включение автоматического выключателя, замыкание КК, нажатием на другую кнопку – отключение аппарата, размыкание КК.

На основе структурной схемы рис. 3.1 можно представить не только аппараты ручного управления, но и разнообразные дистанционно управляемые аппараты контактной коммутации (см. п. 1.4.1, п. 1.4.2) с электромагнитным, магнитоэлектрическим, или другим типом электромеханического привода. У этих аппаратов силовое воздействие F создается путем преобразования электрической энергии в механическую энергию с помощью специального *входного устройства*, получающего управляющий сигнал из электрической цепи управления или из силовой электрической цепи (см. п. 1.1.3).

Конструкцию органа управления ОрУ такого аппарата «приспосабливают» для работы с входным устройством. Например, у многих дистанционно управляемых аппаратов входным устройством служит электромагнит, и в качестве ОрУ, иначе говоря, вместо органа ручного управления используется так называемый *якорь* из ферромагнитного материала, притягиваемый к электромагниту силой F , когда по виткам обмотки электромагнита протекает электрический ток. Электромагнит и якорь, рассматриваемые вместе как функциональный узел аппарата, образуют *преобразовательное устройство* (ПрУ). С помощью ПрУ электрическая энергия, передаваемая электромагниту по электрической цепи, преобразуется в механическую энергию перемещения якоря, передаваемую далее к коммутирующему контакту по кинематической цепи механической передачи. ПрУ в виде электромагнита с якорем называют электромагнитным ПрУ или, иначе, электромагнитным механизмом.

В зависимости от типа применяемого в аппарате преобразовательного устройства конкретизируют название привода аппарата и электрического аппа-

ной сигнал u представляет собой кусочно-постоянную функцию времени. Значения этой функции могут быть выражены двоичным кодом, а выходной сигнал может быть передан датчиком по нескольким выходам, на каждом из которых действует сигнал с двумя возможными значениями. Одному значению приписывают логический 0, другому – логическую 1. Например, для некоторых нормированных двоичных сигналов значению напряжения в пределах от 0 до 2В приписывают логический 0, а значению напряжения в пределах от 6 до 10 В приписывают логическую 1. В приведенном на рис. 9.2в примере по выходу u^0 передается двоичный сигнал – нулевой разряд кода целого числа K . Это число равно количеству шагов квантования по уровню, когда $\Delta x K \leq x < \Delta x (K+1)$. По выходу u^1 передается двоичный сигнал – первый разряд кода и т.д.. Датчик, осуществляющий преобразование *аналог-код* – это датчик с *цифровым* выходом.

Элемент на рис. 9.2д отображает датчик с аналоговым выходом, а также с выходом, полученным в результате квантования входного сигнала. Элемент на рис. 9.2е – датчик с цифровым выходом. Количество физических выходов (линий электрической связи) у цифрового датчика обычно больше двух. Оно определяется количеством разрядов выбранного кода.

Частным случаем (рис. 9.2г) является цифровой выход, содержащий одноразрядный код значений x типа «больше» или «меньше» заданной величины (рис. 9.2д). Датчик с таким выходом называют *позиционным* датчиком. К позиционным датчикам можно отнести разнообразные электромеханические и электронные реле, у которых коэффициент возврата (см. п. 3.4.4) равен единице.

9.2. Датчики положения

9.2.1. Резистивные преобразователи и датчики

Резистивный измерительный преобразователь преобразует координату положения перемещаемого объекта в электрическое сопротивление, вносимое преобразователем в электрическую цепь. Применяют проволочные и пленочные преобразователи.

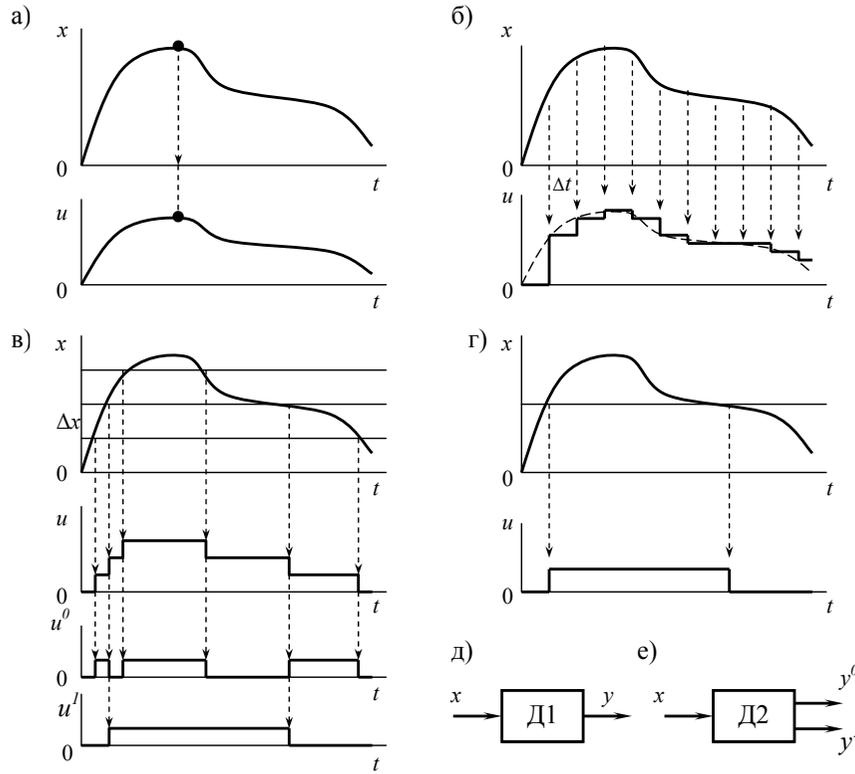


Рис. 9.2. Временные диаграммы входного (x) и выходного (u) сигналов датчиков разного типа

С помощью электрического датчика с *аналоговым* выходом (рис. 9.2а) входная физическая величина x в каждый текущий момент времени t преобразуется в выходную электрическую величину u (например, напряжение). К характеристике управления (см. п. 1.6.3) обычно предъявляется требование, чтобы она представляла собой линейную функцию (см. п. 1.6.2) – линейную зависимость выходной величины от входной величины, например, $u=kx$, где k – постоянная величина (коэффициент преобразования).

Электрические датчики с *дискретным* выходом осуществляют квантование входного сигнала x по времени (рис. 9.2б) или/и квантование по уровню (рис. 9.2в). Как правило, *шаги квантования* Δt по времени и Δx по уровню фиксированы, т.е. имеют определенное неизменное для датчика значение. Выход-

рата в целом, например, электромагнитный, магнитоэлектрический, электродинамический и т. д. Любой из этих аппаратов может быть представлен структурной схемой, аналогичной схеме на рис. 3.1, с той лишь разницей, что на место ОрУ в схему следует поместить ПрУ. При этом в качестве источника управляющего воздействия ИУВ выступает электрическая цепь и аппарат можно рассматривать с информационной точки зрения как устройство, передающее сигнал из одной электрической цепи в другую электрическую цепь (см., например, АДУ, АЗУ на рис. 1.8).

3.2. Механические передачи

3.2.1. Основные типы механических передач

В электрических аппаратах применяют механические передачи (МП) разнообразных конструкций. МП должна создавать необходимый зазор (δ) и требуемое контактное нажатие (F_K) коммутирующего контакта (КК) (см. п. 2.2, п. 3.2).

На рис. 3.2 представлены упрощенные изобразительные модели механических передач трех типов, отражающие принципы действия МП с возвратной пружиной (а), МП с защелкой и возвратной пружиной (б), МП с переключающими (перекидными) пружинами (в).

На рис. 3.2 показаны: 1 – возвратная пружина, сжимаемая при перемещении толкателя 2 вправо (направляющие для толкателя изображены затемненными прямоугольниками); 3 – упор для защелки 4, которая отжимается вверх пружиной 5 (защелка перемещается в направляющих – затемненные прямоугольники), 6 – переключающие пружины, каждая из которых одним концом закреплена на толкателе, другим – на неподвижном основании).

Передаточное устройство (ПУ) на рис. 3.2а и на рис. 3.2б представляет собой толкатель 2 с возвратной пружиной 1, а на рис. 3.2в – толкатель 2 с переключающими пружинами 6. На рис. 3.2б механическая передача МП дополнена узлом (УЗ) с защелкой 4, пружиной 5 и органом управления ОрУЗ. Подвижный контактный узел ПКУ на рис. 3.2 а, б, в можно представить, например, с помощью изобразительной модели, показанной на рис. 2.1 (ее надо мыс-

ленно повернуть на 90° против часовой стрелки, толкатели ПУ и ПКУ соединить в единое кинематическое звено).

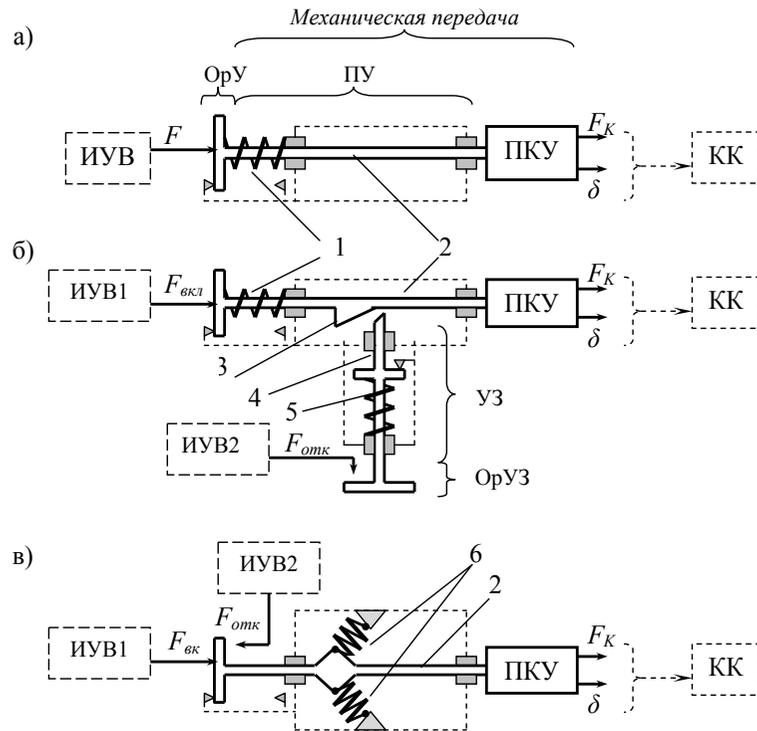


Рис. 3.2. Упрощенные изобразительные модели прямоходовых механических передач

Толкатель 2 (единый в данном случае для ПУ и ПКУ) при замыкании и размыкании коммутирующего контакта совершает возвратно-поступательное движение вправо и влево в пределах зоны, ограниченной затемненными треугольниками (как бы упорами). На рис. 3.2 а, б, в толкатель показан в начальном положении, а его смещение вправо относительно левого упора характеризуется переменной ρ (линейной координатой). Полное перемещение толкателя в рассматриваемом случае определяется величиной

$$\rho_K = \delta_p + \Delta l_K,$$

По роду выходного электрического сигнала измерительные преобразователи ИПД разделяют на параметрические и генераторные. Согласно такой классификации к первой группе относятся преобразователи, формирующие выходную физическую величину в виде активного сопротивления, индуктивности или емкости. В составе этой группы реостатные преобразователи, терморезистивные, тензорезистивные, индуктивные, емкостные и др. преобразователи. К генераторным преобразователям второй группы относятся такие преобразователи, выходным сигналом которых является электродвижущая сила. Примером служат индукционные преобразователи и тахогенераторы. Для генераторного ИПД источник энергии ИН может отсутствовать.

В состав электрического датчика могут входить функциональные устройства, обеспечивающие гальваническую развязку электрических цепей, усиление электрических сигналов, кодирование информации и др.

В зависимости от входного сигнала электрические датчики разделяют на:

- датчики положения (линейного или углового), у которых электрический сигнал на выходе соответствует координате положения некоторого объекта, например, углу поворота вала;
- датчики скорости (линейной или угловой), например, скорости вращения ротора электродвигателя;
- датчики тока;
- датчики напряжения и др.

В некоторых случаях датчик может рассматриваться как составная часть электроаппарата. В частности, некоторые аппараты ручного управления имеют в своем составе датчик положения, входной сигнал которого формируется органом ручного управления. Например, с помощью потенциометрического датчика (см. п. 9.2) угол поворота рукоятки управления преобразуется в пропорциональное этому углу электрическое напряжение.

На рис. 9.2 приведены временные диаграммы, отображающие преобразование входного сигнала x в выходной сигнал u датчиками разных типов.

Датчик³⁵ представляет собой совокупность конструктивно и функционально объединенных измерительных преобразователей, формирующих на выходе удобный для использования сигнал. Датчик, на выходе которого носителем является электрическое напряжение или ток, относится к *электрическим датчикам*. Именно такие электрические датчики рассматриваются в этом разделе.

Представим электрический датчик структурной схемой (рис. 9.1).

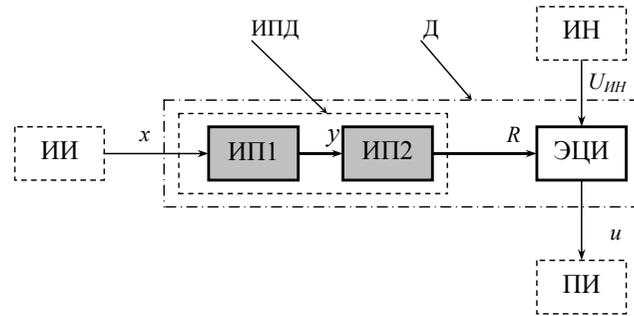


Рис. 9.1. Структурная схема электрического датчика

На схеме рис. 9.1 выделены: первичный измерительный преобразователь (ИП1) и преобразователь (ИП2), выходная переменная которого электрическая величина (сопротивление R или, быть может, индуктивность, или емкость), вносимая в электрическую цепь измерения (ЭЦИ). ИП1 и ИП2 в совокупности являются измерительным преобразователем (ИПД) электрического датчика (Д). ИПД и Д выделены соответственно пунктирной и штрих-пунктирной линиями. Датчик Д является составной частью канала связи источника информации (ИИ) с приемником информации (ПИ). Выходной сигнал датчика – электрическое напряжение u (или ток) создается путем *модуляции*³⁶ выходным сигналом ИПД (например, изменяющимся сопротивлением R) напряжения $U_{ИН}$ питания ЭЦИ от стабильного источника электрической энергии (обычно источника напряжения ИН). ИПД в схеме на рис. 9.1 выполняет функцию *модулятора* процесса передачи энергии от ИН к ПИ.

где δ_p , Δl_k – соответственно раствор и провал контакта (см. п. 2.2).

Для того чтобы установить соответствие механических передач, показанных на рис. 3.2, структурной схеме аппарата, изображенной на рис. 3.1, будем полагать, что силы F , $F_{вкл}$ (включения), $F_{отк}$ (отключения), создаваемые источниками управляющих воздействий (ИУВ, ИУВ1, ИУВ2), действуют непосредственно на органы управления ОрУ, ОрУЗ. Это упрощение вовсе не исключает того, что в аппарате применяются электромеханические преобразовательные устройства, например, электромагнитный механизм, и роль ОрУ (или ОрУЗ) исполняет якорь электромагнитного механизма (см. п. 3.1.3).

3.2.2. Механическая передача с возвратной пружиной

Механическая передача с возвратной пружиной на рис. 3.2а отличается от других МП на рис. 3.2 б и на рис. 3.2 в тем, что получает управляющее воздействие F только по одному входу. Перемещению толкателя вправо в направлении действия силы F в пределах $0 \leq \rho \leq \delta_p$ противодействуют силы, создаваемые трением подвижных частей МП и возвратной пружиной. С увеличением ρ противодействие возвратной пружины возрастает. При $\rho > \delta_p$ добавляется сила от контактной пружины, обеспечивающая контактное нажатие F_k (см. п. 2.2).

В конечном положении толкателя, когда $\rho = \rho_k$, энергия, запасенная возвратной и контактной пружинами, максимальна. Если сила F от ИУВ перестанет действовать ($F=0$), то запасенная пружинами энергия будет израсходована на работу по перемещению толкателя влево из *конечного состояния*, при котором $\rho = \rho_k$, в *начальное состояние*, при котором $\rho = 0$.

Электрические аппараты с такой МП называют аппаратами с *самовозвратом*. Пример – это кнопка управления, показанная на рис. 1.4.

3.2.3. Механическая передача с защелкой

Механическая передача с защелкой на рис. 3.2б также имеет возвратную пружину 1, как и в МП на рис. 3.2а, чтобы запастись механическую энергию, пе-

редаваемую ей управляющим воздействием $F_{вкл}$ от ИУВ1. По другому входу от ИУВ2 поступает воздействие $F_{отк}$ на защелку 4. Силы $F_{вкл}$ и $F_{отк}$ действуют в разные моменты времени.

Толкатель МП (рис. 3.2 б) имеет упор 3 для защелки 4, которая способна совершать вертикальное возвратно-поступательное движение. Защелка сдвигается вниз наклонной поверхностью упора 3, когда толкатель 2 перемещается вправо из положения, при котором $\rho=0$. Вверх защелка 4 переместится непосредственно перед подходом толкателя к крайнему правому положению при $\rho \rightarrow \rho_K$. Пружина 5 защелки сжимается, запасая энергию, когда защелка движется вниз, и затем расправляется, расходуя запасенную энергию на перемещение защелки вверх. Тем самым осуществляется включение аппарата под действием силы $F_{вкл}$. Аппарат остается во включенном состоянии и после прекращения действия $F_{вкл}$, т.к. защелка и упор не позволяют толкателью переместиться влево. Возвратной пружиной 1 запасена энергия, необходимая для перемещения толкателя 2 влево.

Отключение аппарата может быть осуществлено только путем приложения силы $F_{отк}$ к ОпУЗ защелки от ИУВ2, как показано на рис. 3.3 б. Если $F_{отк}$ достаточна по величине, чтобы преодолеть силу противодействия пружины 5 защелки 4, то защелка переместится вниз и разблокирует толкатель 2. Он передвинется влево под действием возвратной пружины 1, и произойдет отключение аппарата.

Силами $F_{вкл}$ и $F_{отк}$, последовательно действующими по соответствующим входам, толкатель переводится из одного устойчивого состояния в другое устойчивое состояние, для которых $\rho=\rho_K$ и $\rho=0$. Устойчивость начального состояния толкателя при $\rho=0$ обеспечивается возвратной пружиной; устойчивость конечного состояния при $\rho=\rho_K$ – защелкой.

МП с защелкой применяются в автоматических выключателях низкого и высокого напряжения.

Глава 9

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

9.1. Общие сведения

В этом разделе рассматриваются аппараты, которые относят к информационным устройствам электроприводов и систем автоматики. Измерительные преобразователи и датчики используются в системах управления для получения информации по обратным связям о результатах управления, а также о внешней среде.

*Измерительный преобразователь*³⁴ – это техническое устройство, которое применяют для преобразования некоторой физической величины (силы, давления, температуры и т. д.) в другую функционально с ней связанную физическую величину (электрическое сопротивление, угол поворота, электрическое напряжение или др.). Выполняемое преобразование в статике отображается характеристикой управления преобразователя (см. п. 1.6.3, п. 1.6.4).

Если исходная физическая величина x подвергается последовательным преобразованиям несколькими измерительными преобразователями, то характеристику управления можно представить в виде сложной функции. Например, давление преобразуется в перемещение y с помощью мембраны, а перемещение y центра мембраны с помощью резистора преобразуется в электрическое сопротивление R . В этом случае характеристика управления может быть представлена двумя функциями $y = f(x)$, $R = \varphi(y)$ или одной сложной функцией $R = \varphi[f(x)] = \psi(x)$.

Первое преобразование входного воздействия выполняет *первичный измерительный преобразователь*. Его называют также *чувствительным элементом*. В приведенном выше примере мембрана – чувствительный элемент. Мембрана преобразует давление, действующее на нее, в перемещение центра мембраны. Обычно следующим преобразователем перемещение преобразуется в электрический сигнал.

Номинальный постоянный ток от 10 до 400 А при напряжении 200 В, номинальный переменный ток от 6 до 250 А при напряжении 400 В.

Пакетные выключатели и переключатели имеют преимущества перед рубильниками: у них малые габариты, они имеют высокую вибростойкость и ударостойкость, электрическая дуга гасится в малом объеме без выброса пламени и газов, контактная система позволяет осуществлять управление большим количеством электрических цепей. Основной недостаток – быстрый износ контактного узла и механизма привода. Гарантированное количество операций «включить-выключить» при номинальных токах ($I_{ном}$) 100...400 А и напряжении 220 В обычно ограничено величиной 2500. Коммутационная способность при номинальном напряжении может достигать семикратного значения номинального тока аппарата.

3.2.4. Механическая передача с переключающей пружиной

Механическая передача с переключающей пружиной (или двумя пружинами, как на рис. 3.2 в) также, как и в МП с защелкой, имеет два устойчивых состояния толкателя, для которых $\rho=0$ и $\rho=\rho_K$. Устойчивость начального ($\rho=0$) и конечного ($\rho=\rho_K$) состояний толкателя обеспечивается переключающими пружинами б.

При перемещении толкателя вправо в направлении действия силы $F_{вкл}$ из крайнего левого положения переключающие пружины сначала противодействуют перемещению, создавая силу сопротивления и накапливая энергию. Затем, после того как пружины займут вертикальное положение, они изменят направление действия силы на противоположное направление вдоль оси толкателя. Теперь запасенная пружинами энергия будет расходоваться на перемещение толкателя в том же направлении до крайнего правого положения, ограниченного упором.

Переключающие пружины аналогично действуют на толкатель при его перемещении справа налево в направлении действия силы $F_{отк}$. Во время полного перемещения толкателя ($0 \leq \rho \leq \rho_K$) переключающие пружины вначале сжимаются, накапливая энергию, а затем расправляются, расходуя накопленную энергию на ускорение движения толкателя в том же направлении.

Обозначим через x величину отклонения толкателя вправо от положения, при котором каждая из переключающих пружин занимают вертикальную позицию и сжата в максимальной степени. На толкатель *вдоль его оси* со стороны переключающей пружины действует сила величиной

$$F_{III} = \left(\frac{a+b}{\sqrt{x^2+a^2}} - 1 \right) c x, \quad (3.1)$$

где a – длина переключающей пружины в сжатом состоянии, когда она занимает вертикальное положение; b – величина сжатия пружины от ее длины в свободном состоянии до длины, равной a ; c – жесткость пружины (Н/м).

График зависимости F_{III} от x показан на рис. 3.3 (вверху).

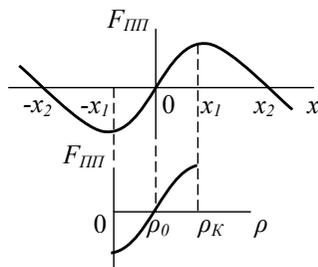


Рис. 3.3. График зависимости F_{III} от x (вверху) и от ρ (внизу)

При $x=0$, $x=x_2$ и $x=-x_2$ горизонтальная сила F_{III} действия переключающей пружины на толкатель равна нулю. Величина x_2 определяется из условия

$$x_2 = \sqrt{(2a+b)b}.$$

Чтобы переключающая пружина смогла замкнуть контакт, перемещение толкателя должно удовлетворять условию $\rho_K < 2x_2$. Сила F_{III} принимает максимальные значения по абсолютной величине при $|x|=x_1$, $\rho_K = 2x_1$. Можно показать, что

$$x_1 = \sqrt[3]{(a+b)^2 a^4 - a^2}.$$

Для МП с переключающими пружинами отпадает необходимость в использовании контактной пружины (см. п. 2.2.1) в ПКУ, т.к. контактное нажатие может быть создано переключающими пружинами. Конечное контактное нажатие F_{KK} , созданное двумя пружинами, принимает наибольшее значение

$$F_{KK} = 2F_{III},$$

когда $\rho_K = 2x_1$. Величина F_{III} определяется по формуле (3.1) при $x = x_1$.

Таким образом, толкатель при отсутствии внешних управляющих воздействий ($F_{вкл} = F_{отк} = 0$) может устойчиво сохранять любое из крайних положений ($\rho=0$ или $\rho = \rho_K$) и создавать конечное нажатие контакта, благодаря переключающим пружинам. Промежуточное положение толкателя при $x=0$, соответственно, при $\rho = \rho_0$ (когда $F_{III} = 0$) неустойчиво.

8.7.2. Пакетные выключатели и переключатели

Пакетные выключатели и пакетные переключатели представляют собой коммутирующие аппараты ручного управления с пружинным приводом без самовозврата. Их применяют для коммутации цепей постоянного и переменного тока до 400 А в схемах распределительных устройств и систем автоматики, а также для пуска асинхронных двигателей небольшой мощности. Элементами такого выключателя являются «пакеты», состоящие из системы неподвижных и подвижных контактных деталей с пружинным механизмом.

Все пакеты разделены друг от друга изоляционными прокладками и собраны в корпусе в единую конструкцию. Во внутренней полости пакетов находится механический привод с переключающей пружиной и подвижный контактный узел, который перемещается с помощью вала, общего для всех пакетов. На валу закреплена рукоятка, воспринимающая мускульное усилие человека. Поворот рукоятки и вала до определенной позиции (на 90° или 120°) передается пружинному механизму. Перемещение подвижных контактных деталей (контактных ножей) происходит практически мгновенно.

В положениях «включено» и «отключено» подвижный контактный узел фиксируется с помощью переключающей пружины, которая предотвращает самопроизвольное перемещение подвижного узла (см. п. 3.2.4, п. 3.2.5). Подвижная контактная деталь – контактный нож, закреплен на изолированном валу привода. Контактный нож поворачивается вместе с валом. Количество ножей и, соответственно, количество коммутирующих контактов в выключателе до трех, в переключателе может быть больше трех. Неподвижные контактные детали выполнены из латуни и закреплены в кольцах. При размыкании контакта возникшая на нем электрическая дуга гасится в закрытой камере, в которой находятся газогенерирующие фибровые пластины.

Пакетные выключатели и переключатели серии ПВ и ПП изготавливают однополюсными, двухполюсными и трехполюсными в защищенном и герметичном исполнении. Количество контактов у переключателя не более семи.

мыкание контактов, независимо от скорости перемещения рукоятки рубильника. В некоторых случаях рубильник комплектуют дуго-гасительной камерой или дугогасительной решеткой.

Рубильник, в котором не предусмотрено специальное устройство гашения электрической дуги, называют *разъединителем*. Он предназначен для отключения цепи без тока.

Аналогичный рубильнику аппарат с тремя позициями рукоятки называют *рубящим переключателем* [2]. На рис. 8.13 приведен пример обозначения на электрической схеме двухполюсного переключателя.



Рис. 8.13. Переключатель двухполюсный 3-позиционный с нейтральным положением (а), с самовозвратом в нейтральное положение (б)

Рубильники и рубящие переключатели выполняют открытого и водозащищенного исполнения.

Переключатели применяют в схемах реверсирования двигателей, при пуске асинхронных двигателей методом переключения обмотки статора со «звезды» на «треугольник» и в других случаях, связанных с переключением электрических цепей.

Рубильники серий Р, РО, РП и рубящие переключатели серий П, ПО, ПП выпускают на токи от 100 до 1000 А при напряжении 220 и 440 В постоянного тока, 380 и 500 В переменного тока.

Аппараты указанных серий с дугогасительными камерами допускают отключение при токе нагрузки (в неиндуктивной цепи), равном по величине номинальному току аппарата при напряжении до 220 В. Отключение аппарата под нагрузкой при напряжении 500 В переменного тока и 440 В постоянного тока не допускается.

МП с переключающими пружинами (или одной пружиной) используются в различных по устройству выключателях с ручным приводом, например, в бытовых выключателях освещения.

Отметим, что при определенных условиях аппараты с механическими передачами, показанными на рис. 3.2 б и рис. 3.2 в, могут рассматриваться как аппараты с памятью (см. п. 1.6.4, п. 1.6.2).

Для каждого типа прямоходовых механических передач, показанных на рис. 3.2, существует множество конструкций механических передач с «поворотным» движением звеньев ОпУ и ПУ. Такие конструкции механических передач предусматривают в аппаратах, в которых требуется угловое перемещение подвижного контактного узла, например, с пальцевым контактом (см. п. 2.2).

3.2.5. Особенности механических передач с переключающей пружиной

На рис. 3.4 показаны два типа *поворотных* передаточных устройств (ПУ), применяемых в механических передачах с переключающей пружиной. Обозначения углов α и β поворота звеньев ПУ соответствуют обозначениям переменных α и β на рис. 3.1.

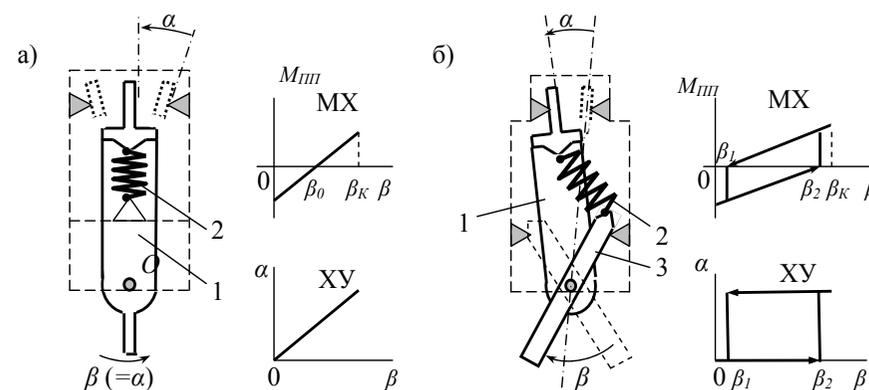


Рис. 3.4. Изобразительные модели поворотных передаточных устройств с переключающей пружиной

Поворотное переключающее ПУ первого типа на рис. 3.4а является аналогом прямоходового ПУ, показанного на рис. 3.2в. Функции органа управления и толкателя выполняют приводной рычаг 1 и ось О (сечение оси О показано на рисунке в виде затемненного круга). Приводной рычаг 1 закреплен на оси О и имеет возможность поворачиваться вместе с осью. Угол α поворота рычага 1 условно ограничен затемненными прямоугольниками.

Представим, что к оси О присоединен подвижный контактный узел (ПКУ), например, с пальцевым контактом как на рис. 2.3.

В соответствии с рис. 3.1 будем считать, что положение рычага 1 и оси О с ПКУ характеризуется угловой координатой α , причем $\alpha = \beta$. Для рассматриваемой изобразительной модели величина α увеличивается при повороте рычага 1 против часовой стрелки. Сжатая относительно своего свободного состояния переключающая пружина 2, действуя на рычаг силой F_{III} (вдоль оси пружины), создает момент M_{III} относительно оси вращения рычага. Момент M_{III} силы F_{III} зависит от угла поворота β приводного рычага. На рисунке рычаг показан в таком положении, при котором F_{III} имеет максимальное значение, а $M_{III} = 0$. Это положение неустойчиво, т.к. любое малое отклонение от него приведет к повороту рычага до упора в крайнее правое устойчивое положение ($\beta = \alpha = 0$) или в крайнее левое устойчивое положение ($\beta = \beta_K = \alpha_K$) под действием момента M_{III} , создаваемого силой F_{III} .

Механическая характеристика (МХ) ПУ в виде графика зависимости момента M_{III} , создаваемого переключающей пружиной, от угла β поворота приводного рычага показана на рис. 3.4а. Угол β_0 на графике соответствует неустойчивому положению рычага 1 при $M_{III} = 0$. График показывает, что при повороте рычага против часовой стрелки из начального положения, при котором $\alpha = 0$, момент M_{III} , создаваемый пружиной, сначала противодействует перемещению рычага до того, пока не будет выполнено условие $\beta = \beta_0$, а затем способствует перемещению рычага в том же направлении. Аналогичным образом действует переключающая пружина на рычаг при его повороте по часовой стрелке в направлении момента $M_{отк}$ из положения $\beta = \beta_K$.

8.7. Рубильники, пакетные выключатели и переключатели

8.7.1. Рубильник, разъединитель

Рубильник – это коммутирующий аппарат ручного управления с рычажным механическим приводом без самовозврата. Рубильники различных типов применяются для отключения силовых цепей с созданием видимого разрыва цепи. Их устанавливают на панелях распределительных щитов, в шкафах и ящиках. Диапазон номинальных токов от несколько десятков до нескольких тысяч ампер.

В контактной системе рубильника предусматривают от одного до трех врубных контактов. По количеству контактов рубильники называют соответственно однополюсными, двухполюсными и трехполюсными. Обозначение рубильника на электрической схеме приведено на рис. 8.12.

Рычажная рукоятка рубильника имеет два фиксированных положения: «включено» (верхнее положение рукоятки) и «отключено» (нижнее или горизонтальное положение рукоятки). Цепь замкнута контактом только при верхнем положении рукоятки. Рубильник включают мускульным усилием, поворачивая рукоятку вверх, отключают также мускульным усилием, поворачивая рукоятку вниз.

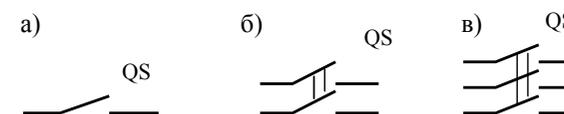


Рис. 8.12. Обозначение рубильника на электрической схеме: однополюсного (а), двухполюсного (б), трехполюсного (в)

Наиболее ответственной является операция отключения рубильника, когда разрывается цепь электрического тока и между размыкающимися контактными деталями возникает электрическая дуга. Для быстрого гашения дуги в каждом полюсе рубильника обычно предусматривается так называемый моментный нож с отключающей пружиной. Она обеспечивает мгновенное раз-

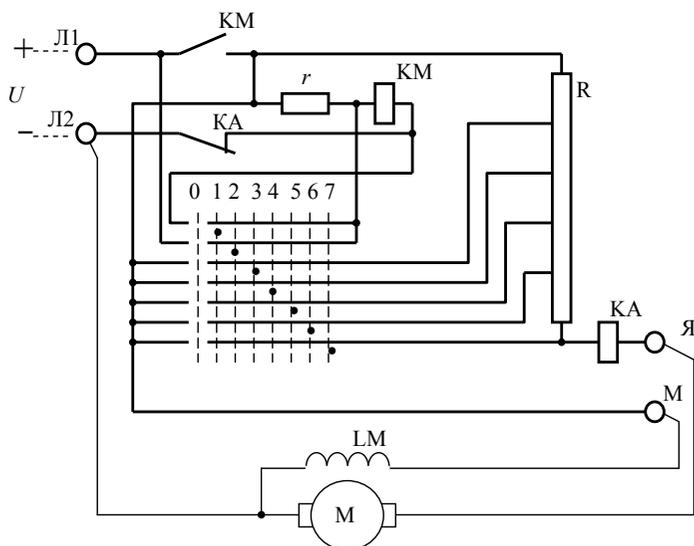


Рис. 8.11. Электрическая схема пускового реостата типа РЗП

Если в процессе работы двигатель окажется перегруженным, то сработает реле максимального тока КА и разомкнет свой контакт. При этом будет отключена катушка контактора КМ и отключен электродвигатель. Резистор r ограничивает ток в катушке КМ до значения, меньшего силы тока срабатывания. Поэтому повторное включение двигателя возможно лишь при переводе рукоятки управления в положение 2, когда напряжение на катушку КМ будет подано в обход резистора r .

При отключении электродвигателя обмотка возбуждения LM оказывается замкнутой на резистор r реостата, и энергия магнитного поля, запасенная в обмотке возбуждения, расходуется на создание тока и нагрев резистора.

Для выбора реостата необходимо использовать следующие данные: мощность двигателя, условия пуска, вид нагрузки, напряжение питания двигателя. Нужно учитывать, что согласно существующим нормам нагрев пускового реостата до предельной температуры допускается после трех пусков с интервалами между пусками, равными двойному времени пуска.

Характеристика управления (ХУ) ПУ показана на рис. 3.4а.

Поворотное передаточное устройство второго типа, показанное на рис. 3.4б, имеет рычажный механизм с двумя рычагами: ведущим 3 и ведомым 1. Рычаг 1 закреплен на оси (сечение оси показано в виде затемненного круга) и поворачивается вместе с ней на угол α по аналогии с рис. 3.4а. Ведущий рычаг 2 свободно поворачивается относительно оси на угол β . Углы поворота рычагов условно ограничены упорами в виде затемненных треугольников. Через переключающую пружину 2 передается усилие от ведущего рычага 3 ведомому рычагу 1. С помощью двух рычагов, соединенных пружиной друг с другом, создается гибкая связь между выходной переменной α передаточного устройства ПУ и входной переменной β . Для этого ПУ $\alpha \neq \beta$. Полный угол β_K поворота ведущего рычага больше полного угла α_K поворота ведомого рычага.

Механическая характеристика (МХ) ПУ в виде графика зависимости момента $M_{ПП}$ силы $F_{ПП}$ переключающей пружины, действующей на ведомый рычаг 1, от угла β поворота ведущего рычага 3 показана на рис. 3.4б. Нижний участок графика ($M_{ПП} < 0$) показывает зависимость момента $M_{ПП}$ от угла поворота β ведущего рычага, когда β увеличивается от 0 до β_K . Верхний участок графика ($M_{ПП} > 0$) отражает зависимость $M_{ПП}$ от β , когда β уменьшается от β_K до 0. В обоих случаях знак $M_{ПП}$ изменяется на противоположный, как только ведущий рычаг переходит через положение $\beta = \beta_1$ или $\beta = \beta_2$ при котором переключающая пружина сжата в максимальной степени (когда оси симметрии рычагов совпадают).

Характеристика управления (ХУ) ПУ показана на рис. 3.4б. График ХУ свидетельствует о том, что ПУ второго типа является существенно нелинейным звеном (см. п. 1.6.2) механической передачи. В такой механической передаче переключающая пружина быстро перекидывает ведомый рычаг из одного крайнего положения в другое крайнее положение ($\alpha = 0$ и $\alpha = \alpha_K$) при полном угловом перемещении ведущего рычага в пределах $0 \leq \beta \leq \beta_K$.

3.3. Электромагнитные приводные устройства

3.3.1. Электромагнит – входное устройство дистанционно управляемого аппарата

Электромагнитные приводы применяются в электромагнитных аппаратах контактной коммутации силовых цепей и цепей управления.

Входным устройством электромагнитного аппарата является *электромагнит*, который подключается к электрической цепи постоянного или переменного тока. Соответственно по обмотке катушки *электромагнита постоянного тока* после включения аппарата протекает постоянный ток, по обмотке катушки *электромагнита переменного тока* – переменный ток. Для определенности представим, что при постоянном токе полярность напряжения, приложенного к обмотке электромагнита, не изменяется, на времени включения аппарата. Ток протекает по виткам обмотки в одном направлении. Переменный ток, как это принято, будем представлять синусоидальным по форме. Переменный ток изменяет свое направление в витках обмотки с удвоенной частотой переменного напряжения электрической цепи, к которой подключена обмотка электромагнита.

Электромагнит аппарата можно представить следующим образом. Как известно, вокруг провода, по которому протекает электрический ток, образуется магнитное поле. Его представляют с помощью *линий магнитной индукции*, которые замкнуты и представляют собой концентрические окружности относительно провода. Направление линии магнитной индукции определяется по *правилу буравчика*. Если провод свернуть в виток, то линии магнитной индукции сконцентрируются внутри витка, и внутри витка сконцентрируется *магнитный поток*.

В электромагните (рис. 3.5) витки провода 2 размещаются на каркасе 1, образуя *обмотку* катушки электромагнита, которая является источником *магнитодвижущей силы* (МДС). Величина МДС равна произведению силы тока I , протекающего по виткам, на количество витков w . Благодаря МДС концы катушки с обмоткой становятся полюсами (N и S) электромагнита.

- регулировочные – для регулирования тока и напряжения;
- возбуждения – для регулирования напряжения генераторов постоянного и переменного тока и регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока;
- нагрузочные – для нагрузки генераторов или их первичных двигателей.

Во многих случаях реостат является комплектным аппаратом, в состав которого кроме резисторов входит контроллер и другие аппараты. Например, для пуска двигателей постоянного тока (при мощности до 42 кВт) применяются реостаты серий РП и РЗП. Эти реостаты помимо резисторов и контроллера содержат включающий контактор, используемый для защиты от понижения напряжения, и максимальное реле для защиты от сверхтоков. Резисторы выполнены на фарфоровых каркасах или в виде рамочных элементов. Контроллер, малогабаритный контактор и максимальное реле установлены на общей панели. Кожух защищает реостат от попадания капель воды, но не препятствует свободному потоку воздуха (для охлаждения).

8.6.2. Применение реостата для управления электродвигателем

На рис. 8.11 представлена электрическая схема пускового реостата типа РЗП.

Переключатель ступеней пуска электродвигателя М имеет восемь положений от 0 до 7. Пуск двигателя осуществляется путем перевода рукоятки управления из положения 1 в положение 2. При этом катушка контактора КМ оказывается подключенной к сети (Л1, Л2). Контакт КМ, замкнувшись, обеспечивает питание от сети обмотки возбуждения ЛМ двигателя, а также питание якорной обмотки двигателя М через резистор R . Перемещение рукоятки до позиции 7 приведет к ступенчатому уменьшению сопротивления реостата. В позиции 7 рукоятки сопротивление R будет полностью выведено и процесс пуска двигателя закончится.

менении положения рукоятки управления под действием мускульного усилия F . Импульсными усилиями F человек-оператор поворачивает рукоятку, последовательно проходя фиксированные позиции 1, 2, 3, 4 при пуске двигателя (ограничивается пусковой ток) и в обратном направлении от позиции 4 до 0 при остановке двигателя. В определенной позиции рукоятка оставляется неподвижной для продолжительной работы двигателя с требуемой скоростью вращения.

Резисторы R_1 , R_2 , R_3 не входят в состав контроллера и представляют собой отдельные конструктивные единицы, которые обычно относят к разновидностям электрических аппаратов. Выпускаются резисторы различных конструкций (в виде спирали из проволоки или ленты, навитой на цилиндрическую оправку, в виде так называемых полей и др.). Сопротивления пусковых резисторов выбираются так, чтобы броски пускового тока были ограничены по условиям безопасности для двигателя и для питающей сети.

8.6. Реостаты

8.6.1. Виды реостатов

«Металлический реостат» представляет собой электрический аппарат ручного управления, состоящий из секционного металлического резистора с отводами от секций и переключающего устройства, которым можно изменять величину сопротивления, подключая к электрической цепи комбинации из различного числа секций. В электроприводах применяют металлические реостаты со ступенчатым или с плавным изменением сопротивления при перемещении скользящего электрического контакта.

Кроме металлических реостатов есть реостаты жидкостные (сопротивление создает вода) и угольные (сопротивление создает уголь или графит).

По назначению различают следующие виды реостатов [3]:

- пусковые – для пуска электрических двигателей постоянного и переменного тока;
- пускорегулировочные – для пуска и регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока;

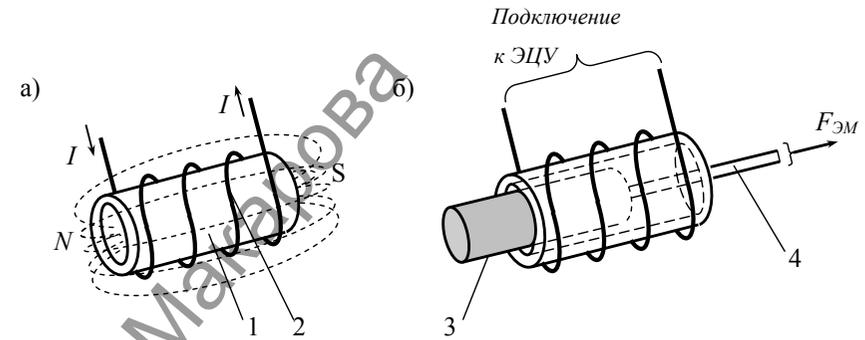


Рис. 3.5. Изобразительные модели электромагнитов

Линии магнитной индукции (представлены пунктирными линиями на рис. 3.5а) охватывают витки катушки, имея снаружи катушки направление от северного полюса N к южному полюсу S электромагнита. Если по обмотке катушки протекает постоянный ток I , то электромагнит является аналогом постоянного магнита. Чтобы определить расположение северного полюса у электромагнита, нужно мысленно охватить кистью правой руки катушку так, чтобы четыре пальца показывали направление тока в витках, тогда большой отогнутый палец покажет на северный полюс. При переменном токе расположение полюсов электромагнита изменяется с удвоенной частотой тока.

Электромагнитом называют также устройство (рис. 3.5б), состоящее из неподвижной катушки и подвижного *якоря* 3, который имеет возможность перемещаться внутри катушки вдоль ее оси. Якорь выполняют из ферромагнитного материала (электротехнической стали). Если по виткам катушки протекает ток, то якорь втягивается магнитным полем в катушку. При этом с помощью штока 4, скрепленного с якорем, от якоря может быть передано силовое воздействие $F_{ЭМ}$ какому-либо объекту, например, передаточному устройству (ПУ) аппарата. Для ПУ, показанному на рис. 3.2а, шток служит толкателем, а якорь – органом управления (ОрУ), т.к. непосредственно на якорь действует *электромагнитная сила тяги* $F_{ЭМ}$ со стороны магнитного поля, созданного катушкой

электромагнита. Управление электромагнитом осуществляется по электрической цепи (ЭЦУ), к которой подключена обмотка катушки электромагнита.

3.3.2. Электромагнитный механизм

В электрических аппаратах контактной коммутации часто применяются электромагниты такой конструкции, которая позволяет сконцентрировать магнитный поток в *магнитопроводе* вне катушки электромагнита. Такие электромагнитные устройства аппаратов называют *электромагнитными механизмами* (ЭММ). Одна из конструкций ЭММ показана на рис. 3.6.

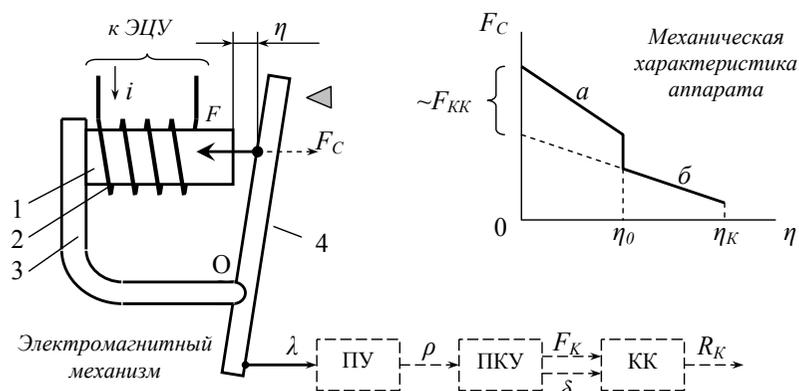


Рис. 3.6. Изобразительная модель электромагнитного механизма в составе аппарата контактной коммутации

В состав ЭММ входят следующие основные части:

намагничивающая (называют также «электромагнитная» или «включающая») катушка с обмоткой 2, расположенная на сердечнике 1 из ферромагнитного материала;

ядро 3 из ферромагнитного материала, жестко соединенное с сердечником;

якорь 4 из ферромагнитного материала (ОРУ), способный перемещаться относительно сердечника, поворачиваясь на конце О яра, и изменяя воздушный зазор η до сердечника.

ной поверхности. Орган ручного управления обычно выполнен в виде рычажной рукоятки или маховика (штурвала). Количество фиксированных положений органа управления до 10. Соответствие между положением органа управления и состоянием (разомкнутым или замкнутым) коммутирующих контактов определяется таблицей замыканий.

8.5.2. Применение контроллера для управления электродвигателем

Вариант применения контроллера QA для пуска и регулирования частоты вращения двигателя М показан на рис. 8.10а. Состояние контактов QA1, ..., QA5 контроллера для каждой позиции ОРУ определено таблицей замыканий на рис. 8.10б.

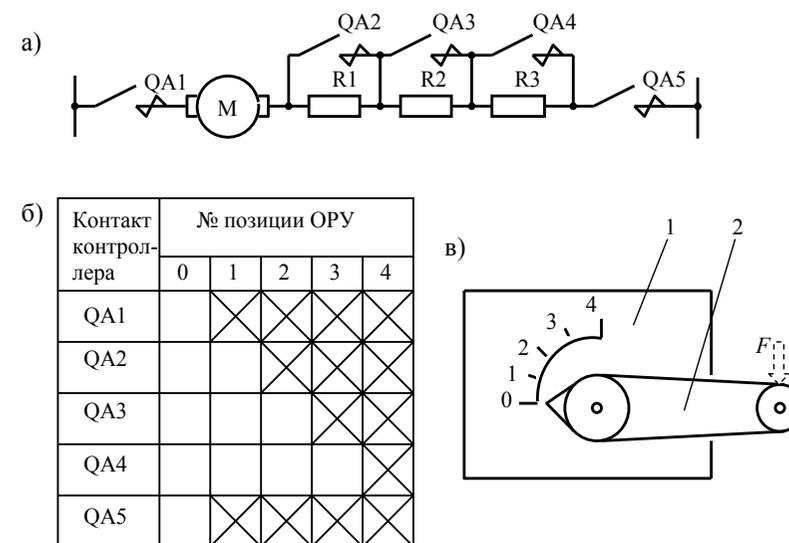


Рис. 8.10. Фрагмент электрической схемы с контактами контроллера (а), таблица замыканий (б), изобразительная модель верхней части корпуса 1 контроллера с рукояткой управления 2 (в)

В соответствии с таблицей замыканий (рис. 8.10б) двигатель отключен, если рукоятка управления (рис. 8.10в) находится в положении «0». Включение двигателя в работу и изменение его скорости вращения осуществляется при из-

8.5. Контроллеры

8.5.1. Назначение и особенности конструкции

Контроллер представляет собой многопозиционный коммутирующий аппарат с ручным управлением, предназначенный для изменения схемы подключения электродвигателя к питанию от источника электрической энергии, а также для изменения величины сопротивления резисторов, включенных в электрическую цепь. Контроллер (например, типа КВ) позволяет управлять электродвигателями мощностью до 30 кВт путем непосредственной коммутации силовых цепей.

С помощью контроллера создается канал связи человека-оператора с силовыми электрическими цепями (рис. 8.9).



Рис. 8.9. Схема взаимодействия контроллера с элементами человеко-машинной системы

Контроллер может быть представлен структурной схемой, как на рис. 8.1б. В состав контроллера входят: контактная система (КС) и механический привод с органом управления (ОрУ) и механической передачей (МП). Контроллер воздействует на электрические цепи, изменяя сопротивления $R_{K1}, R_{K2}, \dots, R_{KN}$ своих контактов, включенных в цепи. Количество коммутирующих контактов N в контактной системе контроллера до 18 (14 главных и 4 вспомогательных для серии КВ). Главные контакты могут быть рассчитаны на кратковременные токи до 600 А. Для гашения электрической дуги на главных контактах в контактной системе предусматриваются дугогасительные устройства. Вспомогательные контакты без дугогашения рассчитаны на токи до 10 А.

По конструкции контроллеры похожи на командоконтроллеры (см. п. 8.3.3), но имеют большие габариты из-за более мощной контактной системы и механической передачи. Механические части контроллера заключены в оболочку, которая позволяет закреплять его на горизонтальной или на вертикаль-

Сердечник и ярмо образуют неподвижную часть, а якорь – подвижную часть *магнитопровода* ЭММ. Части магнитопровода выполняют из магнитомягкого материала (его называют просто «сталь») с узкой петлей гистерезиса и высокой магнитной проницаемостью. В магнитопроводе концентрируется магнитный поток, созданный обмоткой катушки при подключении ее на питание от ЭЦУ.

3.3.3. Рабочий магнитный поток и поток рассеяния

По воздушному зазору между полюсом сердечника и якорем проходит рабочий магнитный поток $\Phi_{раб}$, от которого зависит величина электромагнитной силы тяги $F_{ЭМ}=F$, действующей на якорь (можно представить, что на сердечнике и на якоре по сторонам воздушного зазора сосредоточены разноименные полюса магнита). Часть магнитного потока, созданного обмоткой катушки, рассеивается вне рабочего воздушного зазора η , образуя поток рассеяния $\Phi_{рас}$. Мера концентрации магнитного потока в *магнитной цепи*, состоящей из частей магнитопровода и рабочего воздушного зазора, характеризуется коэффициентом рассеяния

$$\sigma = \frac{\Phi_{раб} + \Phi_{рас}}{\Phi_{раб}} = 1 + \frac{\Phi_{рас}}{\Phi_{раб}}$$

Электромагнитные механизмы аппаратов проектируют и создают таким образом, чтобы поток рассеяния $\Phi_{рас}$ был значительно меньше рабочего потока $\Phi_{раб}$. Тогда $\sigma \rightarrow 1$. Будем считать это условие выполненным и полагать, что $\Phi_{раб} = \Phi$, где Φ – магнитный поток, созданный обмоткой катушки ЭММ.

3.3.4. Электромагнитная сила тяги

Величина электромагнитной силы тяги F , действующей на якорь, пропорциональна квадрату величины рабочего магнитного потока Φ в воздушном зазоре между полюсом сердечника и якорем:

$$F = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 s_0}, \quad (3.2)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха ($\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Вб/(А· м)); s_0 – площадь поперечного сечения воздушного зазора (м^2), по которому распространяется поток Φ (Вб). В свою очередь мгновенное значение магнитного потока Φ зависит от силы тока i , протекающего по виткам катушки электромагнита в рассматриваемый момент времени. Эта зависимость для ЭММ определяется отношением МДС $i w$ к величине магнитного сопротивления R_M ,

$$R_M = R_{MC} + R_{M0}, \quad (3.3)$$

где R_{MC} – магнитное сопротивление магнитопровода (сердечник+ядро+якорь) ЭММ, R_{M0} – магнитное сопротивление воздушного зазора:

$$R_{M0} = \frac{\eta}{\mu_0 s_0}. \quad (3.4)$$

При наличии зазора $\eta > 0$ можно пренебречь сопротивлением R_{MC} магнитопровода ЭММ ($R_{MC} < R_{M0}$). Тогда величину Φ можно оценить по выражению

$$\Phi = \frac{i w}{R_{M0}} = \frac{i w}{\frac{\eta}{\mu_0 s_0}} = \frac{w \mu_0 s_0 i}{\eta}. \quad (3.5)$$

Согласно (3.2) и (3.5) электромагнитная сила тяги (F) пропорциональна квадрату величины отношения силы тока i , протекающего по виткам катушки ЭММ, к длине воздушного зазора η , т. е. $F \sim (i / \eta)^2$.

3.3.5. Механическая характеристика электромагнитного аппарата

Для того чтобы якорь, перемещаясь к полюсу сердечника под действием электромагнитной силы тяги F , обеспечил замыкание коммутирующего контакта (КК) и требуемое конечное нажатие $F_{КК}$ контакта (см. п. 2.2), необходимо преодолеть *статическую силу сопротивления* F_C (Н) перемещению якоря со стороны механической передачи (ПУ-ПКУ). Например, для механической передачи, показанной на рис. 3.2 а, сила F_C включает следующие основные составляющие, приведенные к точке приложения сил F и F_C :

- силу трения подвижных частей механической передачи;
- силу противодействия со стороны возвратной пружины;
- силу противодействия со стороны контактной пружины.

Когда путевой выключатель используется в качестве конечного выключателя, он выдает команду на остановку объекта в конце пути. Допустим, что скорость объекта $v(t) = ds(t)/dt > 0$ до его остановки, и команда на остановку создается замыканием контакта 1 ($d_1=1$ на рис. 8.8а). Тогда объект должен остановиться в положении, при котором координата s удовлетворяет условию – $S_1 < s < S_2$. В этом случае диапазон изменения s ограничен условием $s < S_2$, и зависимость выходного сигнала d_1 от s характеризуется нелинейностью, показанной на рис. 8.8б.

8.4.3. Разновидности путевых и конечных выключателей

Для электроприводов применяют также путевые и конечные выключатели, действующие без механической связи с контролируемым объектом. Например, выключатели на герконах (см. п. 3.8) реагируют на магнитное поле, созданное магнитным элементом, установленным на перемещающемся объекте. В некоторых выключателях используются индуктивные, индукционные, оптические или иные датчики положения (см. п. 9.2). Например, путевой выключатель ВПФ-11-01 на оптронных элементах реагирует на изменение светового потока, перекрываемого экраном объекта, когда экран (объект) перемещается между излучателем и светоприемником выключателя.

В путевом выключателе типа БВК-24 используется индуктивный датчик, выполненный на двух ферритовых магнитопроводах с обмотками [10]. Исполнительным элементом является электромагнитное реле. Управление датчиком осуществляется с помощью алюминиевой пластины, закрепленной на контролируемом объекте. Когда пластина входит в зазор между магнитопроводами, изменяется магнитная связь между обмотками индуктивного датчика, что приводит к возникновению генераторного режима работы полупроводникового усилителя и протеканию тока, достаточного для включения реле. При выходе пластины из зазора между магнитопроводами датчика генераторный режим работы усилителя прекращается и реле отключается.

ные переменные: d_1 = «контакт 1 замкнут», d_2 = «контакт 2 замкнут». Контакт 1 может замкнуться только при $dx(t)/dt > 0$, контакт 2 замкнется только при $dx(t)/dt < 0$ (рис. 8.7б).

Для кнопочного выключателя переменная x (рис. 8.7в) характеризует линейное перемещение кнопки относительно нейтрального положения при соприкосновении с перемещающимся объектом. Характеристики управления $d_1=f_1(x)$ и $d_2=f_2(x)$ по выходу замыкающего контакта 1 и размыкающего контакта 2 показаны на рис. 8.7г.

На рис. 8.8а на примере выключателя ВК-311 отображено действие путевого выключателя в зависимости от координаты перемещения s контролируемого объекта (см. также рис. 8.6).

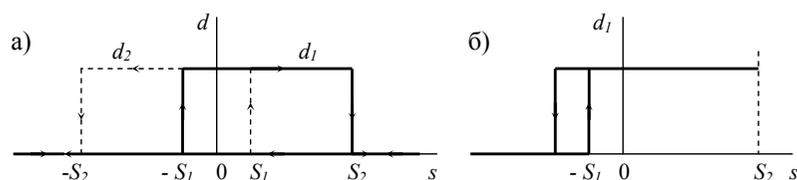


Рис. 8.8. Зависимость выходных сигналов путевого выключателя (а) и конечного выключателя (б) от координаты s перемещения объекта

Сплошными линиями показано как изменяется положение контакта 1 (см. рис. 8.7а, рис. 8.7б), пунктирными линиями – положение контакта 2 в зависимости от перемещения s объекта. Если $v(t)=ds(t)/dt>0$, то при $s(t)<-S_1$ контакт 1 разомкнут и $d_1=0$; при $S_1<s(t)<S_2$ контакт 1 замкнут, $d_1=1$; при $s(t)>S_2$ контакт 1 разомкнут, $d_1=0$. Контакт 2 все это время разомкнут и $d_2=0$. Когда объект перемещается в противоположном направлении $v(t)=ds(t)/dt<0$, контакт 1 остается разомкнутым ($d_1=0$); замыкается контакт 2 при $s(t)<S_1$ и остается замкнутым ($d_2=1$) до тех пор, пока объект не переместится на расстояние, при котором $s(t)<-S_2$. Если затем вновь $v(t)=ds(t)/dt>0$, то контакт 2 не замкнется ($d_2=0$).

На рис. 3.6 показан график, который отражает зависимость силы F_C от величины зазора η между полюсом сердечника и якорем. Эту зависимость называют *механической характеристикой* аппарата. На участке *a* графика ($0\leq\eta<\eta_0$) противодействие силе тяги F оказывают контактная и возвратная пружины механической передачи. Когда якорь полностью притянут к сердечнику ($\eta=0$), тогда контактной пружиной создается конечное нажатие F_{KK} контакта. Соответствующая составляющая силы F_C отмечена на графике фигурной скобкой и обозначением « F_{KK} ». На участке *б* графика ($\eta_0<\eta\leq\eta_K$) контактная пружина не оказывает противодействия силе F . Если КК мостиковый (см. рис. 2.1 и рис. 3.2а), то длина интервала $(\eta_0, \eta_K]$ пропорциональна раствору контакта δ_p , а длина интервала $[0, \eta_0]$ пропорциональна провалу контакта Δl_K (см. п. 2.2). Очевидно, что замыкание КК произойдет за конечное время тогда, когда график зависимости силы тяги F от хода якоря η (см. п. 3.4.3 и п. 3.6.4) располагается выше механической характеристики при всех значениях η на интервале $(0, \eta_K)$.

3.3.6. Особенности действия механической передачи с электромагнитным механизмом

При включении аппарата якорь быстро перемещается ($d\eta/dt<0$) к сердечнику ЭММ из положения $\eta=\eta_K$ в положение $\eta=0$ под действием электромагнитной силы тяги F . У замыкающего КК сначала выбирается раствор δ_p контакта, при этом зазор δ контакта уменьшается до нуля (см. рис. 2.1). При $\eta=\eta_0$, $\delta=0$ происходит удар подвижной контактной детали о неподвижную контактную деталь замыкающего контакта. Затем при дальнейшем движении якоря к сердечнику сохраняется $\delta=0$; толкатель подвижного контактного узла (ПКУ) перемещается на величину провала Δl_K , и при $\eta=0$, если $d\eta/dt<0$, якорь ударяется о полюс сердечника.

При отключении аппарата якорь перемещается ($d\eta/dt>0$) из положения $\eta=0$ в положение $\eta=\eta_K$. Перемещение якоря при $F=0$ вызывает возвратная пружина, а на начальном участке и контактная пружина. Отдавая накопленную

энергию, пружины вызывают ударные столкновения подвижных деталей механической передачи с неподвижными деталями.

Удары подвижных деталей механической передачи аппарата сопровождаются «отскоками» и вибрациями деталей, а также звуковыми эффектами.

3.3.7. Нейтральные электромагнитные приводы

Нетрудно заметить, что в рассмотренном ЭММ направление действия электромагнитной силы тяги F не зависит от направления тока в витках катушки. Поэтому ЭММ принципиально способен работать при постоянном и при переменном токе. Электромагнитные приводы с такими ЭММ называют *нейтральными приводными устройствами*. Аппарат, в котором установлено нейтральное приводное устройство, называют *нейтральным электромагнитным аппаратом*. Например, электромагнитное реле переменного тока является нейтральным реле.

3.4. Электромагнитный привод постоянного тока

3.4.1. Переходные процессы в электромагнитном приводе

Представим электромагнитный привод аппарата контактной коммутации с помощью следующей структурной схемы (рис. 3.7).

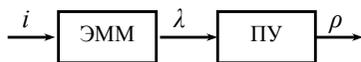


Рис. 3.7. Структурная схема электромагнитного привода

Будем полагать, что электромагнитный механизм (ЭММ) и передаточное устройство (ПУ) представлены изобразительными моделями как на рис. 3.6 и на рис. 3.2а (роль ОпУ исполняет якорь ЭММ). Обмотка катушки ЭММ привода постоянного тока подключается к электрической цепи управления (ЭЦУ) постоянного тока с источником напряжения U .

При *включении* аппарата обмотка катушки ЭММ подключается под напряжение U ($|U| > 0$), например, с помощью коммутирующего контакта друго-

пустимый длительный ток коммутирующих контактов 10 А (до 20 А у некоторых выключателей серии УБ). Переключение контактов в рычажных выключателях осуществляется воздействием объекта на рычаг (рис. 8.6а), который передает движение подвижному контактному узлу (см. п. 2.2.1). В кнопочных выключателях переключение контактов производится нажатием перемещающегося объекта на толкатель (шток), с которым связан подвижный контактный узел, во вращающихся — вращением кулачковых шайб, передающих движение контактам от вала кинематической цепи. Срабатывание этих выключателей происходит при механическом контакте контролируемого объекта с органом управления выключателя (приводным рычагом, кнопкой или др.).

8.4.2. Характеристики управления путевого и конечного выключателей

Путевые и конечные выключатели являются нелинейными элементами автоматизированных электроприводов. На рис. 8.7 показаны характеристики управления и схемы контактных систем путевых и конечных выключателей рычажного типа ВК-311 и кнопочного типа ВК-111.

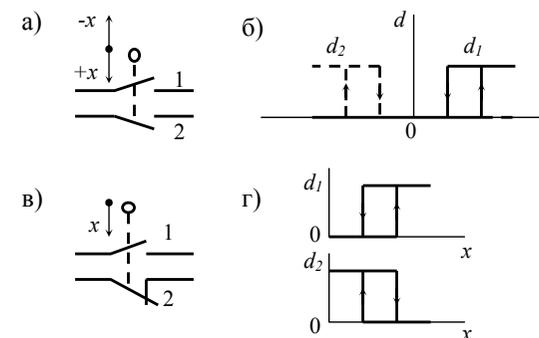


Рис. 8.7. Контактные системы выключателей ВК-311, ВК-111 (а, в) и характеристики управления выключателей (б, г)

Для рычажного выключателя переменная x (рис. 8.7а) характеризует угол отклонения рычага от нейтрального (вертикального на рис. 8.6а) положения со знаком «+» против направления движения часовой стрелки. Две выход-

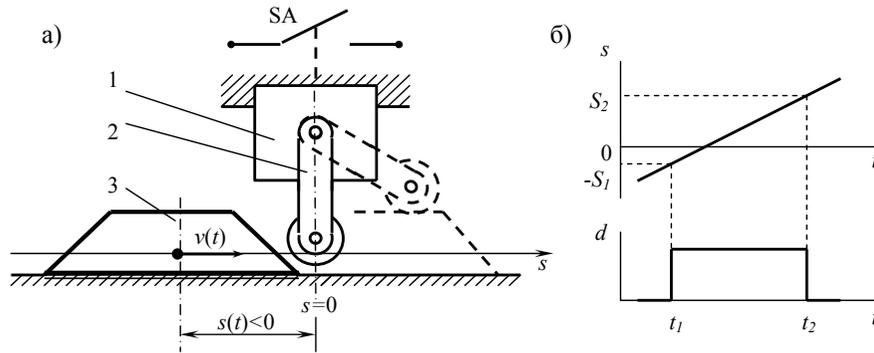


Рис. 8.6. Иллюстрация принципа работы путевого выключателя с помощью изобразительной модели (а) и временных диаграмм (б)

Воздействие на орган управления 2 (рычаг) выключателя зависит от координаты $s(t)$ положения объекта, которая изменяется со скоростью $v(t)=ds(t)/dt$. Скорость перемещения органа управления (ОРУ на рис. 8.1б) выключателя полностью определяется скоростью $v(t)$ движения объекта и координатой его положения $s(t)$. Для ускоренного размыкания и замыкания контактов при малых $v(t)$ в путевых и конечных выключателях используются механические передачи с защелками и механизмами мгновенного переключения (см. п. 3.2.3, п. 3.2.4).

На рис. 8.6б показаны временные диаграммы, характеризующие действие путевого (конечного) выключателя с замыкающим контактом при $v(t)>0$ на всем времени движения объекта. Переменная d определена высказыванием $d=\langle \text{контакт замкнут} \rangle$.

Замыкание контакта происходит при $s = -S_1$ ($S_1>0$), когда приводной рычаг поворачивается против часовой стрелки (см. рис. 8.6а). Возвращение приводного рычага в исходное положение и размыкание контакта происходит под действием возвратной пружины при $s = S_2$ ($S_2>0$), когда пропадает механический контакт ролика с объектом при перемещении объекта со скоростью $v(t)>0$.

Механические путевые и конечные выключатели в зависимости от конструкции подразделяют на рычажные (например, ВК-311, КУ-740), кнопочные (например, ВК-111), вращающиеся (например, серии УБ) и др. Они выполняются на напряжение до 380 В переменного тока и до 220 В постоянного тока. До-

го аппарата. Следовательно, на обмотке ЭММ падает напряжение U . При отключении аппарата обмотка катушки ЭММ перестает получать питание, и приложенное к обмотке напряжение равно нулю ($U=0$).

Включение и отключение аппарата с электромагнитным приводом вызывают переходные процессы изменения тока i в обмотке ЭММ от нуля до установившегося значения I_{ycm} при включении и от $i=I_{ycm}$ до нуля при отключении. Как известно, переходный процесс при включении может быть описан дифференциальным уравнением

$$L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} + R_0 i = U \quad (3.6)$$

с начальным значением $i=0$. В этом уравнении: R_0 (Ом) – сопротивление обмотки катушки ЭММ, L (Гн) – индуктивность катушки ЭММ.

По определению индуктивность L есть отношение *потокосцепления* Φw к силе тока i , где w – количество витков обмотки катушки ЭММ. Используя формулу (3.5), получим (см. рис. 3.5) при $\eta>0$:

$$L = \frac{\Phi w}{i} = \frac{w \mu_0 s_0}{\eta} i w = \frac{\mu_0 s_0 w^2}{\eta} \quad (3.7)$$

Из (3.7) следует, что индуктивность L изменяется при изменении величины воздушного зазора η , и, следовательно, изменяется во времени t в переходных процессах включения и отключения аппарата, что отражено в уравнении (3.6) слагаемым с производной dL/dt .

Переходный процесс отключения аппарата зависит от способа прерывания питания обмотки катушки электромагнита. Если концы обмотки соединяются электрически коротко, например, обмотка шунтируется с помощью коммутирующего контакта другого аппарата, то переходный процесс описывается уравнением (3.6), в правой части которого $U=0$. Если цепь питания обмотки электромагнита разрывается контактом какого-либо отключающего аппарата и обмотка электромагнита не шунтируется, то к сопротивлению R_0 обмотки

нужно добавить сопротивление R_d электрической дуги, возникшей на контакте отключающего аппарата (см. п. 2.4).

Характер изменения величины зазора η от времени t в переходном процессе зависит от электромагнитной силы тяги F , изменяющейся в соответствии с формулами (3.2) и (3.5), а также от сил, создаваемых возвратной (в передаточном устройстве ПУ) и контактной (в подвижном контактном узле ПКУ) пружинами, от сил трения подвижных частей механической передачи и от их массы, приведенной к точке приложения силы F . При этих условиях аналитическое решение уравнения (3.6) представляет сложную задачу.

3.4.2. Динамические характеристики электромагнитного привода

На рис. 3.8 показаны графики переходных процессов, полученные на основе экспериментов с электромагнитными аппаратами [2].

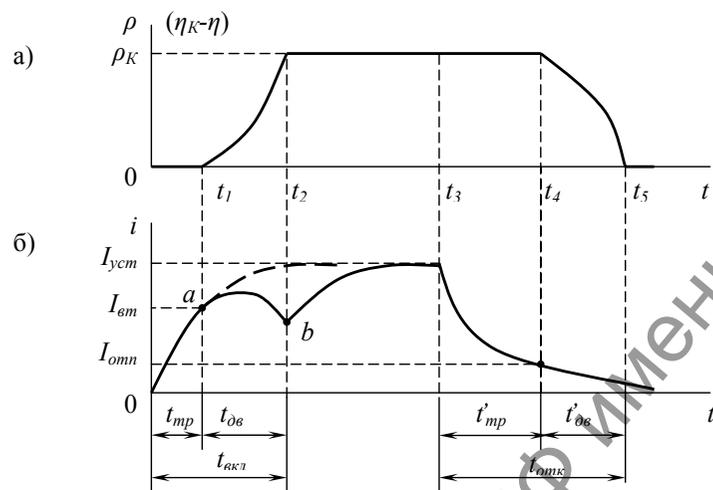


Рис. 3.8. Переходные процессы при включении и отключении электромагнитного привода

Для аппарата, который может быть представлен изобразительными моделями, показанными на рис. 3.6 и 3.2а, перемещение ρ толкателя ПУ пропорционально разности $\eta_k - \eta$, где η_k – величина максимального зазора между полюсом

мыканий нужно использовать таблицу истинности. Так, в приведенном на рис. 8.4б примере командоаппарата количество входов равно пяти, количество выходов четыре. Логические переменные:

$x_i =$ «сигнал действует на i -том входе» (рукоятка находится в i -ой позиции),

$y_j =$ «сигнал действует на j -ом выходе» (j -ая цепь замкнута контактом).

Входы и выходы шифратора – аналога командоаппарата, с обозначением логических переменных и таблица истинности показаны на рис. 8.5а, логическая схема, реализованная на элементах ИЛИ – на рис. 8.5б.

8.4. Путевые и конечные выключатели

8.4.1. Механический путевой выключатель

Механический путевой выключатель представляет собой командоаппарат, кинематически связанный с рабочей машиной, предназначенный для срабатывания на определенных расстояниях ее пути [3]. Конечный выключатель – это путевой выключатель, приводимый в действие рабочей машиной или ее частью в конце пути. У электропривода роль рабочей машины может выполнять звено кинематической цепи передачи механической энергии рабочему органу технологического механизма или сам рабочий орган.

Механический путевой или конечный выключатель может быть представлен структурной схемой, как на рис. 8.1б. Входное воздействие создается контролируемым объектом, перемещающимся с некоторой (возможно малой) скоростью. В контактной системе обычно предусматривается один замыкающий контакт и один размыкающий контакт (может быть и другая комбинация контактов).

На рис. 8.6 приведена изобразительная модель путевого (конечного) выключателя (1), реагирующего на линейное перемещение объекта, например, части рабочей машины (3). Показан один коммутирующий контакт SA выключателя, который замыкается при изменении положения органа управления – приводного рычага с роликом 2.

Каждая серия командоконтроллеров имеет несколько типов, отличающихся количеством фиксированных положений рукоятки и таблицами замыканий.

Для управления металлургическими установками применяются командоаппараты серии КА11 с магнитоуправляемыми контактами (герконами). Они рассчитаны на напряжение 30 В и коммутацию токов 0,5 А.

8.3.5. Электронные аналоги некоторых командоаппаратов

Электронным аналогом командоаппарата является *шифратор* – узел цифровой системы, который формирует на выходе двоичный код при появлении сигнала на одном из входов (рис. 8.5).

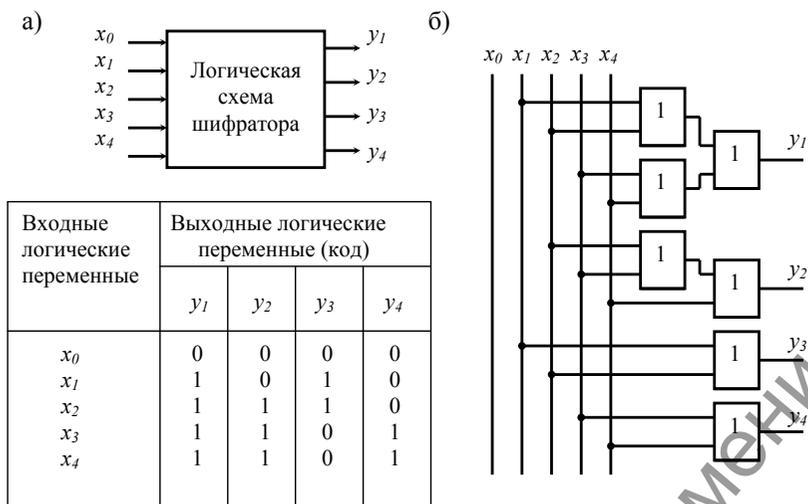


Рис. 8.5. Представление командоаппарата логической схемой шифратора

Реализовать шифратор можно на логических элементах, если каждой позиции органа управления командоаппарата поставить в соответствие отдельный вход шифратора и учесть, что в любой момент времени сигнал управления может поступать только по одному из входов. Тогда коммутирующим контактам командоаппарата будут соответствовать выходы шифратора, а разрядность кода будет определяться количеством контактов. В этом случае вместо таблицы за-

сердечника и якорем ЭММ. График на рис. 3.8 а показывает зависимость перемещения ρ толкателя и хода η_{κ} -якоря (в разных масштабах) от времени t при включении и отключении рассматриваемого аппарата.

С момента времени $t=0$ подключения обмотки катушки под постоянное напряжение U , когда $\eta=\eta_{\kappa}$ и $\rho=0$ (якорь откинут от сердечника до упора на рис. 3.6), ток i в обмотке возрастает по экспоненциальному закону

$$i(t) = I_{уст} (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (3.8)$$

где $I_{уст}=U/R_0$ – установившееся значение тока в обмотке катушки электромагнита, $T=L/R_0$ – постоянная времени ЭММ при откинута якоря. Выражение (3.8) есть решение дифференциального уравнения (3.6) при неподвижном оттянутом от сердечника возвратной пружиной якоря, когда $dL/dt=0$.

По мере возрастания тока i увеличивается тяговое усилие F , действующее на якорь. С момента времени t_1 при токе $i=I_{ом}$ (точка а на нижнем графике) сила тяги преодолевает статическую силу сопротивления F_c (см. п. 3.4), и якорь начинает перемещаться к сердечнику. Интервал времени t_{mp} с момента $t=0$ включения ЭММ привода до момента t_1 начала движения якоря называют *временем трогания на включение*.

Движение якоря до соприкосновения с сердечником в момент t_2 сопровождается изменением величины индуктивности L . Изменение тока по кривой ab представляет решение уравнения (3.6) при $dL/dt \neq 0$. Индуктивность системы на интервале $t_{о\в}$ времени движения возросла и при $t > t_2$ практически не изменяется с увеличением тока i . С момента t_2 ток увеличивается экспоненциально до установившегося значения $I_{уст}$.

Интервал времени $t_{о\в}$ называют *временем движения*, а интервал $t_{вкл}=t_{mp}+t_{о\в}$ – *временем включения* (или *временем срабатывания*, или *временем вытягивания*).

Допустим, что отключение ЭММ привода путем обрыва тока в обмотке катушки осуществляется в момент t_3 . В зависимости от скорости гашения электрической дуги на контакте отключающего аппарата, ток в обмотке и электро-

магнитная сила F будут уменьшаться при еще неподвижном якоре некоторое время до момента t_4 . В этот момент при токе «отпадания» $i=I_{omn}$ произойдет отрыв якоря от сердечника возвратной пружины, сила которой станет больше электромагнитной силы тяги. Интервал времени t'_{mp} называют *временем трогания на отключение*.

Далее якорь переместится в разомкнутое положение ($\eta = \eta_K$), при котором $\rho=0$, и остановится в момент времени t_5 . Интервал времени t'_{ov} определяет *время движения якоря при отключении*.

Интервал времени $t_{omk} = t'_{mp} + t'_{ov}$ называют *временем отключения* (или *временем отпускания*, или *временем отпадания*).

Для аппаратов с электромагнитным приводом постоянного тока время включения составляет сотые или десятые доли секунды. Как правило, время отключения аппарата немного меньше времени включения.

3.4.3. Установившийся режим работы электромагнитного привода, тяговая характеристика

Для установившегося режима работы электромагнитного привода при постоянном токе $i=I_{ycm}=U/R_0$ в обмотке катушки ЭММ, когда положение якоря определяется координатой $0 < \eta \leq \eta_K$, электромагнитная сила тяги F может быть оценена по формулам (3.2) и (3.5):

$$F = \frac{(I_{ycm} w)^2 \mu_0 s_0}{2\eta^2}. \quad (3.9)$$

Величина установившегося тока $I_{ycm}=U/R_0$ не зависит от положения η якоря ЭММ, т. к. R_0 и U постоянные величины. Магнитная проницаемость μ_0 воздуха также постоянная величина. Если допустить, что коэффициент рассеяния $\sigma=1$ (см. п. 3.4) и площадь s_0 поперечного сечения воздушного зазора равна площади полюса сердечника (см. рис. 3.6) и $s_0=const$, то формула (3.9) определяет идеальную статическую *тяговую характеристику* $F=f(\eta)$ электромагнитного привода. Она представляет собой функциональную зависимость (f) величины F электромагнитной силы тяги от величины η воздушного зазора между

8.3.4. Разновидности командоконтроллеров

По конструктивному исполнению различают плоские, барабанные и кулачковые командоконтроллеры. Наибольшее применение получили кулачковые командоконтроллеры нерегулируемые и регулируемые.

В нерегулируемом командоконтроллере замыкание и размыкание контакта в зависимости от угла поворота приводного вала определяется профилем кулачковой шайбы, воздействующей на толкатель (см. п. 3.2.2). При заданной конфигурации шайбы момент замыкания или размыкания контакта соответствует определенному углу поворота вала и регулироваться не может.

В регулируемом командоконтроллере на круглой шайбе, закрепленной на приводном валу, находятся два кулачка. Они могут передвигаться при настройке командоконтроллера. Один из кулачков, воздействуя на толкатель (или приводной рычаг) механической передачи, приводя к замыканию контакта. Второй из кулачков, воздействуя на защелку (см. п. 3.2.3), освобождает толкатель от защелки. Под действием возвратной пружины толкатель возвращается в исходное положение, контакт размыкается.

Одна кулачковая шайба при повороте приводного вала может приводить в действие один или два коммутирующих контакта. Количество шайб в командоконтроллере может достигать 12, а количество коммутируемых цепей 24. Допустимый длительный ток контактов составляет 10...20 А., ток включения 50...75 А, отключаемый постоянный ток 0,5...2,5 А при индуктивной нагрузке, отключаемый переменный ток 10 А (серия КК8000 командоконтроллеров).

Командоконтроллеры серии КН выполняются с органом управления в виде рукоятки или маховичка. Применяются в электроприводах крановых механизмов. Они устанавливаются на подставках или подвешиваются.

Командоконтроллеры серии КТ применяются на судах для управления электроприводами различных палубных механизмов. Они выполняются с рукояткой, устанавливаются на тумбе на открытой палубе.

8.3.2. Универсальные пакетные ключи управления

Универсальные пакетные ключи по принципу устройства подобны универсальным переключателям. Они состоят из набора секций, на которых укреплены неподвижные контактные детали и размещены подвижные контактные узлы с мостиками. За счет различных конфигураций мостиков получают разнообразные таблицы замыканий контактов и переключения с разрывом или без разрыва тока.

Пакетные ключи выполняют с фиксированными положениями рукоятки, а также с самовозвратом. Применяются для цепей переменного и постоянного тока напряжением до 220 В.

8.3.3. Командоконтроллер

Командоконтроллер – это командоаппарат с ручным (может быть с ножным) или сервомоторным приводом³³, подвижные контакты которого последовательно замыкаются или размыкаются при повороте его приводного вала [2]. Командоконтроллер с сервоприводом иногда называют *программным реле*.

Применяются командоконтроллеры для переключений в цепях управления сложных схем автоматизированного электропривода при большой частоте переключений и когда требуется строгое чередование в последовательности действий отдельных механизмов [3]. Предназначены для работы в цепях до 440 В постоянного тока и 500 В переменного тока.

Структура командоконтроллера может быть представлена схемой, показанной на рис. 8.1б. Как и универсальный переключатель, командоконтроллер имеет орган управления, который может перемещаться из одной фиксированной позиции в другую фиксированную позицию. При этом состояние коммутирующих (подвижных) контактов и коммутируемых ими цепей в зависимости от позиции органа управления определяется электрической схемой и таблицей замыканий, примеры которых приведены на рис. 8.4б, рис 8.4в.

якорем и полюсом сердечника ЭММ. График идеальной тяговой характеристики показан на рис. 3.9 сплошной линией.

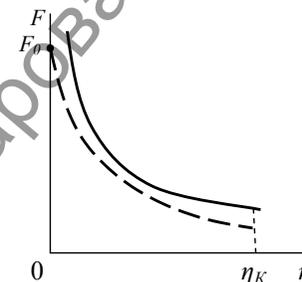


Рис. 3.9. Статическая тяговая характеристика электромагнитного привода постоянного тока

Реальная тяговая характеристика электромагнитного привода аппарата (пунктирная линия на рис. 3.9) располагается ниже идеальной характеристики. Объясняется это тем, что при малом зазоре между якорем и сердечником, когда $\eta \rightarrow 0$, магнитное сопротивление R_{M0} воздушного зазора в (3.3) приближается к нулевому значению, а магнитное сопротивление R_{MC} магнитопровода ЭММ сохраняет конечное значение. Поэтому при $\eta=0$ в выражении (3.5) вместо R_{M0} следует учитывать R_{MC} . Следовательно, величина магнитного потока Φ при $\eta \rightarrow 0$ принимает конечное значение $\Phi_0 = (I_{уст} w) / R_{MC}$. Ему соответствует конечное значение электромагнитной силы тяги $F = F_0$, как определяет формула (3.2). Кроме этого с увеличением зазора η возрастает магнитный поток рассеяния, и уменьшается рабочий магнитный поток, что объясняет отклонение реальной тяговой характеристики от идеальной характеристики при $\eta > 0$.

3.4.4. Характеристика управления электромагнитного привода

Характеристика управления электромагнитного привода определяется функциональной зависимостью выходной переменной ρ или α (соответственно для прямоходового или поворотного передаточного устройства ПУ) от входного управляющего воздействия, которое характеризуется обычно уровнем при-

ложенного к обмотке катушки ЭММ напряжения U или силой тока I , протекающего по виткам обмотки.

Воспользуемся рис. 3.8 и учтем, что действие электромагнита на якорь не зависит от направления тока I в обмотке электромагнита. Представим зависимость ρ от I для статического режима работы электромагнитного привода, т. е. характеристику управления привода в графической форме (рис. 3.10).

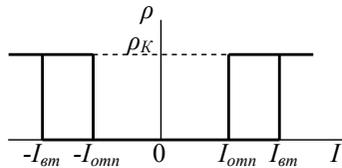


Рис. 3.10. Характеристика управления нейтрального электромагнитного привода постоянного тока

Координата ρ определяет положение толкателя ПУ. Направление тока в обмотке характеризуется знаком тока I , значения которого откладываются по оси абсцисс. При возрастании тока I по абсолютной величине $|I|$ от нуля якорь притянется к сердечнику ЭММ и толкатель ПУ переместится из положения $\rho=0$ в положение $\rho=\rho_K$, когда $|I|$ достигнет значения тока втягивания $I_{отн}$. При дальнейшем увеличении $|I|$ сохранится $\rho=\rho_K$. Если $|I|$ уменьшается, то якорь оторвется от сердечника ЭММ возвратной пружиной ПУ и толкатель переместится из положения $\rho=\rho_K$ в положение $\rho=0$, когда $|I|$ достигнет значения тока отпущения $I_{омн}$. Аналогичным образом изменяется угловая координата α поворотного ПУ, если вместо прямоходового ПУ использовать поворотное ПУ (тогда на графике нужно заменить ρ на α).

Вид графика характеристики управления не изменится, если за входное управляющее воздействие вместо тока I принято напряжение U . В этом случае для характеристики управления нужно заменить $I_{отн}$ на $U_{отн}$ и $I_{омн}$ на $U_{омн}$.

Рассмотренный электромагнитный привод постоянного тока является нейтральным приводным устройством (см. п. 3.3.7).

Орган управления преобразует мускульное усилие человека в момент силы, который воздействует через механические передачи (МП) на коммутирующие контакты контактной системы (КС) аппарата (рис. 8.1б, см. также п. 3.2).

На рис. 8.4а обозначены пять фиксированных позиций (0...4) рукоятки, в каждой из которых она может находиться неограниченное время, если к рукоятке не прикладывается мускульное усилие. Каждой позиции рукоятки соответствует определенная комбинация из разомкнутых и замкнутых контактов контактной системы переключателя. Это может быть отражено на электрической схеме аппарата, например, так, как показано на рис. 8.4б, или в таблице замыканий, как на рис. 8.4в (количество контактов в этом примере $N=4$). Точками на пунктирных линиях схемы (рис. 8.4б) обозначают, что цепь замкнута контактом в соответствующей позиции ОпУ. Точку ставят непосредственно под линией электрической цепи, которая замкнута контактом. Так в позиции 0 все контакты разомкнуты. В позиции 1 замкнуты контакты цепи 1 и цепи 3; остальные контакты разомкнуты. В позиции 2 замкнуты контакты в цепях 1, 2, 3; контакт 4 разомкнут и т.д.

На рис. 8.4в показана таблица замыканий для аппарата, представленного на рис. 8.4б электрической схемой. Таблица замыканий характеризует состояние выходов аппарата. Стоки таблицы показывают, в каком состоянии находится контакт коммутируемой цепи при разных позициях ОпУ. В пересечениях строк и столбцов обычно крестом отмечают контакт, находящийся в замкнутом состоянии. Разомкнутый контакт не отмечают.

Контакты универсальных переключателей (например, серии УП-5000) допускают длительную нагрузку до 20 А. Отключающая способность, в зависимости от количества переключений, напряжения сети и индуктивности нагрузки составляет от 1 до 120 А переменного тока и от 0,1 до 20 А постоянного тока. Механическая износостойчивость не менее 500000 переключений.

где знаки «+» и «-» означают соответственно выполнение операций логического сложения (ИЛИ) и логического умножения (И). Действие логического узла характеризуют временные диаграммы на рис. 8.3д (сравните с диаграммами на рис. 8.2г).

8.3. Универсальные переключатели, командоконтроллеры

8.3.1. Универсальные переключатели, таблицы замыканий

Универсальные переключатели предназначены для ручной коммутации цепей постоянного и переменного тока напряжением до 500 В. Применяются для переключения цепей управления серводвигателями и цепей контрольно-измерительных приборов, применяются в качестве переключателей полюсов многоскоростных асинхронных электродвигателей малой мощности.

Переключатели различных типов или серий отличаются друг от друга количеством коммутирующих контактов (от 2 до 24) и фиксированных положений рукоятки (от 2 до 9), а также диаграммами (таблицами) замыканий контактов.

В переключателе предусматривается *орган управления* (ОрУ) в виде рукоятки (пример на рис. 8.4а) или в ином исполнении.

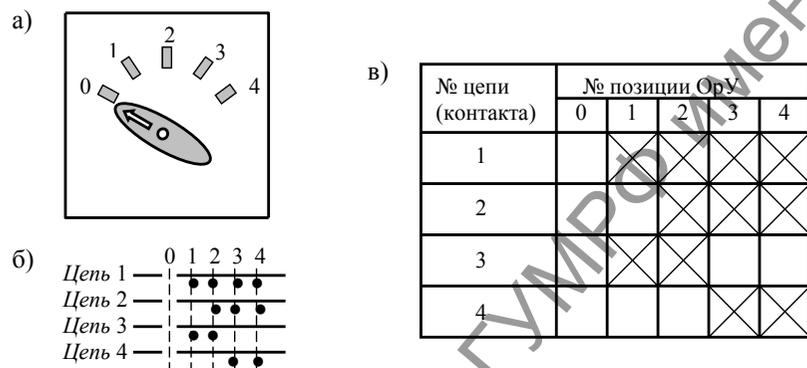


Рис. 8.4. Панель с органом управления (а), примеры электрической схемы (б) и таблицы замыканий (в) командоаппарата

3.4.5. Коэффициент возврата электромагнитного привода

Благодаря конечному значению силы тяги F при $\eta=0$, ток отпускания I_{omn} якоря от сердечника ЭММ при отключении аппарата имеет конечное значение (см. рис. 3.9). Отношение тока I_{omn} (или соответствующей МДС) отпускания к току $I_{вм}$ (или соответствующей МДС) втягивания называют *коэффициентом возврата*:

$$k_B = \frac{I_{omn}}{I_{вм}} = \frac{(Iw)_{omn}}{(Iw)_{вм}}. \quad (3.10)$$

Аналогичным образом определяют коэффициент возврата электромагнитного привода постоянного тока, заменив ток отпускания I_{omn} на напряжение отпускания U_{omn} и ток втягивания $I_{вм}$ на напряжение втягивания $U_{вм}$.

Для увеличения коэффициента возврата (при необходимости) в ЭММ устанавливают немагнитную прокладку между якорем и сердечником, прикрепляя ее к сердечнику или к якорю. С помощью прокладки обеспечивают требуемый зазор η между якорем и сердечником для положения якоря, когда он притянут к сердечнику электромагнитной силой F . Увеличение такого зазора приводит к увеличению коэффициента возврата за счет увеличения тока I_{omn} (и напряжения U_{omn}) отпускания.

3.4.6. Магнитные системы нейтральных

электромагнитных приводов постоянного тока

Магнитная система электромагнитного привода аппарата представляет собой совокупность частей магнитопровода и воздушных зазоров, которая при наличии магнитодвижущей силы (МДС) создает сконцентрированные магнитные потоки и электромагнитную силу тяги, действующую на якорь электромагнитного механизма (ЭММ) привода аппарата.

На рис. 3.11 показаны изобразительные модели некоторых типичных магнитных систем приводов постоянного тока: с прямоходовым якорем на рис. 3.11а, б; с втягивающимся якорем на рис. 3.11 в, с поворотным якорем на рис.

3.11 г, д, е. Магнитные системы, изображенные на рис. 3.11 г, д называют также клапанными магнитными системами.

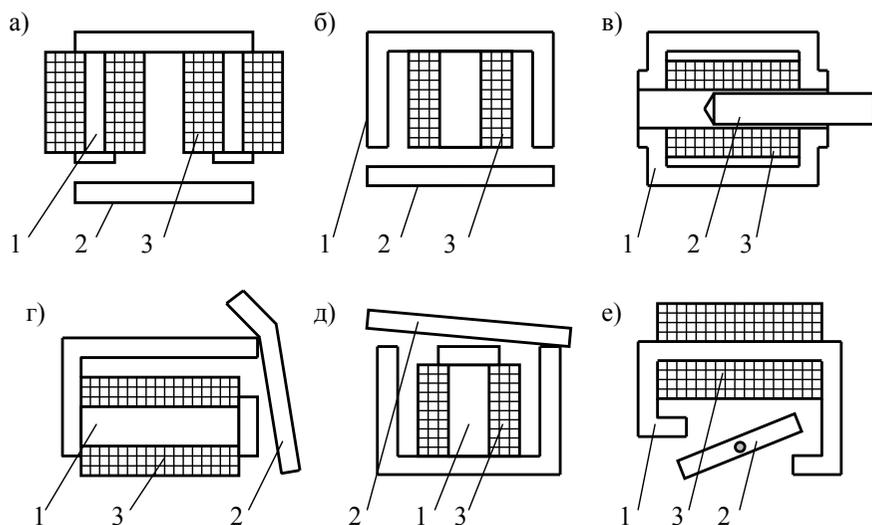


Рис. 3.11. Изобразительные модели магнитных систем нейтральных электромагнитных приводов постоянного тока

Магнитные системы различаются по конструкции неподвижного магнитопровода 1 и якоря 2. Могут содержать от одного до трех рабочих воздушных зазоров и до двух катушек 3, обмотки которых подключаются последовательно или параллельно к электрической цепи управления. Часто сердечники, на которых размещены катушки, выполняют круглого сечения (рис. 3.11 а, б, г, д)

Статические тяговые характеристики некоторых приводов с магнитными системами постоянного тока могут существенно отличаться от тяговой характеристики, показанной на рис. 3.9 для привода с клапанной магнитной системой. Например, магнитная система с втягивающимся якорем (рис. 3.11 в) придает тяговой характеристике вид, показанный на рис. 3.12. При симметричном положении якоря относительно центра катушки ($\eta=0$) электромагнитная сила тяги F равна нулю. При переходе якоря через это положение сила тяги изменяет направление действия на якорь.

рых узлов формирования сигналов управления с помощью кнопок и логических элементов приведены на рис. 8.3.

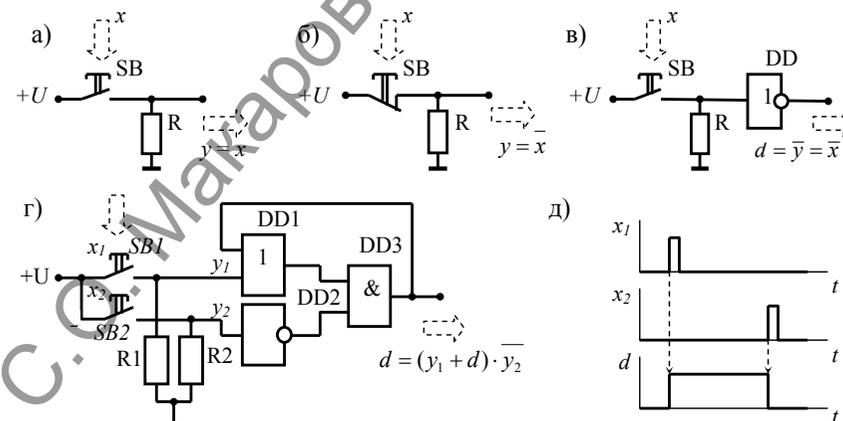


Рис. 8.3. Применение кнопок управления для формирования сигналов управления в микроэлектронных логических и цифровых системах

Логические переменные, указанные на схемах, определены следующими высказываниями:

$$x_{(1,2)} = \langle \text{«кнопке SB(1,2) приложено усилие } F_{SB(1,2)} \rangle,$$

$$y_{(1,2)} = \langle \text{«на резисторе R(1,2) падает напряжение } U \rangle.$$

$$d = \langle \text{«на выходе узла действует напряжение } U \rangle.$$

Черта над буквой означает инверсию логической переменной.

Сравнение рис. 8.3б и рис. 8.3в показывает возможность замены кнопки с размыкающим контактом на кнопку с замыкающим контактом при сохранении логической функции узла.

На рис. 8.3г приведена схема узла с памятью, функционально подобного узлу дистанционного управления, показанному на рис. 8.2в. Связь между выходной переменной d и входными переменными x_1, x_2 (сигналы $x_1=1$ и $x_2=1$ разделены во времени) определяется логическим выражением

$$d = (x_1 + d) \cdot \overline{x_2},$$

кающий контакт, у кнопки SB2 – размыкающий контакт. По цепи протекает ток I , если замкнут контакт SB2 и хотя бы один из контактов SB1 или К.

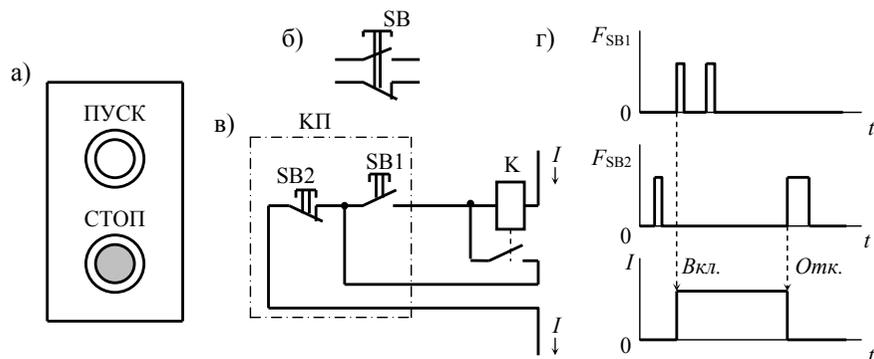


Рис. 8.2. Кнопочный пост управления и применение его в узле дистанционного управления

Из схемы рис. 8.2в следует, что дистанционная связь между кнопочным постом КП и аппаратом К осуществляется по трем проводникам.

Временные диаграммы на рис. 8.2г в упрощенном виде отражают процессы включения (*Вкл.*) и отключения (*Откл.*) аппарата К при воздействии на кнопку SB1 мускульным усилием F_{SB1} и мускульным усилием F_{SB2} на кнопку SB2.

Промышленность выпускает различные по допустимым токам и напряжениям кнопки управления и кнопочные посты. Например, кнопочные посты серии КУ выполняют на номинальное напряжение до 500 В переменного тока и до 440 В постоянного тока. Контакты кнопок допускают продолжительный ток до 15 А и кратковременный ток до 60 А. На базе кнопок серии КЕ выпускаются кнопочные посты серии ПКВ с тремя, четырьмя или пятью кнопками. Они рассчитаны на напряжение до 500 В и номинальный ток 6,3 А.

8.2.2. Узлы цифровых систем с кнопками управления

В клавиатуре, используемой для ввода команд в цифровую систему, применяются слаботочные кнопки управления с самовозвратом. Схемы некото-

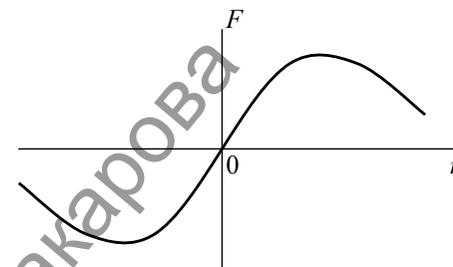


Рис. 3.12. Примерный вид статической тяговой характеристики электромагнитного привода с втягивающимся якорем

Статические тяговые характеристики могут изменяться в широких пределах путем изменения формы полюсов. Выбор формы полюсов и исполнения магнитной системы в основном зависит от механической характеристики аппарата (см. п. 3.3.5).

3.5. Поляризованный электромагнитный привод

3.5.1. Особенности конструкции и работы

Поляризованный электромагнитный привод электрического аппарата отличается от нейтрального привода, рассмотренного в п. 3.5, другой конструкцией электромагнитного механизма (ЭММ). В таком ЭММ создаются два независимых друг от друга магнитных потока: один – постоянным магнитом $N-S$, другой – обмотками Об1, Об2 электромагнита (рис. 3.13). Магнитный поток постоянного магнита называют *поляризующим* магнитным потоком. Соответственно электромагнитный механизм аппарата представляет собой *поляризованный электромагнитный механизм* (ПЭММ).

В ПЭММ создается разветвленная магнитная цепь, состоящая из неподвижного магнитопровода 1, закрепленного на нем постоянного магнита 4 и подвижного якоря 2, закрепленного на оси 3. Якорь имеет возможность поворачиваться вместе с осью, изменяя воздушные зазоры η_1 и η_2 относительно полюсов магнитопровода. Угол β поворота якоря будем отсчитывать от левого полюса магнитопровода. Когда якорь занимает положение у правого полюса, угол

β принимает конечное значение $\beta = \beta_K$. Предельные левое и правое положения якоря условно ограничены на рис. 3.13 затемненными треугольниками. Таким образом, угол β может изменяться в диапазоне $0 \leq \beta \leq \beta_K$.

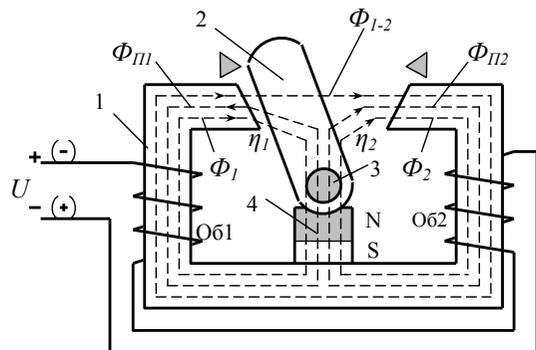


Рис. 3.13. Изобразительная модель поляризованного электромагнитного механизма

Обмотка Об1 охватывает левый контур магнитной цепи ПЭЭМ, обмотка Об2 – правый контур. В общей для контуров ветви находится постоянный магнит, который создает поляризующий магнитный поток Φ_{Π} (вместо постоянного магнита для создания Φ_{Π} может использоваться электромагнит с независимым источником питания). Поток Φ_{Π} разветвляется, образуя в рабочих зазорах η_1 и η_2 потоки $\Phi_{\Pi 1}$ и $\Phi_{\Pi 2}$. Направления магнитных потоков показаны стрелками.

Второй рабочий поток Φ обусловлен магнитодвижущей силой (МДС) обмоток Об1 и Об2, когда на них подается напряжение U от источника управляющего воздействия через электрическую цепь управления (ЭЦУ). Обмотки соединены последовательно согласно (могут быть соединены параллельно согласно). Если положительный потенциал «+» приложенного напряжения U подается на Об1, а отрицательный «-» – на Об2, то рабочий магнитный поток Φ разветвится на потоки Φ_1 , Φ_2 , Φ_{1-2} так, как показано на рис. 3.13. В результате в рабочем зазоре η_1 будет результирующий поток

$$\Phi_{\eta 1} = \Phi_{\Pi 1} - \Phi_{1-2} - \Phi_1,$$

а в зазоре η_2 – поток

ной позиции, например, «ВЫКЛ» (выключено) часто присваивается номер 0, другой позиции «ВКЛ» (включено) присваивается 1 и т. п.

У *командоаппарата с самовозвратом* ОрУ после прекращения управляющего (мышечного) воздействия F на его входе возвращается в исходную позицию возвратной пружиной механической передачи, и коммутирующие контакты КС возвращаются в исходное состояние. *Командоаппарат без самовозврата* сохраняет положение органа управления и состояние коммутирующих контактов после прекращения воздействия F на входе. Например, кнопка управления в зависимости от конструкции приводного устройства может быть с самовозвратом (см. п. 6.2) или без самовозврата. В последнем случае включение и отключение производятся последовательными импульсами мышечных усилий.

8.2. Кнопки управления и кнопочные посты

8.2.1. Применение кнопок для дистанционного управления аппаратами

В системах управления электроприводов и других системах автоматики получили наибольшее распространение кнопки управления с самовозвратом (без памяти). Их применяют, главным образом, для дистанционного управления аппаратами с электромагнитным приводом постоянного или переменного тока с напряжением до 500 В. Несколько кнопок, установленных на общей панели или смонтированных в общем корпусе, образуют *кнопочный пост* (пример на рис. 8.2а).

Каждая кнопка поста имеет в своей контактной системе один замыкающий контакт и один размыкающий контакт (рис. 8.2б).

Электрическая схема узла дистанционного управления с кнопочным постом на рис. 8.2в иллюстрирует применение кнопочного поста (КП) для дистанционного управления электромагнитным аппаратом (К), например, контактором. При построении схемы использован способ совмещенного изображения частей контактора – электромагнитного привода и вспомогательного контакта (обозначены буквой К). У кнопки SB1 подключен к электрической цепи замы-

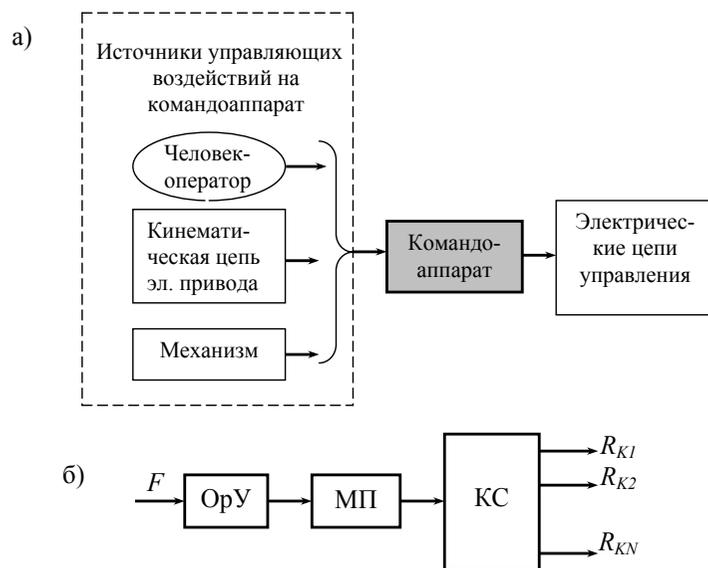


Рис. 8.1. Обобщенная схема взаимодействия командоаппарата с элементами человеко-машинной системы (а) и структурная схема командоаппарата (б)

В состав командоаппарата (рис. 8.1б) входят: контактная система (КС) с коммутирующими контактами, орган управления (ОрУ) и механическая передача (МП). Составные части (КС, ОрУ и МП) у разных командоаппаратов отличаются по конструкции. Особенности и характеристики этих частей рассмотрены в разделах 1, 2, 3.

Командоаппараты воздействуют на электрические цепи управления путем резкого изменения сопротивлений $R_{K1}, R_{K2}, \dots, R_{KN}$ своих контактов, включенных в цепи. Количество N коммутирующих контактов в КС командоаппарата может быть от 1 до 24.

ОрУ командоаппарата ручного управления конструктивно приспособлен к восприятию мускульного усилия F человека и может занимать несколько фиксированных позиций (от одной у кнопки управления с самовозвратом до девяти у кодакоконтроллера и более). Этим позициям могут быть приписаны какие-либо обозначения или номера, например, «Ручное управление», «Автоматическое управление»; «Вперед», «Назад»; «ВКЛ.», «ВЫКЛ.» и т.п. Исход-

$$\Phi_{\eta_2} = \Phi_{\Pi_2} + \Phi_{1-2} + \Phi_2.$$

Конструкцию и параметры ПЭЭМ выбирают такими, что $\Phi_{\eta_2} > \Phi_{\eta_1}$ и, несмотря на то, что $\eta_2 > \eta_1$, сила тяги F_{η_2} якоря к правому полюсу оказывается больше силы тяги F_{η_1} к левому полюсу. При этих условиях якорь переместится от левого полюса магнитопровода из положения $\beta=0$ к правому полюсу в положение $\beta=\beta_K$, повернувшись по часовой стрелке и передав поворот с помощью оси (обозначена цифрой «3» на рис. 3.13) передаточному устройству (ПУ) привода аппарата. Используется ПУ с жесткой связью (см. рис. 3.4 а), рычаг которого закреплен на оси ПЭЭМ.

Если после перемещения якоря к правому полюсу магнитопровода отключить обмотки Об1 и Об2 от питания ($U=0$), то якорь сохранит принятое им положение благодаря действию сил, создаваемых постоянным магнитом ПЭЭМ и переключающей пружины ПУ.

При изменении полярности приложенного к обмоткам напряжения U на противоположную (отмечена в скобках на рис. 3.13) изменится направление тока в обмотках Об1 и Об2, магнитные потоки $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_{1-2}$ поменяют свое направление на противоположное, а направление потоков $\Phi_{\Pi_1}, \Phi_{\Pi_2}$ останется прежним. В результате станет $\Phi_{\eta_1} > \Phi_{\eta_2}$ и $F_{\eta_1} > F_{\eta_2}$. Якорь переместится от правого полюса сердечника к левому полюсу, повернувшись против часовой стрелки. Принятое якорем положение останется устойчивым после отключения обмоток от напряжения.

3.5.2. Характеристика управления поляризованного привода с переключающей пружиной

Характеристика управления электромагнитного привода с рассмотренным ПЭЭМ определяется функциональной зависимостью выходной переменной ПУ $\alpha=\beta$ от входного управляющего воздействия U или тока I , протекающего по виткам обмоток Ор1, Ор2. Для удобства сравнения с характеристикой управления нейтрального электромагнитного привода (рис. 3.10), представим характеристику управления привода с ПЭЭМ в функции тока I . Сохраним обо-

значение « $I_{эм}$ » для силы тока I , при котором происходит «втягивание» якоря, т. е. отрыв якоря от полюса сердечника и перебрасывание его к другому полюсу (в данном случае ток отпускания относительно одного полюса магнитопровода равен току втягивания со знаком минус относительно другого полюса магнитопровода, т. е. $I_{отп} = -I_{эм}$). На рис. 3.14 а условно показана переключающая пружина (1) в составе привода, определяющая специфику его работы.

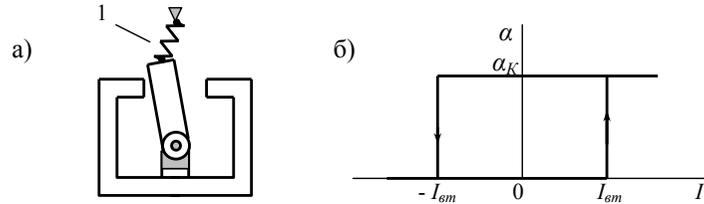


Рис. 3.14. Изобразительная модель механизма поляризованного привода с переключающей пружиной (а) и характеристика управления привода (б)

Представим зависимость α от I для статического режима работы электромагнитного привода, т. е. характеристику управления привода в графической форме (рис. 3.14 б). Координата α является выходной переменной ПУ. Направление тока в обмотках Об1, Об2 характеризуется знаком тока I , значения которого откладываются по оси абсцисс. Действие привода при изменении тока I зависит от направления тока в обмотке ПЭММ и от начального положения якоря ПЭММ. На графике характеристики управления показаны стрелками переходы якоря из одного устойчивого положения в другое устойчивое положение.

Вид графика характеристики управления не изменится, если за входное управляющее воздействие вместо тока I принято напряжение U . В этом случае для характеристики управления нужно заменить $I_{эм}$ на $U_{эм}$ и $-I_{эм}$ на $-U_{эм}$.

3.5.3. Характеристика управления поляризованного привода с возвратной пружиной

В аппаратах кроме рассмотренного привода с переключающей пружиной применяют также другие конструкции поляризованных электромагнитных при-

Глава 8 АППАРАТЫ РУЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ, КОМАНДОАППАРАТЫ

8.1. Общие сведения

Командоаппаратами называют устройства преимущественно ручного управления, предназначенные для переключений в цепях управления электроаппаратами постоянного или переменного тока [3]. Замыкая и размыкая при помощи командоаппарата те или иные цепи, человек-оператор может дистанционно подать команду³⁰, например, на запуск или остановку электрической машины или на изменение режима ее работы. Команда несет информацию о задаче управления объектом.

Среди командоаппаратов выделяют:

- кнопки управления;
- универсальные переключатели и пакетные ключи;
- командоконтроллеры;
- путевые и конечные выключатели и переключатели.

Первые три выделенные группы командоаппаратов – это аппараты ручного управления (АРУ – см. п. 1.2). На вход АРУ поступает сигнал от человека, передаваемый импульсом мускульного усилия.

Путевые и конечные выключатели и переключатели приводятся в действие перемещающимся элементом какого-либо механизма. Сигнал аппарату поступает от механизма, в электроприводе, например, от элемента кинематической цепи.

На своем выходе командоаппарат формирует сигнал (код команды) с помощью коммутирующих контактов.

Место командоаппарата в системе «человек-машина»³² и структурная схема командоаппарата отображены на рис. 8.1.

ления. Оловянные шарики растворяют медную проволоку в местах своего расположения. Возникшая в этих местах электрическая дуга расплавляет затем медную проволоку по всей длине.

7.6.4. Особенности выбора предохранителей

Отечественная промышленность выпускает несколько серий предохранителей, например, ПР-2, ПН-2, ПДС, ПД, ПК и др. Предохранители изготавливают также совмещенными с рубильниками для неавтоматического отключения цепей напряжением до 500 В и защиты от токов короткого замыкания и перегрузки. Тип этих аппаратов РПП 11, номинальный ток 80...250 А. Для защиты полупроводниковых установок от коротких замыканий используются быстродействующие предохранители типа ПП, ППД. Они предназначены только для защиты от токов короткого замыкания. Защита от перегрузок должна выполняться другими аппаратами.

При выборе предохранителя (плавкой вставки) необходимо учитывать наибольшее значение тока на данном участке электрической цепи, защищаемой предохранителем, и соблюсти условие $I_{Нпр} \geq I_{Нвс}$. Если нагрузкой является электродвигатель, то следует учитывать пусковой ток этого двигателя или ток реверсирования. Для защиты асинхронного двигателя номинальный ток плавкой вставки принимают:

$$I_{Нвс} = (I_{Нов} \lambda_i) / \alpha,$$

где $I_{Нов}$ – номинальный ток электродвигателя, λ_i – кратность пускового тока, которая принимается по каталогу для выбранного типоразмера асинхронного двигателя; α – коэффициент, учитывающий особенности пуска: $\alpha = 2,5$, если пуск кратковременный (не более 5 с); $\alpha = 1,6 \dots 2,0$, если условия пуска тяжелые (пуск под нагрузкой) и он продолжается до 15...20 с.

Если на защищаемом участке цепи имеется несколько двигателей, то плавкую вставку нужно выбирать из расчета пуска двигателя с наибольшим пусковым током при предварительном включении всех остальных двигателей и прочих нагрузок.

водов. Например, если в приводе с ПЭММ, показанном на рис. 3.13, применен ПУ не с переключающей пружиной (см. рис. 3.14 а), а с возвратной пружиной, предназначенной для перемещения якоря в вертикальное (нейтральное) положение после отключения питания обмоток Об1, Об2, то характеристика управления будет отличаться от характеристики показанной на рис. 3.14 б. На рис. 3.15а условно в составе привода показаны возвратные пружины (1), (2), которые определяют специфику работы привода в данном случае. Характеристика управления поляризованного электромагнитного привода с возвратными пружинами представлена на рис. 3.15 б.

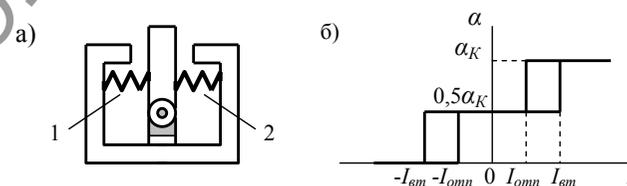


Рис. 3.15. Изобразительная модель механизма поляризованного привода с возвратными пружинами (а) и характеристика управления привода (б)

В отличие от характеристики управления нейтрального электромагнитного привода (см. рис. 3.10), в данном случае направление действующей на якорь электромагнитной силы тяги $F = F_{\eta 1} - F_{\eta 2}$ (и ее знак) зависит от направления (и знака) тока I в витках обмотки. Обычно начало отсчета угла α поворота оси ПЭММ привязывают к нейтральному положению якоря ПЭММ при $I=0$. Тогда, введя новую выходную переменную $\Delta\alpha = \alpha - 0,5\alpha_K$, представим характеристику управления в виде, в котором она чаще встречается в технической литературе (рис. 3.16).

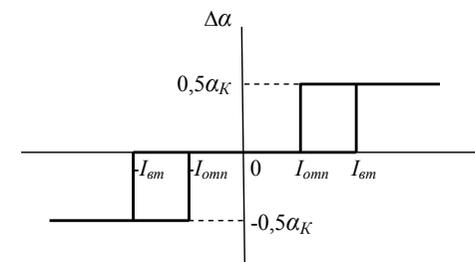


Рис. 3.16. Характеристика управления поляризованного электромагнитного привода с возвратной пружиной

3.6. Электромагнитный привод переменного тока

Представим электромагнитный привод переменного тока аппарата контактной коммутации с помощью структурной схемы, показанной на рис. 3.6. В состав привода входят электромагнитный механизм (ЭММ) и передаточное устройство (ПУ) с возвратной пружиной. Как и для привода постоянного тока полагаем, что ЭММ и ПУ представлены изобразительными моделями как на рис. 3.6 и на рис. 3.2а (роль ОрУ исполняет якорь ЭММ). Обмотка катушки ЭММ привода переменного тока присоединена к электрической цепи управления (ЭЦУ) переменного тока с источником напряжения синусоидальной формы.

3.6.1. Катушка привода, индуктивность катушки

Если на обмотку катушки ЭММ подано переменное напряжение и U – его действующее значение, то по виткам обмотки будет протекать переменный ток i с действующим значением

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\pi f L)^2}}, \quad (3.11)$$

где R – активное сопротивление обмотки катушки ЭММ (Ом), f – циклическая частота переменного напряжения и тока (Гц), L – индуктивность катушки ЭММ (Гн).

Индуктивность L катушки, входящей в состав ЭММ, зависит от количества витков w обмотки и магнитного сопротивления R_M магнитной цепи ЭММ (см. выражение (3.3)). Величина R_M , в свою очередь, зависит от величины воздушного зазора η между якорем и полюсом сердечника ЭММ (см. рис. 3.6). При максимальном зазоре ($\eta = \eta_K$) индуктивность $L = L_{\min}$ определяется магнитным сопротивлением R_{M0} воздушного зазора в соответствии с (3.7) и (3.4):

$$L_{\min} = \frac{w^2}{R_{M0}}$$

При отсутствии зазора ($\eta = 0$) индуктивность $L = L_{\max}$ определяется магнитным сопротивлением R_{MC} стали магнитопровода (ядро+сердечник+якорь):

Ток, на который рассчитана плавкая вставка для длительной работы, называют *номинальным током плавкой вставки* $I_{Нес}$. Ток, на который рассчитаны токоведущие и контактные части предохранителя, называют *номинальным током предохранителя* ($I_{Нпр}$).

Кроме времятоковой характеристики плавкой вставки, предохранитель характеризуется *предельной разрывной способностью*, т.е. наибольшим значением тока короткого замыкания, при котором гарантируется надежность работы предохранителя. Чем выше разрывная способность, тем лучше качество предохранителя.

7.6.3. Разновидности плавких вставок

Для повышения чувствительности к плавающему току плавкие вставки изготавливают фигурной формы, как на рис. 5.11а. Током перегрузки $I > I_{Нес}$ фигурная вставка нагревается в большей степени в узких местах. В этих местах вставка перегорает (расплавляется) от тока перегрузки или от тока короткого замыкания. Большие токи короткого замыкания могут вызывать электродинамические силы, под действием которых плавкая вставка разрывается в узких местах, не успев нагреться до температуры плавления.

Фигурные плавкие вставки в большинстве исполнений изготавливают из цинка в виде пластин, имеющих от одного до четырех сужений. Применение цинка, стойкого против коррозии, и придание вставке фигурной формы позволяют получить необходимую времятоковую характеристику стабильную во времени.

Снижение температуры, при которой вставка перегорает, достигается путем использования так называемого металлургического эффекта. Он заключается в том, что многие легкоплавкие металлы (олово, свинец и др.) в расплавленном состоянии растворяют некоторые тугоплавкие металлы (медь, латунь, серебро и др.). На тонкую диаметром до 1 мм медную проволоку наносится шарик из олова диаметром до 3 мм. При нагревании такой вставки предохранителя током перегрузки сначала плавится олово, имеющее низкую температуру плав-

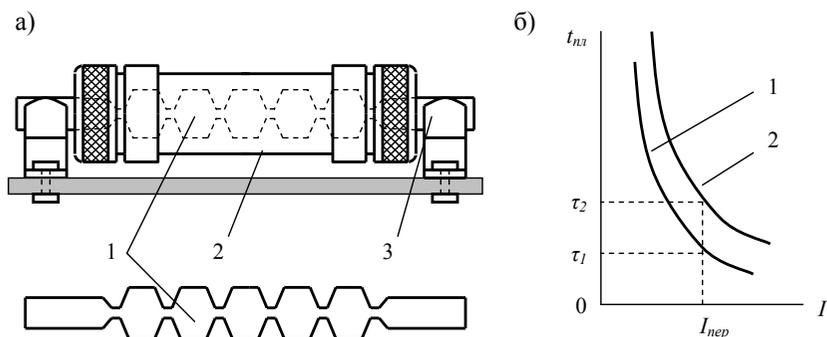


Рис. 7.11. Предохранитель и плавкая вставка (а); времятоковые характеристики плавких вставок (б)

Конструкции предохранителей разнообразны. В большинстве своем они состоят из следующих частей: 1) плавкой вставки 1, помещенной в корпус 2, за пределы которого выходят две контактные детали плавкой вставки; 2) контактного устройства 3, конструкция которого позволяет подсоединить предохранитель в разрыв электрической цепи и извлекать его для замены предохранителя или плавкой вставки.

7.6.2. Времятоковая характеристика предохранителя

Времятоковая (защитная) характеристика предохранителя представляет собой зависимость времени $t_{пл}$ плавления вставки от протекающего через нее тока I . На рис. 7.12б приведены времятоковые характеристики 1 и 2 двух плавких вставок на различные номинальные токи $I_{ном1} < I_{ном2}$. Каждая кривая имеет вертикальную асимптоту, соответствующую минимальному плавящему току, при котором $t_{пл} \rightarrow \infty$. При одном и том же токе перегрузки $I_{пер}$ время плавления (τ_1) вставки 1 меньше времени плавления (τ_2) вставки 2.

В месте расплава вставки появляется электрическая дуга. Поэтому для локализации и быстрого гашения дуги плавкую вставку помещают в стеклянный или фарфоровый корпус, и заполняют его кварцевым песком. Электрическая дуга, возникающая в среде песка, разбивается на множество мелких дуг и быстро гаснет.

$$L_{max} = \frac{w^2}{R_{MC}}$$

Для ЭММ электрических аппаратов $R_{MC} \ll R_{M0}$ и $L_{max} \gg L_{min}$. Поэтому (см. выражение (3.11)) действующее значение тока, протекающего по виткам обмотки катушки ЭММ при разомкнутом якоре ($\eta = \eta_K$) существенно больше действующего значения тока при замкнутом якоре ($\eta = 0$). Значения токов могут отличаться на порядок (в десять раз).

Обмотку катушки ЭММ переменного тока обычно рассчитывают для продолжительной работы при замкнутом якоре. Поэтому включение обмотки под напряжение, когда якорь разомкнут, сопровождается пусковым током, существенно превышающим номинальный ток катушки. Частое чередование включения и отключения электромагнитного привода переменного тока может привести к повышенному нагреву ЭММ и аппарата в целом (см. п. 1.5). Кроме этого на повышенный нагрев ЭММ влияют вихревые токи в магнитопроводе ЭММ. Для увеличения отдачи тепла в окружающую среду в ЭММ переменного тока применяют катушку небольшой длины и увеличенного диаметра по сравнению с катушкой ЭММ постоянного тока. Для уменьшения вихревых токов сердечник, ярмо и якорь выполняют шихтованными, т. е. состоящими из электрически изолированных друг от друга, плотно прижатых друг к другу пластин толщиной от 0,3 до 1 мм. Пластины изготовляют из электротехнической стали с малым гистерезисом характеристики намагничивания.

Если сравнить на основе выражения (3.11) катушку ЭММ переменного тока с катушкой ЭММ постоянного тока по величине электрического сопротивления провода обмотки, то можно заключить, что провод катушки ЭММ переменного тока имеет меньшее сопротивление, например, за счет увеличения диаметра провода и (или) уменьшения количества витков обмотки. Отличие катушек объясняется наличием в выражении (3.11) реактивного индуктивного сопротивления $X_L = 2\pi fL$ большой величины по сравнению с величиной сопротивления провода витков обмотки катушки ЭММ переменного тока (обмотка

ЭММ постоянного тока не создает реактивного сопротивления при работе в установившемся режиме).

3.6.2. Вибрация якоря электромагнитного механизма

В установившемся режиме работы электромагнитного привода переменного тока магнитный поток $\Phi(t)$ (рис. 3.17 а) в магнитной цепи ЭММ между полюсом магнитопровода 1 и якорем 2 изменяется во времени t по синусоидальному закону (рис. 3.17 б), как и приложенное к обмотке катушки ЭММ напряжение, независимо от положения якоря.

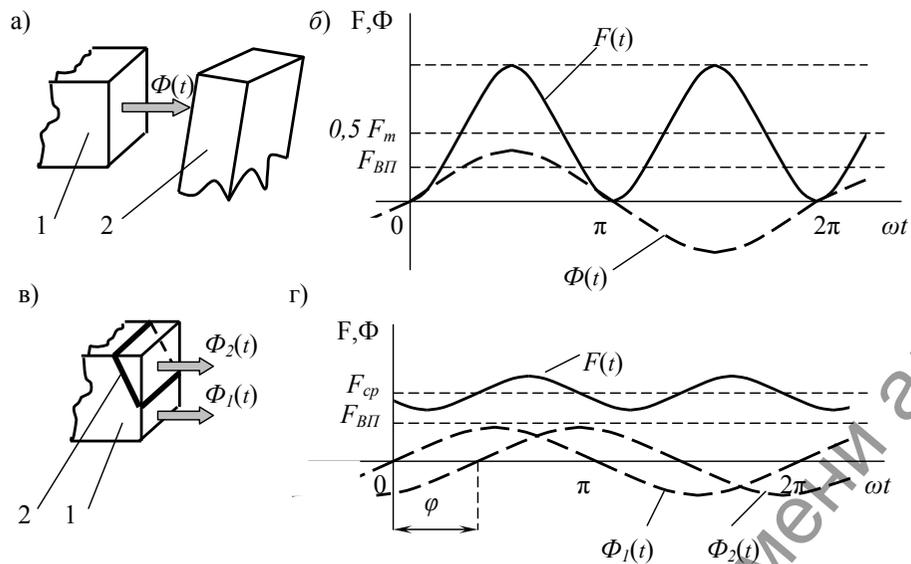


Рис. 3.17. Образование силы тяги в электромагнитном механизме переменного тока

Представим

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t),$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота тока в витках обмотки катушки ЭММ, Φ_m – амплитудное значение магнитного потока $\Phi(t)$. Тогда сила тяги $F(t)$, действующая на якорь, согласно (3.2), изменяется во времени по закону

7.5.2. Подключение УЗО к электрической цепи

Схема подключений УЗО в трехфазной сети показана на рис. 7.10.

УЗО подразделяют на четырехполюсные (фазы L1, L2, L3 + нейтраль N), как на схеме, и двухполюсные (фаза + нейтраль N).

Для ВДТ нормируется номинальный длительно протекающий через выключатель ток. Для АВДТ нормируется номинальный ток электротепловых расцепителей, установленных в фазные линии.

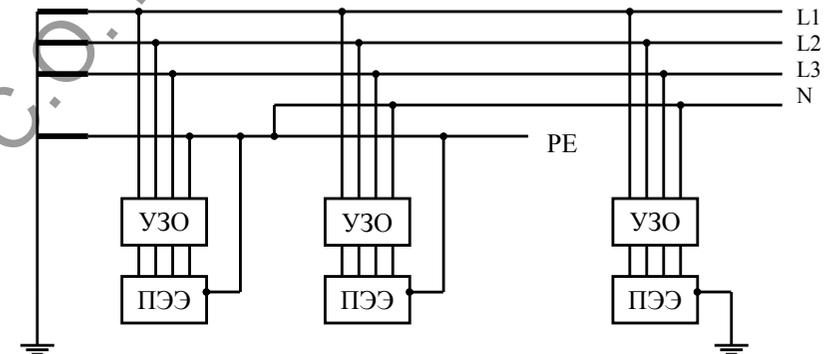


Рис. 7.10. Схема подключений четырехполюсных УЗО

7.6. Плавкие предохранители

7.6.1. Назначение и составные части предохранителя

Предохранители – это электрические аппараты, предназначенные для защиты электрических цепей от токовых перегрузок и токов короткого замыкания путем разрушения плавкой вставки, включенной последовательно с защищаемой цепью. Для восстановления цепи необходимо в предохранителе заменить разрушенную (перегоревшую) плавкую вставку на новую плавкую вставку (рис. 7.11а).

ключен чувствительный орган устройства управления (УУ) – электромагнитный механизм (ЭММ), воздействующий на защелку привода коммутирующих контактов. Защитный проводник (РЕ) отделен от ВДТ.

В состав УУ кроме электромагнитного механизма входит орган ручного управления включением (по воздействию $x_{вкл}$) и отключением (по воздействию $x_{отк}$) ВДТ, а также механическая передача с защелкой. Упор с защелки снимает якорь ЭММ. Тогда ВДТ отключается, и контакты размыкаются.

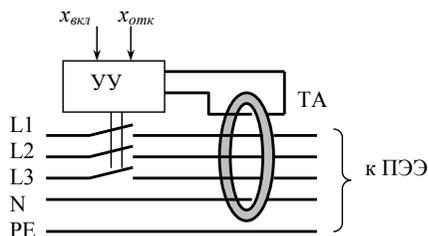


Рис. 7.9. Функциональная схема участка трехфазной цепи с выключателем дифференциального тока

При отсутствии токов утечки на землю на участке между коммутирующими контактами и приемником электрической энергии (ПЭЭ), а также в самом ПЭЭ сумма магнитодвижущих сил первичных цепей трансформатора ТА равна нулю в любой момент времени. МДС возникает во вторичной обмотке трансформатора при нарушении баланса токов первичных цепей из-за возникновения тока утечки на землю. При увеличении тока утечки возрастает МДС вторичной цепи трансформатора, что приводит к срабатыванию УУ и размыканию коммутирующих контактов УЗО при некотором значении тока утечки. Стандартизированы следующие значения тока утечки, при котором срабатывает ВДТ: 10, 30, 100, 300, 500, 1000 мА. Для защиты человека от поражения электрическим током применяют ВДТ с пороговым значением тока утечки 30 мА. В целях пожарной безопасности применяют ВДТ с порогом 300 мА.

$$F(t) = \frac{\Phi_m^2}{2\mu_0 s_p} \sin^2 \omega t = F_m \sin^2 \omega t = \frac{F_m}{2} (1 - \cos 2\omega t),$$

где $F_m = \frac{\Phi_m^2}{2\mu_0 s_p}$ – амплитуда силы тяги. Величина $F(t)$ периодически изменяется во времени, достигая нулевых значений (рис. 3.17 б) с удвоенной частотой (100 Гц при напряжении промышленной частоты $f=50$ Гц).

Возвратная пружина ПУ создает силу $F_{ВП}$, которая отрывает якорь от полюса магнитопровода, когда $F(t) < F_{ВП}$ вблизи моментов времени перехода магнитного потока $\Phi(t)$ через нулевые значения. Под действием знакопеременной силы $\Delta F(t) = F(t) - F_{ВП}$ якорь вибрирует с частотой $2f$.

3.6.3. Устранение вибрации якоря с помощью короткозамкнутого витка

В электромагнитных аппаратах переменного тока вибрацию якоря устраняют при помощи короткозамкнутого витка 2, показанного на рис. 3.17в. Его изготавливают из меди или латуни (проводника тока) и устанавливают на полюс магнитопровода 1 таким образом, чтобы виток охватывал 70...80% площади полюса. Тогда переменный магнитный поток $\Phi(t)$ разветвляется на поток $\Phi_1(t)$, проходящий по незкранированной части полюса, и поток $\Phi_2(t)$, проходящий через часть полюса, охваченную короткозамкнутым витком (рис. 3.17г). Поток $\Phi_1(t)$ и $\Phi_2(t)$ сдвинуты по фазе на угол φ . В реальных системах угол φ составляет 50°...80°. Каждый из потоков $\Phi_1(t)$, $\Phi_2(t)$ создает электромагнитную силу тяги, действующую на якорь. Суммарная сила $F(t)$ (рис. 3.17г) пульсирует, не достигая нулевых значений. Конструкция электромагнитной системы создается такой, чтобы в любой момент времени t выполнялось условие $F(t) > F_{ВП}$. Тем самым устраняется вибрация якоря при помощи короткозамкнутого витка. Максимальный эффект достигается при равенстве амплитуд потоков $\Phi_1(t)$ и $\Phi_2(t)$.

3.6.4. Тяговая характеристика привода

Обозначим через F_{cp} среднее значение электромагнитной силы тяги $F(t)$ ЭММ с короткозамкнутым витком (см. рис. 3.17 *з*). При отсутствии магнитного потока рассеяния (см. п. 3.3.2) сила тяги F_{cp} не зависит от величины воздушного зазора η между полюсом магнитопровода и якорем ЭММ. По этой причине идеальная тяговая характеристика электромагнитного привода переменного тока имеет вид горизонтальной прямой (рис. 3.18).

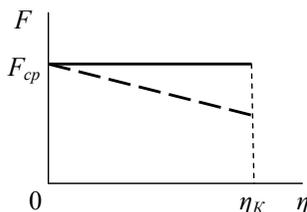


Рис. 3.18. Статическая тяговая характеристика электромагнитного привода постоянного тока

Реальная тяговая характеристика электромагнитного привода аппарата (пунктирная линия на рис. 3.18) располагается ниже идеальной характеристики. Объясняется это тем, что с увеличением зазора η возрастает магнитный поток рассеяния и уменьшается рабочий магнитный поток. Реальный коэффициент рассеяния (см. п. 3.3.2) $\sigma > 1$.

Для того, чтобы электрический аппарат с электромагнитным приводом переменного тока мог исправно работать (осуществлять коммутацию электрической цепи) необходимо, чтобы реальная тяговая характеристика привода, с учетом флюктуаций силы тяги $F(t)$ относительно среднего значения F_{cp} , располагалась выше механической характеристики аппарата (см. рис. 3.6).

3.6.5. Характеристика управления привода

Характеристика управления электромагнитного привода определяется функциональной зависимостью выходной переменной ρ или α (соответственно для прямоходового или поворотного передаточного устройства ПУ) от входно-

7.5. Выключатели дифференциального тока

7.5.1. Назначение и принцип действия выключателя дифференциального тока

Выключатель дифференциального тока (ВДТ) контролирует – ток утечки на землю (дифференциальный ток). Когда ток утечки достигает определенного значения, ВДТ отключает участок электрической цепи, на котором возник ток утечки. За выключателями дифференциального тока закрепилось название *устройство защитного отключения (УЗО)*.

УЗО применяют:

- для защиты человека от поражения электрическим током при случайном прикосновении к токоведущим частям, а также к токопроводящим частям электрооборудования, оказавшимся под напряжением вследствие повреждения изоляции токоведущих частей;
- для повышения пожарной безопасности электроустановок путем непрерывного контроля токов утечки;
- для защиты сетей переменного тока 220 В 50 Гц от коротких замыканий и перегрузок;
- для оперативных включений и отключений электрических цепей.

Если ВДТ снабжен защитой от сверхтоков (добавлен автоматический выключатель с комбинированным расцепителем), то такое УЗО называют *автоматическим выключателем дифференциального тока (АВДТ)*.

Принцип действия ВДТ (рис. 5.9) основан на сравнении втекающих и вытекающих токов приемника электроэнергии (ПЭЭ), которые при отсутствии токов утечки на землю должны быть равны. Это равенство должно соблюдаться как для однофазных, так и для трехфазных приемников (в том числе при несимметричной нагрузке).

Сравнение токов в ВДТ осуществляет дифференциальный трансформатор тока (ТА). Сердечник трансформатора охватывает линии L1, L2, L3 трехфазной сети и нулевой провод (нейтраль) N. К вторичной обмотке трансформатора под-

Предельный ток отключения автомата должен быть не менее возможного тока короткого замыкания в цепи.

7.4.5. Мотор-автоматы

Устройства защиты двигателя мотор-автоматы (серии MS, GV, отечественных аналогов пока нет) с комбинированным расцепителем специально разработаны для применения в цепях защиты электродвигателей. Они имеют некоторые особенности:

- выпускаются только в трехполюсном исполнении;
- рассчитаны на номинальные токи от 16 до 100 А;
- номинальный ток двигателя устанавливается на автомате (серии GV) с помощью регулировочного диска;
- имеют точную подстройку теплового расцепителя;
- уставка электромагнитного расцепителя составляет, как правило, $(12 \dots 14)I_{Hаа}$, что соответствует работе автомата на индуктивную нагрузку (режим пуска АС-3);
- выключатели имеют высокую электродинамическую стойкость – до 100 кА;
- выключатели имеют на корпусе рычаг или кнопки ручного включения и отключения нагрузки;
- конструкция корпуса позволяет объединить в единый компактный блок автомат и согласованный с ним по габаритам пускатель;
- выключатели имеют либо встроенные, либо навесные быстромонтируемые дополнительные контакты, срабатывающие при перегрузках и коротких замыканиях;
- глубина защиты электродвигателя может быть повышена за счет отдельно поставляемых быстромонтируемых элементов – независимого расцепителя и реле минимального напряжения.

го управляющего воздействия. Для привода переменного тока, подключенного к электрической цепи переменного тока с источником напряжения U ток I , протекающий по виткам обмотки катушки ЭММ в статическом режиме, когда якорь ЭММ неподвижен, зависит от положения якоря (в отличие от ЭММ постоянного тока). Поэтому характеристику управления представим в виде функции ρ от U (рис. 3.19).

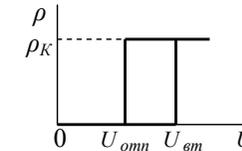


Рис. 3.19. Характеристика управления электромагнитного привода переменного тока

Выходная переменная привода – координата ρ определяет положение толкателя ПУ. При возрастании приложенного к обмотке катушки ЭММ напряжения U от нулевого значения якорь притянется к сердечнику ЭММ и толкатель ПУ переместится из положения $\rho=0$ в положение $\rho=\rho_K$, когда U достигнет значения напряжения втягивания U_{em} . При дальнейшем увеличении U сохранится $\rho=\rho_K$. Если U уменьшается, то возвратная пружина оттянет якорь от сердечника, когда U достигнет значения напряжения отпускания U_{omn} . Толкатель переместится из положения $\rho=\rho_K$ в положение $\rho=0$. Аналогичным образом изменяется угловая координата α поворотного ПУ, если вместо прямоходового ПУ в составе привода использовано поворотное ПУ (тогда на графике нужно заменить ρ на α).

В ЭММ переменного тока с короткозамкнутым витком возможно появление вибрации якоря ЭММ, когда величина напряжения U приближается слева (при увеличении) к напряжению втягивания ($U \rightarrow U_{em}$). Возможна вибрация якоря также, когда величина напряжения U приближается справа к напряжению отпускания ($U_{omn} \leftarrow U$). Возникновение вибрации якоря в этих случаях объясня-

ется тем, что при изменении амплитуды U_m входного напряжения U (соответственно и действующего значения U) изменяется среднее значение F_{cp} электромагнитной силы тяги $F(t)$ (см. рис. 3.17 з) и ее амплитуда F_m . С увеличением U_m величина F_{cp} и величина F_m также увеличиваются. При этом график $F(t)$ на рис. 3.17 з поднимается. Вибрация якоря будет иметь место тогда, когда при $U \rightarrow U_{omn}$ на якорь станет действовать знакопеременная сила $\Delta F(t) = F(t) - F_{BП}$ из-за реакции $F_{BП}$ возвратной пружины, т. е. когда линия графика $F(t)$ будет периодически пересекать горизонтальную пунктирную линию $F_{cp} = \text{const}$. Аналогично объясняется появление вибрации якоря ЭММ при $U_{omn} \leftarrow U$.

3.6.6. Коэффициент возврата

Из сравнения тяговых характеристик электромагнитного привода переменного тока (рис. 3.18) и электромагнитного привода постоянного тока (см. п. 3.4.3, рис. 3.9) следует, что у привода переменного тока коэффициент возврата $k_B = U_{omn} / U_{om}$ больше по величине, чем у привода постоянного тока. Например, если для контактора с приводом переменного тока $k_B = 0,6$, то для контактора с приводом постоянного тока коэффициент возврата примерно в два раза меньше.

3.6.7. Магнитные системы электромагнитных приводов переменного тока

На рис. 3.20 показаны изобразительные модели некоторых типичных магнитных систем приводов переменного тока: с прямоходовым якорем на рис. 3.20а, б, в; и с поворотным якорем на рис. 3.20 г.

Магнитные системы различаются по конструкции неподвижного магнитопровода 1 и якоря 2. Могут содержать от одного до трех рабочих воздушных зазоров и до трех катушек 3, обмотки которых подключаются последовательно или параллельно к однофазной электрической цепи управления или подключаются к трехфазной цепи (три катушки).

АЕ1000, АЕ2000 – для защиты цепей и электроприемников от перегрузки и коротких замыканий. Напряжения: переменные 380, 660 В, постоянные 110, 220 В. Отключаемые токи от 1 до 40 кА.

«Электрон» – для установки в распределительных устройствах на постоянное напряжение до 440 В и переменное до 660 В. Отключаемый ток от 50 до 160 кА.

Автоматические воздушные выключатели серии АП-50 применяют на напряжение до 500 В переменного тока и до 220 В постоянного тока. Ручной привод имеет две кнопки – одну на включение, другую на отключение автомата. Выключатель имеет электромагнитный расцепитель и электротепловой расцепитель. Номинальный ток расцепителей до 50 А. Уставку электротеплового расцепителя можно регулировать на 30...40 % в сторону уменьшения относительно номинального тока.

7.4.4. Особенности выбора автоматического выключателя

Автоматы выбирают по числу полюсов, по номинальным значениям тока и напряжения. Номинальные значения напряжения $U_{Нав}$ и тока $I_{Нав}$ автомата по отношению к номинальному значению напряжения сети $U_{Нсети}$ и номинальному току нагрузки (двигателя) $I_{Ндв}$ должны удовлетворять следующим условиям:

$$U_{Нав} \geq U_{Нсети}, I_{Нав} \geq I_{Ндв}.$$

Уставки I_{PT} , $I_{PЭМ}$ токов для защиты двигателя электропривода обычно определяют следующим образом:

– для электротеплового расцепителя (защита от перегрузки) – по номинальному току двигателя $I_{Ндв}$,

$$I_{PT} \geq (1,2 \dots 1,4) I_{Ндв};$$

– для электромагнитного расцепителя (защита от короткого замыкания) – по наибольшему значению тока какого-либо переходного процесса $I_{пер}$ (пуск, реверс, торможение),

$$I_{PЭМ} \geq (1,5 \dots 2,0) I_{пер}.$$

установочного автомата с комбинированным расцепителем изображен на рис. 7.8б.

Участок $a-b$ времятоковой характеристики создается электротепловым расцепителем, выполняющим функцию защиты по току перегрузки при $I > I_{PT}$, где I_{PT} – уставка тока срабатывания электротеплового расцепителя (при $t_{cp} \gg T_p$ – см. п. 7.3). Участок $c-d$ обусловлен действием электромагнитного расцепителя максимального тока. Время срабатывания τ_{cp} автоматического выключателя от электромагнитного расцепителя практически не зависит от силы тока I , если сила тока превышает уставку $I_{PЭМ}$ электромагнитного расцепителя.

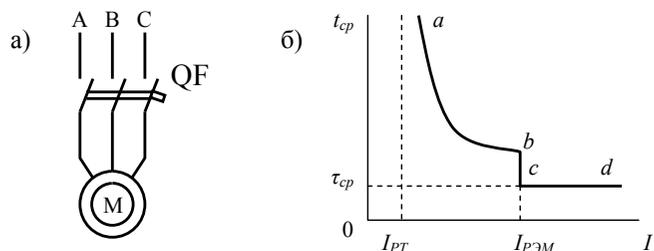


Рис. 7.8. Подключение установочного автомата к трехфазной сети (а) и времятоковая характеристика автомата с комбинированным электромагнитным и электротепловым расцепителем (б)

В зависимости от быстродействия выделяют: 1) нормальные автоматы, собственное время срабатывания которых составляет 0,02...0,1 с; 2) селективные автоматы, обеспечивающие выдержку на отключение до 1 с; 3) быстродействующие автоматы, время срабатывания которых составляет тысячные доли секунды.

Автоматы выпускаются на переменные напряжения от 220 до 660 В и постоянные напряжения от 110 до 440 В. Наибольшее применение получили автоматы следующих серий:

A3000 – наиболее распространенная серия. Рассчитаны на переменные напряжения 380, 660 В, постоянные напряжения до 440 В. Отключаемые токи (коммутационная способность) до 60 кА.

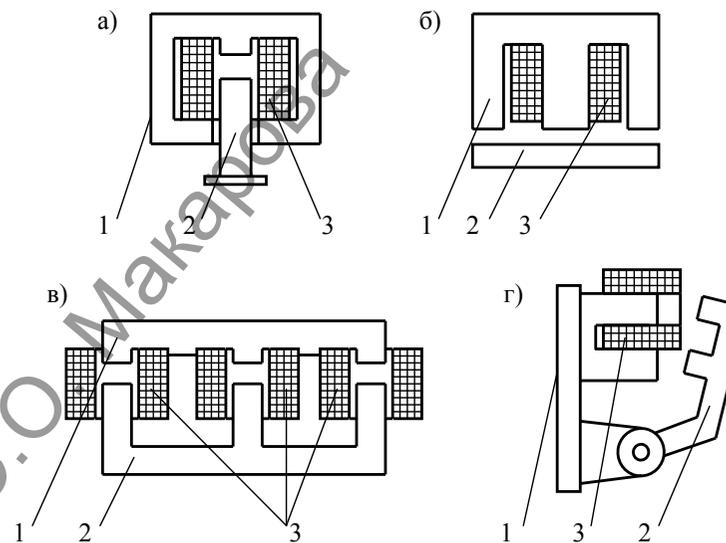


Рис. 3.20. Изобразительные модели магнитных систем электромагнитных приводов переменного тока

Статические тяговые характеристики приводов с магнитными системами переменного тока не отличаются по виду от тяговой характеристики, показанной на рис. 3.18. Это обусловлено особенностью электромагнитного механизма переменного тока, для которого электромагнитная сила тяги не зависит от величины зазора между якорем и полюсом сердечника (неподвижного магнитопровода) при отсутствии магнитных потоков рассеяния (см. п. 3.6.4).

3.7. Ускорение и замедление срабатывания электромагнитного привода

Время включения $t_{вкл}$ и время отключения $t_{отк}$ электромагнитного привода (см. п. 3.4.2), иначе говоря, *время срабатывания* или *быстродействие* зависит от времени трогания ($t_{мп}, t'_{мп}$) и времени движения ($t_{ов}, t'_{ов}$) элементов электромагнитного механизма (ЭММ) и передаточного устройства (ПУ) привода.

Основное влияние на время трогания якоря ЭММ оказывает величина электромагнитной силы тяги F , величина силы $F_{ВЛ}$, создаваемой возвратной

пружиной, и величина электромагнитной постоянной времени $T=L/R$ (L – индуктивность катушки ЭММ, R – сопротивление обмотки катушки). Повышение F и снижение $F_{вп}$, T приводят к увеличению быстродействия привода.

На время движения якоря оказывают влияние величина хода якоря (η_2) (см. рис. 3.6), масса подвижных частей привода, взаимное расположение механической и тяговой характеристик (см. п. 3.3.4, п. 3.4.3, п. 3.6.4). Уменьшение хода якоря, массы подвижных частей и противодействующих перемещению якоря сил приводит к уменьшению времени движения.

3.7.1. Повышение быстродействия привода

Повышение быстродействия электромагнитного привода достигают за счет оптимизации конструкции привода и благодаря применению специальных схем подключения обмотки катушки ЭММ к электрической цепи управления (ЭЦУ).

В отношении конструкции быстродействующего привода недопустимо, чтобы в нем были короткозамкнутые обмотки и витки, металлические каркасы катушек и другие детали, в которых смогут протекать вихревые токи, наводимые рабочим магнитным потоком и потоками рассеяния. Магнитопроводы ЭММ быстродействующих приводов выполняют шихтованными (в том числе и приводов постоянного тока), чтобы уменьшить вихревые токи. Параметры привода выбирают такими, чтобы при установившемся токе в обмотке катушки сила тяги F , действующая на якорь ЭММ, в несколько раз превосходила противодействующую силу, когда зазор между якорем и полюсом магнитопровода имеет максимальную величину (основное противодействие оказывает возвратная пружина ПУ).

Специальные схемы подключения обмотки катушки к электрической цепи управления применяются для ускоренного возрастания тока в обмотке катушки ЭММ при включении привода и ускоренного снижения тока при отключении привода (см. п. 3.4.2). Снижение постоянной времени T переходных процессов, протекающих при включении и при отключении привода, достигается

РЗ – независимый расцепитель, на который подается сигнал $U_{инэ}$, несущий информацию, например, об изменении направления передачи энергии в цепи ЭЦП;

РТ – расцепитель тока перегрузки (тепловой расцепитель, реагирующий на ток перегрузки).

Узел УР *установочного автомата* с комбинированным расцепителем состоит из расцепителей Р2 и РТ. *Универсальный автомат* имеет расцепители Р1, Р2. В зависимости от назначения и по составу узла расцепителей выделяют также максимальные автоматы по току, минимальные автоматы по току, максимальные автоматы, реагирующие на производную тока по времени, и др. [10]. Для построения селективно действующей защиты в АВ предусматривают возможность регулировки тока и времени срабатывания.

Каждый из расцепителей независимо воздействует на механизм свободного расцепления (МСР), снимая упор с защелки механической передачи (см. п. 3.2.3). Это приводит к размыканию коммутирующих контактов КК. Поэтому отключение поврежденного участка электрической цепи ЭЦК и приемника ПЭЭ произойдет тогда, когда хотя бы один из контролируемых параметров цепи ЭЦК выйдет за пределы области допустимых значений, определенной соответствующими уставками расцепителей. Включение автомата для замыкания электрической цепи ЭЦК и отключение автомата для размыкания цепи производится человеком воздействиями $x_{вкл}$ и $x_{отк}$ на рычажный или кнопочный орган ручного управления (ОРУ) автомата (рис. 7.7).

7.4.3. Времятоковая характеристика установочного автомата

На рис. 7.8а приведена электрическая схема, иллюстрирующая подключение установочного автомата к трехфазной сети и его условное обозначение на схеме. Действие автомата (QF) при автоматическом отключении двигателя (М) комбинированным расцепителем максимального тока и тока перегрузки представляют с помощью времятоковой характеристики, которую приводят в паспорте автомата. Типовой вид времятоковой (защитной) характеристики

Автоматический воздушный выключатель (АВВ) воздействует на контролируемую им электрическую цепь (ЭЦК) коммутирующим контактом (КК), изменяя сопротивление (R_K) цепи. При разомкнутом КК приемник электрической энергии (ПЭЭ) отключен от питания со стороны источника электрической энергии (ИЭЭ). Количество коммутирующих (главных) контактов может быть от одного до трех. В контактной системе предусматривают устройства гашения электрической дуги, обычно, дугогасительные решетки (см. п. 2.5.6). В некоторых автоматах устанавливают дополнительные дугогасительные контакты, и могут быть предусмотрены вспомогательные контакты для коммутации слаботоковых цепей сигнализации и управления.

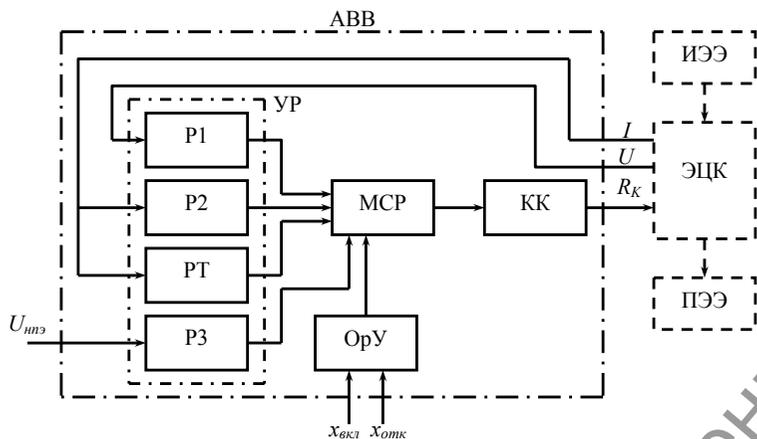


Рис. 7.7. Структурная схема автоматического воздушного выключателя с несколькими видами защит

В зависимости от типа автомата его узел распределителей (УР) состоит из определенной комбинации распределителей из следующего состава:

P1 – распределитель минимального напряжения U (минимальный распределитель, реагирующий на снижение напряжения);

P2 – распределитель максимального тока I (максимальный распределитель, реагирующий на ток короткого замыкания);

за счет подключения обмотки $\{R, L\}$ ЭММ к цепи ЭЦУ через добавочный резистор $R_{доб}$ (рис. 3.21 а).

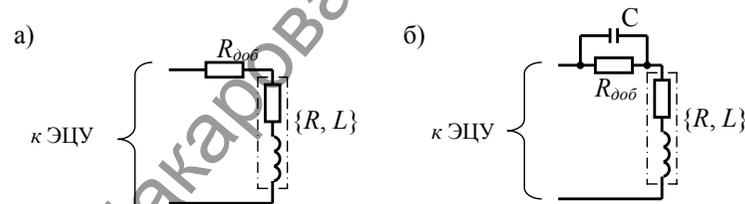


Рис. 3.21. Специальные схемы подключения обмотки катушки электромагнитного механизма к электрической цепи управления для повышения быстродействия привода

При последовательном соединении добавочного резистора $R_{доб}$ с обмоткой катушки ЭММ, которая обладает активным сопротивлением R и индуктивностью L , электромагнитная постоянная времени T привода уменьшится до величины $T=L/(R+R_{доб})$ по сравнению с $T=L/R$. Поэтому уменьшится время трогания на включение (t_{mp}) и время трогания на отключение (t'_{mp}). Обмотка катушки ЭММ должна быть рассчитана на напряжение

$$U_{ЭММ} = \frac{R}{R + R_{доб}} U,$$

которое составляет часть величины напряжения U электрической цепи ЭЦУ.

Еще большее быстродействие привода достигается, если параллельно с добавочным резистором $R_{доб}$ подключен конденсатор C (рис 3.18 б). В момент включения привода конденсатор C создает малое сопротивление, как бы шунтируя резистор $R_{доб}$. Напряжение U почти полностью оказывается приложенным к обмотке катушки ЭММ, рассчитанной только на часть напряжения U . Ток в обмотке будет интенсивно увеличиваться, и включение привода ускорится.

Недостаток использования рассмотренных схем подключения обмотки ЭММ к ЭЦУ проявляется в том, что на добавочном резисторе $R_{доб}$ бесполезно теряется часть электрической энергии, передаваемой включенному приво-ду по ЭЦУ.

3.7.2. Замедление действия привода

Замедление действия электромагнитного привода в аппаратах достигается, как правило, тремя способами: применением специальных схем подключения обмотки ЭММ к ЭЦУ, применением короткозамкнутой обмотки или короткозамкнутого витка в составе ЭММ или применением механического, пневматического или иного *замедлителя* в составе передаточного устройства ПУ.

Применение специальных схем на входе привода.

На рис. 3.22 приведены схемы, применяемые для замедления отпускания якоря ЭММ постоянного тока.

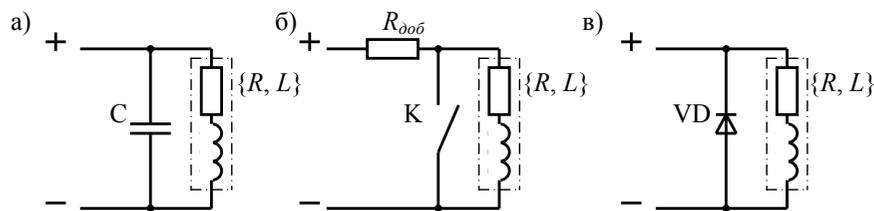


Рис. 3.22. Специальные схемы подключения обмотки катушки электромагнитного механизма постоянного тока к электрической цепи управления для замедления отключения привода

В схеме, приведенной на рис. 3.22 а, конденсатор С создает путь для тока в переходном режиме после отключения обмотки ЭММ от ЭЦУ. Тем самым затягивается во времени снижение магнитного потока в магнитной цепи ЭММ и увеличивается время трогания на отключение ($t'_{тр}$).

В схеме, приведенной на рис. 3.22 б, контакт К замыкается при отключении обмотки ЭММ от ЭЦУ. С помощью замкнутого контакта К создается контур для протекания тока, индуцируемого обмоткой ЭММ. Благодаря протеканию тока по контуру $\{R, L\}$ -К, снижается интенсивность изменения тока и увеличивается время трогания на отключение. Применение $R_{об}$ обязательно, чтобы избежать короткого замыкания.

В схеме на рис. 3.22 в применен вентильный элемент – полупроводниковый диод, проводящий через себя ток только в одном направлении. При отключении обмотки ЭММ от ЭЦУ диод VD проводит индуцированный обмоткой

потому, что гашение электрической дуги на коммутирующем контакте происходит в воздушной среде. Узел защиты с автоматическим выключателем (АВ) рассмотрен в п. 7.1, рис. 7.1а.

В зависимости от типа АВ может выполнять одну или несколько функций защиты. Например, *установочный* автомат в большинстве исполнений защищает электрическую цепь от короткого замыкания и от перегрузки. Для этого в нем предусмотрены воспринимающие элементы – *расцепители*, аналогичные по принципу действия воспринимающим элементам электромагнитного реле максимального тока и электротеплового реле. Автомат, защищающий электрическую цепь от чрезмерного снижения напряжения, имеет расцепитель, подобный воспринимающему элементу электромагнитного реле минимального напряжения.

Максимальный расцепитель (реагирующий на ток короткого замыкания) и минимальный расцепитель (реагирующий на снижение напряжения) по существу представляет собой электромагнитный механизм (см. п. 3.3.2) с якорем, втягиваемым в катушку под действием электромагнитной силы тяги (см. п. 3.3.4). Якорь воздействует на защелку механической передачи (см. п. 3.2.3), которую называют *механизмом свободного расцепления*. Для этого механизма предусматривают также ручной привод, чтобы человек мог осуществлять включение и выключение автомата.

В автоматических выключателях, выполняющих функцию защиты от изменения направления передачи энергии (от «обратного тока», от «обратной мощности») есть *независимый расцепитель*, выполненный как электромагнитный механизм. В некоторых автоматах используются расцепители, работающие по принципу электродинамического преобразователя (см. п. 3.9.2.), а также полупроводниковые расцепители.

7.4.2. Обобщенная структурная схема автоматического выключателя

Автоматический воздушный выключатель с несколькими видами защит представлен структурной схемой на рис. 7.7.

(В схеме на рис. 7.6 кроме защиты от перегрузки реализована нулевая защита на контакторе КМ).

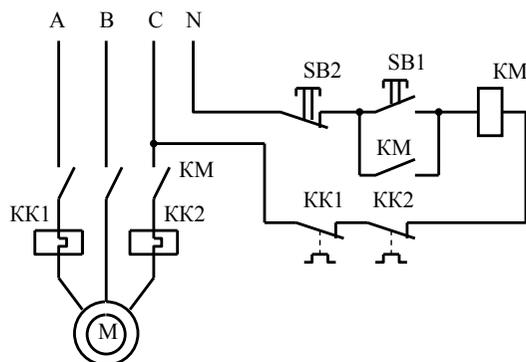


Рис. 7.6. Фрагмент электрической схемы защиты двигателя тепловыми реле от перегрузки

Электротепловые реле типа ТРТ обеспечивают защиту асинхронного двигателя в следующих условиях: при длительной (свыше 20 мин) перегрузке двигателя током свыше $1,35I_{Hреле}$; при затяжном пуске; при обрыве одной фазы. Регулятор реле позволяет изменять уставку тока в пределах $\pm 0,15I_{Hреле}$. Контакты реле коммутируют переменный ток до 10 А (при $U=380$ В, $\cos\varphi=0,4$) или постоянный ток 0,5 А (в индуктивной цепи с постоянной времени 0,05 с и $U=220$ В). Электрическая износоустойчивость 10^4 срабатываний.

7.4. Автоматические воздушные выключатели

7.4.1. Назначение и состав автоматического выключателя

Автоматические воздушные выключатели (автоматы) служат для автоматического отключения электрической цепи при возникновении в ней перегрузки, короткого замыкания, снижении напряжения ниже установленного значения, изменении направления передачи энергии. Они применяются также в качестве коммутирующих аппаратов ручного управления для нечастых включений и отключений потребителей электрической энергии, например, электродвигателей небольшой мощности. «Воздушными» автоматические выключатели называют

ЭММ ток, исполняя роль контакта К. Процессы отключения привода протекают также, как в схеме на рис. 3.22 б. Короткое замыкание ЭЦУ не возникает при включении привода, поскольку диод VD не проводит через себя ток в этом случае (при указанной на схеме полярности приложенного напряжения).

3.7.3. Применение замедлителя в составе электромагнитного механизма

В электромагнитных реле времени постоянного тока (см. п. 6.4.3) в составе ЭММ применяют специальное устройство – *замедлитель* для создания выдержки времени между отключением аппарата и перемещением подвижного контактного узла (ПКУ) аппарата при коммутации им электрической цепи. В качестве замедлителя используют короткозамкнутую обмотку (концы обмотки соединены накоротко) или короткозамкнутый виток.

Короткозамкнутую обмотку обычно предусматривают на одной катушке с обмоткой управления ЭММ, подключаемой к ЭЦУ (витки обеих обмоток охватывают сердечник ЭММ). Короткозамкнутая обмотка образует контур для протекания тока, индуцированного в переходном процессе включения или отключения привода. Ток возникает в короткозамкнутой обмотке из-за появления электродвижущей силы (ЭДС) индукции в витках обмотки. Короткозамкнутая обмотка с током создает магнитный поток, препятствующий изменению основного магнитного потока в магнитной цепи ЭММ. Изменение магнитного потока замедляется во времени, что приводит к увеличению времени трогания t_{mp} на включение и времени трогания t'_{mp} на отключение (см. п. 3.4.2). Наибольшую индуктивность катушка ЭММ имеет при замкнутом якоре ($\eta=0$), когда привод включен. Поэтому максимальное увеличение времени трогания достигается при отключении привода, что используется в электромагнитном реле времени.

На рис. 3.23 показаны графики, характеризующие изменение во времени t магнитного потока Φ при отключении электромагнитного привода.

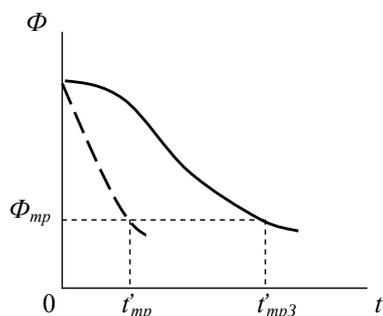


Рис. 3.23. Графики изменения магнитных потоков во времени

Сплошная линия показывает изменение во времени магнитного потока в ЭММ с короткозамкнутой обмоткой, пунктирная линия – в ЭММ без короткозамкнутой обмотки. При величине магнитного потока $\Phi = \Phi_{mp}$ якорь отпадает от сердечника, поскольку электромагнитная сила тяги F становится меньше по величине, чем сила $F_{ВП}$, создаваемая возвратной пружиной передаточного устройства. Разность

$$t_{BO} = t'_{mp3} - t'_{mp} \quad (3.12)$$

называют *выдержкой времени на отключение*.

Аналогичное влияние на время трогания оказывает короткозамкнутый виток, полностью охватывающий магнитопровод ЭММ. Для увеличения эффективности действия виток выполняют в виде сплошной медной гильзы, насаживаемой на магнитопровод ЭММ. Такой короткозамкнутый виток называют *демпферной гильзой*.

3.7.4. Применение замедлителя в составе передаточного устройства.

Механический замедлитель применяется в электромеханических реле времени для создания выдержки времени при включении обмотки ЭММ реле под напряжение (см. п. 6.4.2). Выдержка времени определяется продолжительностью движения подвижного контактного узла (ПКУ) до момента замыкания (или размыкания) коммутирующего контакта аппарата. В составе передаточно-

графиках рис. 7.5 по оси ординат отложено примерное время срабатывания реле в секундах.

Характеристика нагрева двигателя показана на рис. 7.5б. Она представляет собой зависимость допустимого времени $t_{об}$ нахождения двигателя под током перегрузки (когда температура двигателя достигает заданного предельного значения) от отношения $I/I_{ноб}$, где $I_{ноб}$ — номинальный ток двигателя. Времятоковые характеристики t_{cp1} и t_{cp2} соответствуют разным тепловым реле. У одного реле (характеристика t_{cp1}) ток срабатывания $I_{с}$ равен номинальному току двигателя $I_{ноб}$, у другого (характеристика t_{cp2}) на 20 % больше. Защитная характеристика реле и характеристика нагрева двигателя согласованы лучше при использовании второго реле.

При защите электродвигателей от перегрузки времятоковая характеристика реле должна удовлетворять следующим условиям:

- отключение двигателя должно происходить при перегреве, не превышающем допустимого значения;
- время срабатывания реле должно быть таким, чтобы можно было полнее использовать перегрузочную способность двигателя и осуществлять (при необходимости) прямой пуск двигателя от сети.

Характеристика правильно выбранного реле должна располагаться ниже и вблизи характеристики нагрева двигателя. В эксплуатационных условиях согласование характеристик реле и двигателя достигается выбором реле с номинальным током $I_{Нреле} = 1,2I_{с}$, равным номинальному току $I_{ноб}$ двигателя. В этом случае, как правило, обеспечивается срабатывание реле в течение 5...20 минут при силе тока, превышающей номинальный ток ($I_{Нреле}$) на 35...40% [10].

7.3.3. Пример применения электротеплового реле

На рис. 7.6 приведена электрическая схема, иллюстрирующая применение тепловых реле КК1 и КК2 для защиты асинхронного двигателя М от перегрузки.

за относительно малой массы обмотки. При длительной перегрузке в нагреве участвует вся масса двигателя. Постоянная времени нагрева для мощных двигателей – 40...60 мин. Для совершенной защиты необходимо, чтобы, постоянная времени нагрева T_P реле была такой же, как и у защищаемого двигателя. На практике тепловые реле не разрабатываются для каждого типа двигателя. Поэтому одно и то же реле используется для защиты двигателей разной конструкции, и постоянные времени нагрева реле и двигателя могут существенно различаться.

Обозначим через I_∞ ток, при котором тепловое реле срабатывает за время $t_{cp} \gg T_P$, через $I_{нач}$ – установившийся ток до начала перегрузки, под влиянием которого биметаллическая пластина воспринимающего элемента реле нагрелась до температуры $\theta_{нач}$, превышающей температуру окружающей среды. Тогда зависимость времени срабатывания t_{cp} реле от тока перегрузки $I > I_\infty$ можно представить в виде [10]:

$$t_{cp} = T_P \ln \frac{I^2 - I_{нач}^2}{I^2 - I_\infty^2}.$$

На рис. 7.4а представлены зависимости времени срабатывания t_{cp} при $0 < I_{нач} < I_\infty$ и t'_{cp} при $I_{нач}=0$ от относительного значения тока перегрузки I/I_∞ .

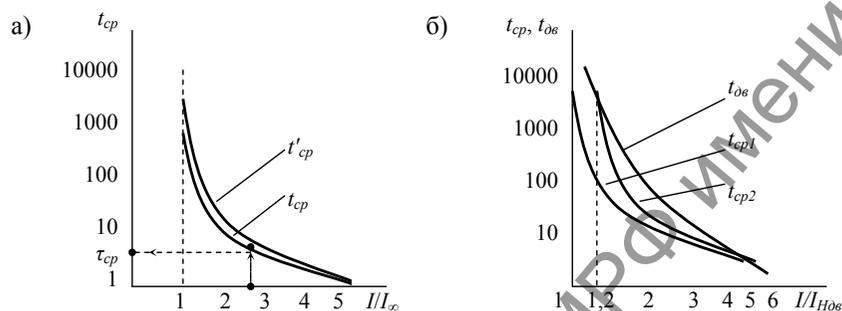


Рис. 7.5. Времятоковые характеристики электротепловых реле

Времятоковая характеристика теплового реле позволяет определить время срабатывания реле (τ_{cp}) при определенном значении тока перегрузки. На

го устройства ПУ электромагнитного привода аппарата предусматривается *анкерный* (часовой) механизм, приводимый в действие при включении привода. Благодаря анкерному механизму, выходная ось ПУ поворачивается с периодическими остановками (как ось секундной стрелки механических часов), передавая прерывистое движение ПКУ (см. рис. 2.3).

Выдержка времени, создаваемая анкерным механизмом, может составлять 10 и более секунд. Создание выдержки времени при отключении обмотки ЭММ от напряжения обычно не предусматривается в конструкции ПУ привода.

Механический замедлитель применяют с ЭММ постоянного и переменного тока.

Пневматический замедлитель применяется в электропневматических реле времени для создания выдержки времени при включении реле. Выдержка времени определяется продолжительность движения толкателя ПУ до момента замыкания (или размыкания) коммутирующего контакта аппарата. Пневматический замедлитель электромагнитного привода аппарата представляет собой камеру, разделенную эластичной мембраной, к которой прикреплен толкатель ПУ. Кроме возвратной пружины, противодействующей замыканию якоря ЭММ, в ПУ предусмотрена дополнительная пружина с меньшим усилием, способствующая движению толкателя при замыкании якоря. При подаче напряжения на обмотку катушки ЭММ привода якорь замыкается без выдержки времени, освобождая толкатель для свободного перемещения под действием дополнительной пружины. Мембрана препятствует быстрому перемещению толкателя из-за разности давлений воздуха в полостях камеры, отделенных друг от друга мембранной. Выдержка времени при перемещении толкателя до конечного положения может достигать 180 с. Создание выдержки времени при отключении обмотки ЭММ от напряжения обычно не предусматривается в конструкции ПУ привода.

3.8. Магнитоуправляемые контакты – герконы

3.8.1. Геркон

Магнитоуправляемый контакт в единой конструкции совмещает магнитопровод электромагнитного механизма (ЭММ), механическую передачу (МП) и коммутирующий контакт (КК), выполненный в виде плоских пружинящих пластин из сплава пермаллой с высокой магнитной проницаемостью. Пластины помещают в стеклянный баллон, который заполняют инертным газом и герметизируют. Если такой герметизированный контакт (*геркон*) поместить внутри катушки (рис. 3.24а) и по обмотке катушки пропустить ток I_y , то возникший магнитный поток, проходя по пластинам контакта и зазору между концами пластин, вызовет появление электромагнитной силы и смыкание контактных пластин. После того, как обмотка будет обесточена ($I_y=0$), контакт разомкнется, благодаря упругости контактных пластин.

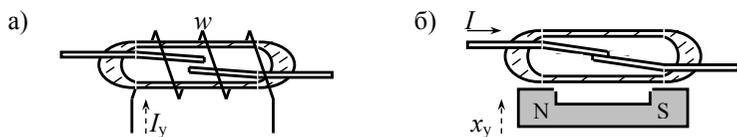


Рис. 3.24. Изобретительные модели магнитоуправляемых контактов

Аналогичным образом реагирует геркон на магнитное поле, созданное постоянным магнитом N-S (рис. 3.24 б). Приближение (x_y) магнита к геркону приводит к замыканию контакта, удаление – к размыканию. Такой способ управления герконом используется в слаботочных аппаратах управления (тумблеры, переключатели, кнопки и др. командоаппараты) и контрольно-измерительной аппаратуре (сигнализаторы положения, конечные выключатели, датчики).

Применяются такие типы герконов: КЭМ-1, КЭМ-2, КЭМ-3, КЭМ-6, МК-10-3, МК-16-3, МУК-1А-1, МК-27-3, КЭН-4 и др. Основные данные по некоторым промышленным типам герконов приведены в табл. 3.1.

значенных для работы в цепях переменного тока. В системах с бесконтактной коммутацией электрических цепей узлы защит выполняют по схеме рис. 7.1в.

7.3. Электротепловые реле защиты

7.3.1. Назначение и состав электротеплового реле

Электротепловые реле, называемые также *тепловыми реле*, используют для защиты электродвигателей от перегрузки при токах в двигателе, превышающих от 1,2 до 5 раз номинальный ток двигателя. Узел защиты выполняют по схеме рис. 7.1б.

Воспринимающим элементом теплового реле служит биметаллический электротепловой преобразователь (см. п. 3.9.3). В реле применяется механическая передача с защелкой (см. п. 3.2.3). Предусматривается ручное включение реле с помощью механического привода и автоматическое отключение реле воздействием биметаллической пластины на защелку.

Нагрев биметаллического элемента может происходить за счет тепла, выделяемого током нагрузки в самой пластине или в специальном нагревателе. Лучшие времятоковые характеристики реле получаются при комбинированном нагреве, когда биметаллическая пластина нагревается и за счет проходящего через нее тока, и за счет тепла, выделяемого специальным нагревателем, обогреваемым тем же током нагрузки.

7.3.2. Особенности выбора электротеплового реле для защиты электродвигателя

При выборе теплового реле необходимо согласовать его времятоковую характеристику с характеристикой нагрева защищаемого объекта (электродвигателя). Чем больше ток перегрузки I относительно номинального тока $I_{НДв}$ двигателя, тем быстрее двигатель нагревается, что может привести к его перегреву и выходу из строя. Постоянная времени нагрева электродвигателя зависит от длительности перегрузки. При кратковременных перегрузках в нагреве участвует только обмотка двигателя и постоянная времени невелика (5...10 мин) из-

напряжения использовать реле максимального напряжения, то замыкающий контакт KV реле нужно заменить размыкающим контактом.

Реле напряжение выбирают из условия, чтобы номинальное напряжение реле совпадало с номинальным напряжением сети. При выборе реле следует проверить коммутационную способность контактов реле, учитывая параметры коммутируемых цепей (ЭЦ1).

На базе реле тока РТ-40 созданы электромагнитные реле максимального напряжения РН-51, РН-53 и минимальные реле напряжения РН-54 и др. Реле серии РН-50 рассчитаны на номинальные напряжения от 30 до 400 В. Коэффициент возврата 0,8. Собственное время срабатывания реле не более 0,15 с при снижении напряжения до 0,8 номинального. Реле имеют один замыкающий контакт и один размыкающий контакт.

7.2.4. Нулевая защита

В схемах на рис. 7.3 и на рис. 7.4 реализована нулевая защита. Двигатель работает, когда включен контактор КМ и его вспомогательный контакт КМ шунтирует замыкающий контакт кнопки SB1 «Пуск». Если возникает перерыв в питании схемы, контактор отключится (отпустит) и разомкнет свои контакты. Двигатель М отключится. Поэтому после возобновления питания схемы не произойдет самопроизвольного включения контактора и двигателя. Для продолжения работы двигателя нужно осуществить его повторный пуск кнопкой SB1. Срабатывание контактора приведет к замыканию его контактов, причем замкнувшийся вспомогательный контакт КМ шунтирует контакт кнопки SB1, и по катушке контактора будет протекать ток независимо от состояния контакта SB1. Таким образом контактор осуществляет так называемый «самоподхват».

По аналогичным принципам в соответствии со схемами, приведенными на рис 7.1б и рис. 7.1в, построены узлы защиты в электроприводах переменного тока с использованием реле тока, реле напряжения и контакторов, предна-

Основные параметры герконов

Таблица 3.1

Параметры геркона	Тип геркона			
	КЭМ-1	КЭМ-3	МК-27-3	КЭН-4
Коммутируемый ток, А	0,5	1,0	0,3	2,0
Коммутируемое напряжение, В	220	127	100	100
Время срабатывания, мс	3,0	1,5	1,5	10,0
МДС срабатывания, А	55...110	30...100	30...80	250

3.8.2. Разновидности герконов

Геркон с переключающим контактом (переключающий геркон) имеет три вывода от стеклянного баллона. При подключении обмотки катушки геркона под напряжение подвижная пластина контакта перемещается от одной неподвижной контактной детали к другой неподвижной контактной детали, разрывая тем самым одну электрическую цепь и замыкая другую цепь. В исходное состояние подвижная контактная пластина возвращается после отключения обмотки от напряжения.

Геркон переключающий с помощью металлического шарика разрывает одну электрическую цепь и замыкает другую электрическую цепь за счет перемещения металлического шарика внутри стеклянного баллона при изменении наклона геркона или при перемещении шарика с помощью магнитного поля. Имеет четыре вывода от стеклянного баллона, подключенные попарно в разрывы двух цепей.

Поляризованный геркон действует подобно поляризованному электромагнитному приводу (см. п. 3.6), изменяя состояние переключающего контакта в зависимости от направления тока в обмотке управления.

Геркон плунжерного типа имеет подвижную контактную деталь – плунжер, который может перемещаться по оси баллона. Плунжер выполнен из ферромагнитного материала в виде трубки, контактирующей с контактодержателем через слой жидкого металла. На поверхностях контактных деталей с помощью

молекулярных сил удерживается жидкий металл (Hg). При подключении обмотки катушки под напряжение плунжер перемещается под действием электромагнитной силы и контакт замыкается. При отключении напряжения плунжер перемещается в исходное положение, и контакт размыкается. В этом герконе не требуется создания контактного нажатия, качество контакта повышено.

3.9. Разновидности преобразовательных устройств

В большинстве дистанционно управляемых аппаратов с коммутирующими контактами используются преобразовательные устройства, которые принимают по входу электрический сигнал управления и преобразуют его на выходе в механическое перемещение органа управления, необходимое для замыкания или (и) размыкания коммутирующих контактов аппарата. Из преобразовательных устройств наибольшее применение в электромеханических аппаратах получили электромагнитные преобразователи – электромагнитные механизмы (ЭММ), которые рассмотрены выше в этом разделе. Применяются также другие типы преобразователей.

3.9.1. Магнитоэлектрический преобразователь.

В магнитоэлектрическом преобразователе магнитное поле создается постоянным магнитом. Обмотка преобразователя располагается на подвижной рамке, которая выполняет функцию органа управления. В зависимости от конструкции преобразователя рамка, находясь в магнитном поле, может совершать поворотное или поступательное движение. Перемещение рамки происходит после подключения обмотки под напряжение, когда по ней протекает ток. Сила $F_{MЭ}$ и момент силы $M_{MЭ}$, действующие на рамку при взаимодействии тока I с магнитным полем, пропорциональны силе тока:

$$F_{MЭ}=k_1I, \quad M_{MЭ}=k_2I.$$

Значения коэффициентов пропорциональности k_1 и k_2 зависят от конструкции магнитоэлектрического преобразователя.

В схеме на рис. 7.4а реле минимального напряжения KV предназначено для отключения схемы управления от питания при снижении напряжения питания до величины уставки напряжения отпускания реле $U_{om} < U_{нцemu}$. Кнопки управления SB1, SB2 используются соответственно для пуска и остановки двигателя М (на схеме показана только якорная обмотка двигателя). Непосредственное включение и отключение двигателя М осуществляется главным контактом KM контактора KM.

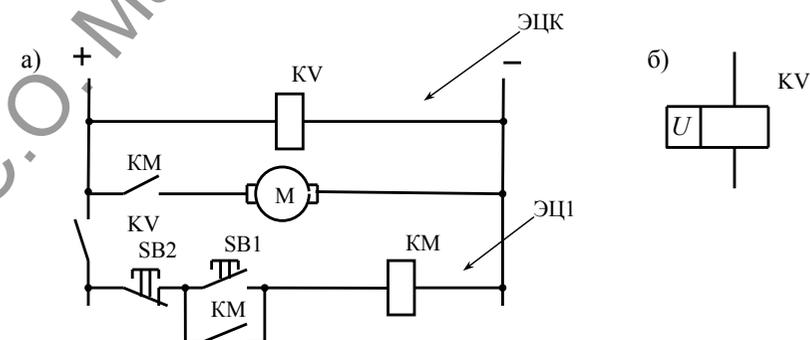


Рис. 7.4. Фрагмент схемы с минимальной защитой при использовании реле напряжения (а), условное обозначение катушки реле с обмоткой напряжения (в)

Когда реле KV отпустит при снижении напряжения в сети до напряжения отпускания; контакт KV разомкнется и отключит от питания катушку контактора KM. Двигатель М будет выключен главным контактом KM контактора. Вновь включить двигатель удастся нажатием кнопки SB1 тогда, когда напряжение в сети превысит напряжение срабатывания реле KV.

7.2.3. Реле максимального напряжения

Электромагнитное реле максимального напряжения (см. п. 6.2.1 – п. 6.2.4) настраивают на срабатывание при определенном значении уставки на срабатывание $U_{cp} > U_{нцemu}$. Реле работает, если напряжение сети $U_{сетu} > U_{cp}$. Тяговая характеристика реле при срабатывании располагается выше механической характеристики реле. Если в схеме на рис. 7.3 вместо реле минимального

гателя с фазным ротором уставку тока срабатывания выбирают из условия $I_{cp} \geq (2,25 \dots 2,5) I_{ном.дв}$, где $I_{ном.дв}$ – номинальный ток двигателя. Данные, указанные в паспортах реле и защищаемого объекта, должны обеспечивать неравенство $I_{ном.р} \geq I_{ном.дв}$, где $I_{ном.р}$ – номинальный ток реле.

В схеме на рис. 7.3б реле максимального тока КА используется для ограничения времени «стоянки двигателя под током», осуществляя защиту двигателя от перегрузки.

Реле времени КТ работает при подаче питания на схему. Поэтому к моменту включения двигателя кнопкой SB1 контакт КТ реле времени замкнут. Пусковой ток $I_{пуск}$ двигателя, когда уставка I_{cp} реле КА выбрана из условия $I_{cp} < I_{пуск}$, не приведет к отключению контактора КМ и двигателя М, если $I_{пуск}$ за время выдержки ($\tau_{от}$) реле КТ успеет снизиться до величины, меньшей $I_{от}$ тока отпускания реле КА. Иначе говоря, при пуске двигателя реле тока КА должно отпустить раньше, чем отпустит реле времени КТ, тогда размыкания контакта КТ в цепи питания катушки контактора КМ не произойдет. В этом случае узел, состоящий из аппаратов КА, КТ, КМ будет осуществлять защиту двигателя от перегрузки, ограничивая продолжительность стоянки двигателя под током величиной, примерно равной времени выдержки $\tau_{от}$ реле времени КТ.

В схемах защиты мощных электродвигателей и трансформаторов применяются реле тока серии РТ-40. Реле рассчитаны на токи от 0,2 до 200 А. Время срабатывания составляет 0,03 с при токе $I=3I_{cp}$, коэффициент возврата $k_{в} \geq 0,7$.

7.2.2. Реле минимального напряжения

Электромагнитное реле минимального напряжения (см. п. 6.2.1 – п. 6.2.4) применяют для защиты электропривода при снижении напряжения в питающей сети относительно его номинального значения $U_{нсети}$. Реле минимального напряжения настраивают на отпускание при определенном значении параметра отпускания $U_{от}$. Реле отпустит, если напряжение $U_{сети}$ в сети снизится до значения $U < U_{от}$ (например, $U_{от} = 0,85 U_{нсети}$). При этом тяговая характеристика реле располагается ниже его механической характеристики.

Особенности магнитоэлектрических преобразователей:

это поляризованные устройства (при изменении направления тока в обмотке изменяется направление силы и момента);

им свойственна высокая чувствительность (магнитоэлектрические реле могут быть построены на мощность $10^{-8} \dots 10^{-10}$ Вт);

они неработоспособны при переменном токе;

характеристика управления линейная.

3.9.2. Электродинамический преобразователь.

В отличие от магнитоэлектрического преобразователя в электродинамическом преобразователе магнитное поле создается не постоянным магнитом, а катушкой, по обмотке которой протекает электрический ток. Поэтому сила $F_{эд}$ и вращающий момент $M_{эд}$, действующие на подвижную рамку с обмоткой, зависят от силы тока I_p в обмотке рамки и силы тока I_k в катушке:

$$F_{эд} = k_3 I_p I_k, \quad M_{эд} = k_4 I_p I_k,$$

где k_3 , k_4 – коэффициенты, значения которых зависят от конструкции преобразователя.

Электродинамические преобразователи способны работать на переменном токе. Если обмотки рамки и катушки соединить последовательно, тогда сила $F_{эд}$ и момент $M_{эд}$ будут сохранять определенную направленность действия при переменном токе. В этом случае характеристика управления нелинейная, представляет собой параболу.

Электродинамический преобразователь может быть выполнен без магнитопровода, что позволяет применять такой преобразователь на повышенной частоте тока.

3.9.3. Биметаллический электротепловой преобразователь.

Биметаллический электротепловой преобразователь осуществляет преобразование электрической энергии в тепловую энергию, которая затем преобра-

зуется в механическую энергию изгиба биметаллической пластины. Действие преобразователя основано на разном линейном удлинении двух скрепленных друг с другом пластин при их нагревании. Пластины соединяются либо сваркой, либо прокаткой в горячем состоянии, образуя так называемую *биметаллическую пластину*. Составляющие ее пластины имеют разные температурные коэффициенты линейного удлинения. Например, для одной пластины используется железоникелевый сплав «инвар» с малым значением температурного коэффициента, для другой – хромоникелевый сплав с большим значением температурного коэффициента. Поэтому при нагревании биметаллическая пластина изгибается.

Биметаллические преобразователи электрической энергии в механическую энергию выполняют различной конструкции. Биметаллическая пластина может нагреваться проходящим по ней током. Для нагрева пластины применяются также специальный нагреватель, выполненный из провода высокого сопротивления, навитого на пластину. Провод нагревается проходящим по нему током и передает тепло биметаллической пластине.

Биметаллические преобразовательные устройства применяют в аппаратах защиты электрических цепей и электроустановок от перегрузок, например, в электротепловых реле, автоматических выключателях и др.

На рис. 7.3 приведены примеры, иллюстрирующие принцип построения схем защиты с реле максимального тока.

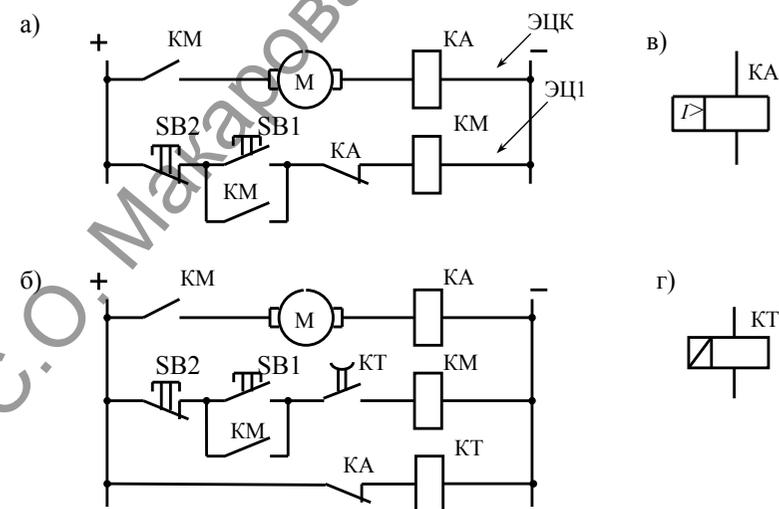


Рис. 7.3. Фрагменты схем защиты электродвигателя от сверхтоков (а, б) и применяемые условные обозначение катушки реле с обмоткой максимального тока (в) и катушки электромагнитного реле времени (г)

В схеме на рис. 7.3а реле максимального тока КА предназначено для отключения якорной обмотки двигателя от питания при возникновении в ней короткого замыкания. Кнопки управления SB1, SB2 (с самовозвратом) используются соответственно для пуска и остановки двигателя М (на схеме показана только якорная обмотка двигателя). Непосредственное включение и отключение двигателя осуществляется главным контактом КМ контактора КМ.

Пуск двигателя М (рис. 7.3а) состоит в том случае, если реле тока КА не среагирует на пусковой ток двигателя и не разомкнет свой контакт. В противном случае контактор КМ будет отключен контактом КА реле максимального тока, и контактор своим главным контактом КМ отключит двигатель М от питания. Чтобы не было срыва пуска двигателя, уставку I_{cp} тока срабатывания реле рекомендуется выбирать [10] для защиты двигателя постоянного тока из условия $I_{cp} \geq (1,3 \dots 1,5) I_{пуск}$, где $I_{пуск}$ – пусковой ток двигателя. Для защиты дви-

ток двигателя. Если ток, например ток короткого замыкания, в двигателе превышает пятикратное значение номинального тока, защита осуществляется с помощью реле максимального тока. Отключение двигателя производится линейным контактором.

В электроприводах применяют так называемую *нулевую защиту*. Ее смысл состоит в том, что электропривод (электродвигатель) не продолжит работу после даже кратковременного прекращения питания от ИЭЭ. Нулевую защиту выполняет реле минимального напряжения совместно с линейным контактором или контактор без реле, если он включен по схеме с «самоподхватом», когда вспомогательный замыкающий контакт контактора подсоединен в разрыв цепи питания его катушки параллельно контакту кнопки «Пуск».

7.2. Электромагнитные аппараты защиты

7.2.1. Реле максимального тока

Электромагнитное реле максимального тока (см. п. 6.2.1 – п. 6.2.4) применяют для защиты двигателя электропривода от сверхтока. Действие реле максимального тока представляют с помощью времятоковой (защитной) характеристики. Она выражает в графической форме зависимость времени срабатывания t_{cp} реле от силы тока I в обмотке его катушки. В упрощенном виде времятоковая характеристика реле максимального тока показана на рис. 7.2. Ее называют «независимой» характеристикой, так как время срабатывания реле практически не изменяется ($t_{cp} = \tau_{cp}$) при токах, больших некоторого значения тока срабатывания I_{cp} .

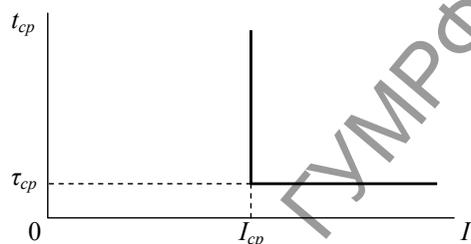


Рис. 7.2. Времятоковая характеристика реле максимального тока

Глава 4

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА АППАРАТОВ

4.1. Общие сведения

Современные электронные устройства¹⁹, независимо от их типа (аналоговые, дискретные, цифровые), являются твердотельными изделиями электронной промышленности, принцип действия которых основан на протекании электрического тока через полупроводниковые материалы. На базе этих устройств созданы электронные аппараты бесконтактной коммутации электрических цепей, например, разнообразные тиристорные пускатели, твердотельные реле и контакторы²⁰. В п. 1.1.3, рис. 1.6 приведен пример бесконтактного устройства управления передачей энергии по электрической цепи. Электронные аппараты, в том числе и выполненный по схеме рис. 1.6, можно применять с различными приемниками электрической энергии (R_H): лампой накаливания, электромагнитом, термостатом, электродвигателем и т. д.

На рис. 4.1а в качестве примера показан внешний вид трехфазного твердотельного реле, применяемого для коммутации цепей переменного тока. Реле подсоединяется в разрыв трехфазной электрической цепи {L1, L2, L3} как показано на рис. 4.1б.

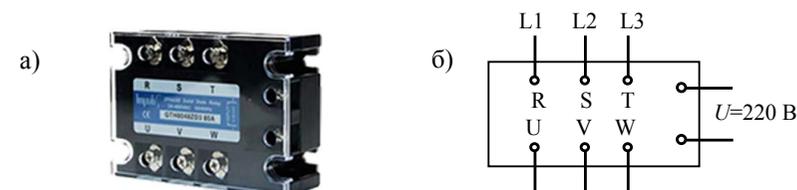


Рис. 4.1. Трехфазное твердотельное реле (а) и подключение реле в разрыв трехфазной электрической цепи (б)

Все функциональные части реле размещены едином корпусе. Реле производит коммутацию электрических цепей с помощью силовых симисторов по сигналу управления, поступающему из цепи переменного тока с напряжением

$U = 220$ В. Реле не имеет подвижных частей, в нем нет коммутирующих контактов. По классификации, приведенной в п. 1.9, твердотельное реле относится к статическим аппаратам, принадлежит классу аппаратов бесконтактной коммутации электрических цепей.

В твердотельном реле и, в общем случае, в составе электронного аппарата (рис. 4.2) выделяют две основные части: электронное *исполнительное устройство* (ИУ) и электронное *устройство управления* (УУ).

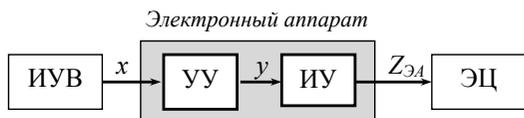


Рис. 4.2. Функциональные части электронного аппарата

ИУ с помощью *неразмыкаемых* контактов (на рис. 4.1 их шесть: R, S, T, U, V, W) соединяют с электрической цепью (ЭЦ), чтобы аппарат мог оказывать управляемое влияние на передачу энергии по этой цепи. Требуемые управляющие воздействия на ИУ вырабатываются электронным устройством УУ по сигналам от внешнего источника управляющих воздействий (ИУВ). Могут использоваться электрические, оптические и механические связи УУ с ИУВ.

Электронное исполнительное устройство ИУ является силовой частью электронного аппарата. ИУ непосредственно воздействует на электрическую цепь ЭЦ, по которой передается энергия от источника к приемнику (см. п. 1.5.1). Исполнительные элементы ИУ могут быть подключены к ЭЦ по одной из схем, рассмотренных в п. 1.5.2, рис. 1.10. Для силовых ЭЦ применяют электронные аппараты, у которых основными исполнительными элементами ИУ являются *электронные ключи*. К таким ключам относятся транзисторные и тиристорные ключи, реализованные соответственно на транзисторах и тиристорах. Их называют также полупроводниковыми ключами. Они позволяют свести до минимума потери энергии при управляемой передаче энергии по ЭЦ (см. п. 1.5.3), так как дают возможность применять импульсную модуляцию потока энергии (см. п. 1.5.4) с частотой до десятков и более килогерц.

ской энергии (ПЭЭ) по электрической цепи (ЭЦК). Контролируемый параметр цепи ЭЦК – ток или (и) напряжение.

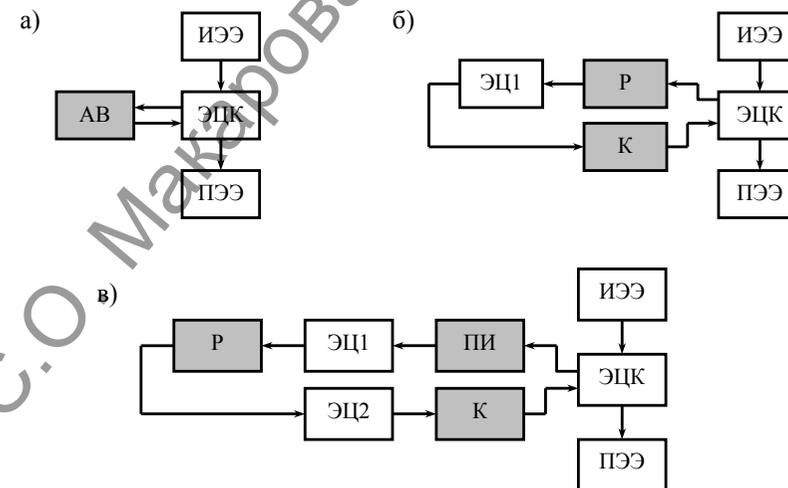


Рис. 7.1. Структурные схемы узлов автоматической защиты

В схеме на рис. 7.1а аппаратом защиты является *автоматический выключатель* (АВ) или *предохранитель* с плавкой вставкой. Автоматический выключатель (см. п. 7.4), называемый также *автоматом*, выполняет функцию защиты, разрывая своими контактами ЭЦК при автоматическом отключении сверхтоком. Предохранитель (см. п. 7.6) разрывает ЭЦК своей плавкой вставкой, разрушаемой сверхтоком.

Для схем на рис. 7.1б и рис. 5.1в аппаратом защиты обычно служит реле (Р) тока или напряжения, применяемое совместно с контактором (К). Для защиты двигателей электроприводов от перегрузки применяются *электро тепловые реле* (см. п. 7.3). Функции контроля параметров ЭЦК и гальванической развязки цепи управления (ЭЦ1) и силовой ЭЦК может выполнять (на рис. 7.1в) *измерительный преобразователь* (ПИ), например, трансформатор тока или трансформатор напряжения.

Электродвигатель привода защищают от перегрузки с помощью электро-теплого реле, если ток в двигателе превышает на 25...400 % номинальный

Глава 7 АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ

7.1. Общие сведения

В электроприводах и системах автоматики применяют аппараты защиты электрических цепей и приемников электрической энергии, а также обслуживающего персонала для отключения участка цепи, на котором возник ненормальный режим работы, в следующих случаях:

- возникновение сверхтока – электрического тока перегрузки или тока короткого замыкания;
- снижение электрического напряжения ниже допустимого значения;
- повышение электрического напряжения выше допустимого значения;
- появление недопустимого по величине тока утечки на землю и др.

При выполнении функции защиты необходимо решать следующие задачи:

- 1) осуществлять контроль электрического параметра (тока, напряжения) в электрической цепи;
- 2) выработать команду на отключение участка цепи, если контролируемый параметр вышел за пределы области допустимых значений;
- 3) исполнить команду, отключив участок цепи, на котором возник ненормальный режим работы.

Для решения этих задач могут использоваться несколько электроаппаратов, например, три, если каждый аппарат реализует решение только одной из перечисленных задач, и в совокупности они выполняют функцию защиты. Может использоваться один аппарат, но тогда он должен решать все три задачи.

Рассмотрим схемы реализации функции автоматической защиты: с одним аппаратом (рис. 7.1а), с двумя аппаратами (рис. 7.1б) и с тремя аппаратами (рис. 7.1в).

Источником информации для аппарата защиты служит канал передачи энергии от источника электрической энергии (ИЭЭ) до приемника электриче-

В функциональном отношении электронный ключ подобен коммутирующему контакту, так как практически мгновенно способен изменять в ЭЦ электрическое сопротивление $Z_{\text{э}}$ в широких пределах от значений, близких к нулю, до десятков мегаом. По-существу, можно говорить о коммутации электрической цепи электронным ключом. Поэтому его называют также *коммутационным элементом* аппарата. В электронном аппарате в зависимости от его назначения предусматривают от одного до шести таких коммутационных элементов. Например, в тиристорном реверсивном пускателе их может быть пять или шесть.

Электронное устройство управления УУ (рис. 4.2) формирует управляющие воздействия u на ИУ аппарата на основе обработки информации, поступающей от источника управляющих воздействий ИУВ в виде сигналов x (см. п. 1.1.3). Функции электронных УУ динамично расширяются и совершенствуются. На УУ возлагаются:

- обмен информацией с внешней средой с помощью органов управления, датчиков и устройств отображения информации;
- обработка информации по определенному алгоритму и выработка сигналов о требуемом воздействии на исполнительные элементы аппарата;
- формирование импульсов определенной мощности и формы для управления электронными ключами;
- текущий контроль и диагностика силовой части аппарата.

Устройство управления, реализующее все или некоторые из указанных функций, называют *системой управления*. Функциональные компоненты системы управления обычно выполняют на микроэлектронных элементах с применением микроконтроллеров (см. п. 4.8.4). Электронные аппараты с развитой системой управления называют *интеллектуальными* аппаратами. Примером служит «интеллектуальный» твердотельный контактор, имеющий дополнительные диагностические возможности: контроль неисправности тиристоров, перегрева, отсутствия нагрузки, обрыва предохранителя и др.

Поскольку компоненты системы управления могут быть выполнены на различной элементной базе (аналоговые, цифровые микросхемы, транзисторы, и др.), то в системе управления в таком случае предусматривают источник оперативного питания (ИОП), который представляет собой блок вторичных источников питания. В ИОП используются различные виды преобразователей и регуляторов, согласующих параметры первичных источников питания – силовых цепей с параметрами питания элементов системы управления от ИОП.

4.2. Транзисторные исполнительные устройства

4.2.1. Основные схемы

Транзистор в ИУ выполняет роль управляемого сопротивления ($Z_{ЭА}$ на рис. 4.2), вносимого в цепь нагрузки (приемника электрической энергии). Величина $Z_{ЭА}$ определяется уровнем и знаком управляющего сигнала. Для большинства практических случаев транзистор может быть замещен активным сопротивлением $R_{ТР}$ так, что $Z_{ЭА}=R_{ТР}$.

Последовательная и параллельная схемы управления передачей энергии по электрической цепи с биполярным транзистором VT приведены на рис. 4.3 (см. также п. 1.5.2, рис. 1.10). Через U , u_{yn} и u_H обозначены соответственно напряжение источника электрической энергии, напряжение сигнала управления и падение напряжения на нагрузке R_H (приемнике электрической энергии).

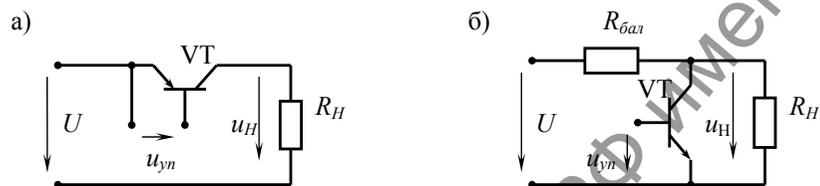


Рис. 4.3. Последовательная (а) и параллельная (б) схемы включения ИУ на биполярном транзисторе

Вместо биполярного транзистора VT типа *p-n-p* в последовательной схеме может быть использован транзистор типа *n-p-n* (или полевой транзистор). Аналогично может быть изменен тип транзистора в параллельной схеме.

разным по величине температурным коэффициентам латуни и инвара и специальной конструкции кинематической цепи МП, происходит срабатывание реле при нагревании корпуса до некоторой температуры. Снижение температуры до определенного значения вызывает отпускание реле и возвращение контактов в исходное состояние. Пределы контролируемой температуры от 25 до 200 °С, погрешность не более 5 °С.

Бесконтактное температурное реле на основе термистора имеет воспринимающий температуру элемент – терморезистор. Этот полупроводниковый прибор имеет существенно нелинейную вольт-амперную характеристику (см. п. 1.6.2) и большой по абсолютной величине отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Чувствительность термистора значительно выше, чем у биметаллического воспринимающего элемента контактного реле.

Термистор подсоединяется в разрыв электрической цепи так же, как подсоединяется коммутирующий контакт. Ток, протекающий по нему сначала плавно при нагреве термистора, а затем скачком возрастает из-за изменения сопротивления от 2,2 кОм до 30 Ом (у термистора СТ3-27) в рабочем диапазоне температур от 25 °С. Номинальная мощность рассеяния 70 мВт.

6.5.5. Комплектное реле контроля неэлектрических параметров

Комплектные реле контроля перемещения, скорости, температуры построены в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 6.11. В них предусмотрены соответствующие датчики: перемещения (положения), скорости, температуры (см. п. 9.1). С выхода датчика электрическое напряжение подается на обмотку катушки малогабаритного реле напряжения (РН). Уставка реле настраивается на определенное значение входной величины по напряжению срабатывания РН.

Например, в устройствах автоматике используется реле скорости и направления вращения, в состав которого входят тахогенератор постоянного тока (см. п. 9.5.1) и поляризованное реле (см. п. 6.1).

Рассмотрим реле второго типа, действующего по принципу асинхронного двигателя. Реле механически соединено с валом двигателя. Постоянный магнит 3 вращается этим валом, внутри цилиндра 2 типа «беличья клетка». Токи, индуцированные в стержнях клетки, взаимодействуют с вращающимся магнитным полем постоянного магнита и создают для цилиндра и рычага 1 (органа управления) вращающий момент. Например, при определенной частоте вращения вала против часовой стрелки вращающий момент вызовет перемещение толкателя механической передачи МП1 влево на некоторую величину λ , достаточную чтобы произошла коммутация электрической цепи ЭЦ1 коммутирующим контактом КК1. При вращении вала по часовой стрелке произойдет коммутация цепи ЭЦ2 контактом КК2, если скорость вращения превысит значение уставки реле.

Уставку срабатывания реле в зависимости от скорости вращения настраивают путем регулировки натяжения возвратной пружины механической передачи. Для ускорения процесса коммутации в механической передаче может использоваться переключающая пружина (см. п. 3.2.1, п. 3.2.4).

6.5.4. Температурное реле

Механическое температурное реле реагирует на изменение температуры воспринимающего элемента, принцип действия которого подобен действию биметаллического электротеплового преобразователя (см. п. 3.9.3) с той разницей, что на нагрев биметалла оказывает влияние не ток, а окружающая среда. Реле может быть представлено структурной схемой, изображенной на рис. 6.10.

Конструктивное исполнение воспринимающего элемента (ИП+ОРУ) температурного реле определяется во многом областью его применения. Например, температурное реле типа ТР-200М предназначено для контроля температуры нагрева жидкой или газовой рабочей среды. Корпус реле герметичный и представляет собой латунную трубку, длина которой изменяется при изменении температуры. Внутри корпуса находятся коммутирующие контакты КК и детали механической передачи МП, выполненные из инвара. Благодаря

Наибольшее практическое применение получила последовательная схема с включением транзистора по схеме с общим эмиттером (рис. 4.3а).

4.2.2. Семейство выходных характеристик транзистора

Выходная характеристика транзистора представляет собой зависимость силы тока коллектора I_K , равного для последовательной схемы (рис. 4.3а) току I_H нагрузки, от величины падения напряжения $U_{ЭК}$ на выводах эмиттер-коллектор транзистора. Выходная характеристика отображает работу транзистора в статическом (установившемся) режиме при постоянном значении тока базы транзистора. Семейство выходных характеристик транзистора в системе координат $0, U_{ЭК}, I_H$ показано на рис. 4.4 для различных значений $I_{B0}, I_{B1}, \dots, I_{B6}$ тока I_B базы транзистора.

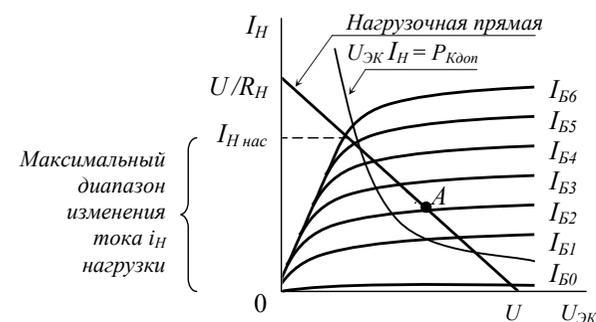


Рис. 4.4. Семейство выходных характеристик ИУ на биполярном транзисторе

Как следует из приведенных на рис. 4.4 графиков, при изменении тока I_B базы транзистора от I_{B0} до I_{B6} рабочая точка A перемещается вверх по нагрузочной прямой. При этом, ток I_H нагрузки увеличивается благодаря уменьшению сопротивления R_{TP} транзистора в цепи эмиттер-коллектор-нагрузка, когда к цепи приложено постоянное напряжение U (см. рис. 4.3а). Подобный анализ позволяет заключить, что в параллельной схеме, показанной на рис. 4.3б, уменьшение R_{TP} приведет к уменьшению тока I_H нагрузки.

Таким образом, управляя транзистором с помощью изменения тока базы, можно влиять на передачу энергии нагрузке R_H от источника напряжения U .

4.2.3. Активный режим работы транзистора

Обычно транзистор рассматривается как усилительный элемент при преобразовании напряжения управления u_{yn} в напряжение u_H на нагрузке R_H . В этом случае транзисторный усилитель характеризуется коэффициентом усиления, равным отношению u_H к u_{yn} . Транзистор, используемый в качестве аналогового усилителя постоянного тока, осуществляет усиление сигналов, изменение которых происходит много медленнее длительности переходных процессов в самом усилителе. Транзистор работает в активном режиме. При этом рабочая точка A перемещается по нагрузочной прямой, занимая на ней различные положения в зависимости от величины тока базы i_B (рис. 4.4). Коллекторный ток i_K , он же ток нагрузки i_H , плавно изменяется в выделенном на рисунке диапазоне.

Падение напряжение на нагрузке $u_H = i_K R_H = U - u_{ЭК}$ зависит от величины напряжения $u_{ЭК}$ между эмиттером и коллектором транзистора. Для линеаризации входной характеристики транзистора и зависимости i_H от i_B в цепь базы транзистора включают балластный резистор, сопротивление которого $R_{бал} \gg R_H$.

Если рассматривать транзистор как исполнительное устройство ИУ аппарата (рис. 4.2), то его работу удобно характеризовать величиной коэффициента k_P передачи энергии (мощности) по цепи источник электрической энергии \rightarrow приемник энергии (см. п. 1.5.3 и п. 1.5.4). Эту цепь называют *главной* электрической цепью. При таком рассмотрении активный режим работы транзистора характеризуется плавным изменением значения k_P в главной цепи в пределах приблизительно от 0 до 1 и значительными потерями энергии (до 25% при $R_{TP} = R_H$) на нагрев транзистора.

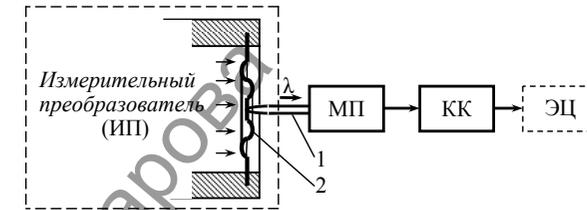


Рис. 6.12. Механическое реле давления

Избыточное давление действует на мембрану 2 (слева от мембраны). Сконцентрированное мембраной усилие от избыточного давления вызывает перемещение λ центра мембраны и толкателя 1 механической передачи (МП) с возвратной пружины (см. п. 3.2.1, п. 3.2.2). Перемещение толкателя приводит к коммутации электрической цепи ЭЦ коммутирующим контактом КК реле.

В реле давления, например, типа РДК-57 предусматривается регулировка уставки по давлению на срабатывание реле. Контакты реле позволяют разрывать электрическую цепь напряжением 380 В, мощностью до 350 Вт.

6.5.3. Реле контроля угловой скорости

Применяются механические реле контроля угловой скорости вращения двух типов:

- с измерительным преобразователем, реагирующим на центробежную силу, создаваемую вращающимися грузами преобразователя;
- с измерительными преобразователями, действующими по принципу асинхронного двигателя (рис. 6.13).

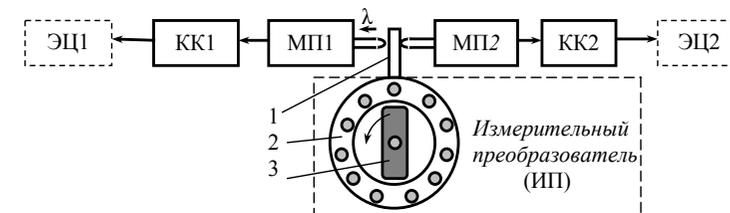


Рис. 6.13. Механическое реле скорости

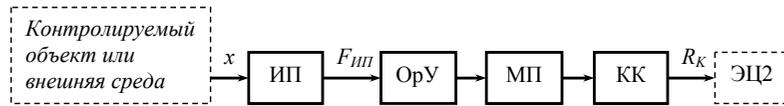


Рис. 6.10. Структурная схема механического реле контроля неэлектрической величины

Своим коммутирующим контактом КК реле воздействует на электрическую цепь (ЭЦ2), изменяя в ЭЦ2 сопротивление R_K . Количество коммутирующих контактов может быть больше одного.

2) *электрические реле*, в составе которых предусмотрены *измерительный преобразователь* (ИП) входной физической величины x в *электрическую величину* (электрическое сопротивление $R_{ИП}$), а также реле напряжения (РН), получающее сигнал от ИП по электрической цепи (ЭЦ1), находящейся под напряжением U (рис. 6.11).

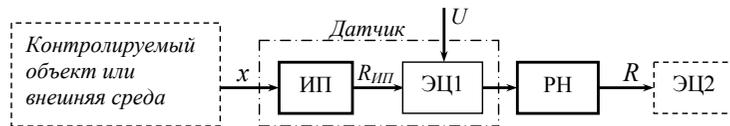


Рис. 6.11. Структурная схема комплектного реле контроля неэлектрической величины

Реле второго типа может быть контактным (выход $R=R_K$) или бесконтактным, выполненным, например, на базе полупроводникового реле (см. п. 6.3).

6.5.2. Механическое реле давления

Реле давления предназначено для автоматического включения и отключения электроприводов насосов, поддерживающих определенное давление в гидравлических системах, и для использования в различных устройствах автоматики и сигнализации.

В измерительном преобразователе реле давления применяется мембрана³² (рис. 6.12).

4.2.4. Ключевой режим работы транзистора

В импульсных усилителях реализуется так называемый ключевой режим работы (режим переключения) транзистора. В этом случае транзистор может длительно находиться только в двух состояниях: насыщенном или отсечки.

В состоянии насыщения транзистор находится тогда, когда от источника сигнала управления во входную цепь транзистора подается ток i_B большой (по абсолютной величине), чем необходимо для получения максимального коллекторного тока $|I_{Кmax}| \approx U_{ИП}/R_{ИП}$. Для насыщенного транзистора средней мощности обычно $U_{ЭК} < 0,1$ В. При этом, величина коэффициента передачи энергии κ_P приближается к единице, и потери энергии на нагрев транзистора минимальны.

В состоянии отсечки транзистор переводится, когда на базу подается напряжение $u_{БЭ}$, обратное для эмиттерного $p-n$ -перехода. В этом случае ток эмиттера очень мал и сопротивление $R_{ТР}$ между выводами эмиттер-коллектор составляет $0,1 \dots 10$ Мом. Ток коллектора определяется обратным током коллекторного перехода и равен току базы $I_{Б0}$. Величина коэффициента передачи энергии κ_P в главной цепи приближается к нулю, и потери энергии на нагрев транзистора также минимальны.

Для обеспечения быстрого перехода транзистора из области насыщения в область отсечки необходимо, чтобы сигналы, подаваемые на базу, были достаточными по величине и прикладывались скачком (имели бы крутые передний и задний фронты). Время включения транзистора может составлять десятые доли микросекунды, время отключения в 2-3 раза больше времени включения.

Работа транзистора в ключевом режиме при коммутации электрической цепи аналогична по действию на эту цепь включению и отключению замыкающего контакта электромеханического аппарата с самовозвратом, например, кнопки управления, реле, контактора и др. Однако, потери энергии в результате ее рассеяния на транзисторе оказываются, как правило, больше, чем на коммутирующем контакте в аналогичной электрической цепи.

4.2.5. Допустимая мощность рассеяния на транзисторе

В паспорте транзистора любого типа указывается допустимая мощность $P_{\text{доп}}$, которую он может рассеять на коллекторном переходе, не нагревшись выше допустимой температуры. Эта мощность практически равна произведению $U_{\text{ЭК}} I_{\text{К}}$. Если на графике выходных характеристик транзистора (рис. 4.4) нанести линию $U_{\text{ЭК}} I_{\text{Н}} = P_{\text{доп}}$ (гипербола), то она разделит область выходных характеристик на две зоны. Так как $I_{\text{Н}} = I_{\text{К}}$, то выше гиперболы $U_{\text{ЭК}} I_{\text{К}} > P_{\text{доп}}$. Длительная работа транзистора в этой зоне недопустима. В зоне ниже гиперболы, где $U_{\text{ЭК}} I_{\text{К}} < P_{\text{доп}}$, транзистор может работать неограниченное время. Для транзистора, работающего в активном режиме, нагрузочная прямая должна находиться ниже гиперболы $U_{\text{ЭК}} I_{\text{Н}} = P_{\text{доп}}$. Для транзистора, работающего в ключевом режиме, нагрузочная прямая может располагаться значительно выше при условии, что точка насыщения и точка отсечки на нагрузочной прямой находятся ниже гиперболы $U_{\text{ЭК}} I_{\text{Н}} = P_{\text{доп}}$. В этом случае мощность, выделяемая в нагрузке, может быть увеличена в 2-2,5 раза.

4.3. Силовые транзисторные ключи

4.3.1. Применяемые транзисторы

В качестве силовых ключей в аппаратах применяют биполярные транзисторы ВРТ (Bipolar Power Transistor); полевые транзисторы с изолированным затвором MOSFET (Metal – Oxid – Semiconductor – Field – Effect – Transistor); биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

Биполярные транзисторы, коммутирующие токи более 50 А, обычно рассчитаны на напряжение до 600 В и частоту переключений до 20 кГц.

Ключи на полевых транзисторах с изолированным затвором имеют большее быстродействие. Частота коммутации до 100 кГц. При токах свыше 50 А допустимое напряжение обычно не превышает 500 В. Сопротивление проводящего канала включенного транзисторного ключа в районе 0,5 Ом.

Сигнал X передается из электрической цепи ЭЦ1 в цепь ЭЦ2 с задержкой времени $\tau_{\text{ср}}$ (рис. 6.9б). Выходной сигнал Y формирует электромагнитное реле напряжения (РН), катушка которого подключается под напряжение U цепи ЭЦ3 выходным сигналом X_3 электронного устройства задержки УЗЭ.

В реле времени типов ВЛ-43, ВЛ-44, ВЛ-48 выдержка времени (до 200 с) создается с помощью цепочки R-C, обеспечивающей экспоненциальное возрастание напряжения $U_{\text{С}}$ на конденсаторе С после подачи по цепи ЭЦ1 напряжения на вход устройства задержки. Выходной сигнал Y_3 формируется компаратором²⁹ устройства задержки на основе сравнения $U_{\text{С}}$ с заданной величиной.

В реле времени типов ВЛ-45, ВЛ-46, ВЛ-47 создаются большие выдержки времени (до 10 ч) с помощью цифрового устройства задержки, в составе которого предусматривается генератор импульсов и счетчик импульсов. Импульсы отсчитываются счетчиком до тех пор, пока их число не будет соответствовать уставке времени замедления срабатывания. Тогда счетчик останавливается и открывается транзисторный ключ, обеспечивая подключение катушки реле РН под напряжение U в цепи ЭЦ3 (см. рис. 4.7а).

6.5. Реле контроля неэлектрических величин

6.5.1. Основные типы реле

Реле давления, реле скорости, реле температуры и т.д. реагируют соответственно на давление, на скорость, на температуру и т.д. внешнего по отношению к реле объекта или внешней среды коммутацией электрических цепей своими коммутационными элементами. Входные контролируемые физические величины у таких реле не являются электрическими величинами.

Среди реле контроля неэлектрических величин выделим реле двух типов:

1) *механические реле*, в составе которых предусмотрен *измерительный преобразователь*¹⁵ (ИП) входной физической величины x в силовое воздействие $F_{\text{ИП}}$ на орган управления (ОРУ) механического привода (см. п. 3.1) контактного узла реле (рис. 6.10). Перемещение ОРУ, вызванное силой $F_{\text{ИП}}$, передается механической передачей (МП) коммутирующему контакту (КК) реле.

редаче есть диск с упором (толкателем), с помощью которого можно настроить необходимую выдержку времени замыкания коммутирующего контакта реле в соответствующей электрической цепи (ЭЦК).

Работа реле отображена на рис. 6.8б участками временных диаграмм. Все воздействия характеризуются логическими переменными X (входными) и Y (выходными). Индексы у логических переменных X и Y определяют отношение каждой из этих переменных к конкретным элементам реле, показанным на рис. 6.8а. Единичное значение переменной соответствует состоянию «включено».

Программирование последовательности включений контактов КК1, КК2, КК3 производится путем настройки выдержек времени τ_{cp1} , τ_{cp2} , τ_{cp3} . После того, как сработает последний из контактов КК1, КК2 или КК3 (на диаграмме это КК3), двигатель ЭД автоматически отключится ($X_{ЭД}=0$) дополнительным контактом. Возврат реле в исходное состояние произойдет после отключения электромагнитного механизма сигналом $X_{ЭММ}=0$.

6.4.6. Комбинированное реле времени с электронным замедлителем

Полупроводниковые комбинированные реле времени типа ВЛ создают выдержку времени (0,1...200 с и более до 100 ч) с помощью электронного устройства замедления (УЗЭ). В качестве исполнительного элемента используется малогабаритное выходное электромагнитное реле (РН). Структурная схема полупроводникового комбинированного реле времени приведена на рис. 6.9а.

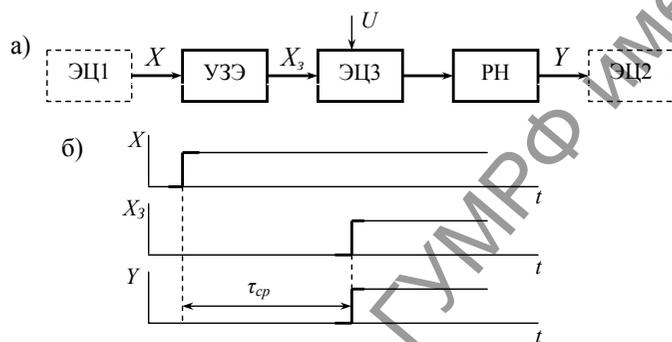


Рис. 6.9. Структурная схема (а) и временные диаграммы работы (б) полупроводникового комбинированного реле времени

Ключи на биполярных транзисторах с изолированным затвором объединяют положительные свойства биполярного и полевого транзисторов. Подобно биполярному транзистору IGBT-транзистор имеет малые потери мощности во включенном состоянии и высокое входное сопротивление цепи управления, характерное для полевых транзисторов.

На рис. 4.5 показаны условные обозначения полевых транзисторов с индуцированным (рис. 4.5 а) и встроенным (рис. 4.5 б) каналом n -типа; биполярного транзистора с изолированным затвором (рис. 4.5 в). Выводы транзисторов обозначены буквами: $З$ – затвор, $И$ – исток, $С$ – сток, $П$ – подложка, $К$ – коллектор, $Э$ – эмиттер.

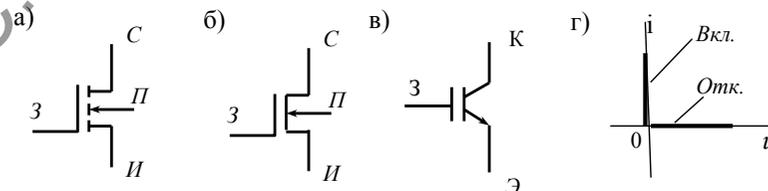


Рис. 4.5. Условные обозначения транзисторов с каналом n -типа (а, б, в) и идеализированная вольт-амперная характеристика транзисторов (г)

Транзистор IGBT закрыт, если на затвор не подано напряжение. Включение IGBT с каналом n -типа осуществляется подачей на затвор положительного напряжения ($u_{зэ}$) относительно эмиттера. Силовые IGBT коммутируют токи до 5 кА при частоте коммутации до 100 кГц.

Идеализированная вольт-амперная характеристика транзисторного ключа в системе координат напряжения u и тока i главной цепи показана на рис. 4.5г. Состоянию «Вкл.» ключа соответствует режим насыщения транзистора, состоянию «Отк.» – режим отсечки.

4.3.2. Силовые модули на транзисторах

Отечественная промышленность производит силовые модули на биполярных, полевых и биполярных транзисторах с изолированным затвором. Типовые схемы соединения элементов в модулях, как правило, соответствуют ти-

повым схемам преобразования параметров электрической энергии. Например, выпускаются модули по схемам однофазных и трехфазных выпрямителей и инверторов, модули по схемам ключевых регуляторов напряжения и др. Некоторые модули расширяют возможности применения транзисторных ключей, изменяя их вольт-амперные характеристики (рис. 4.6).

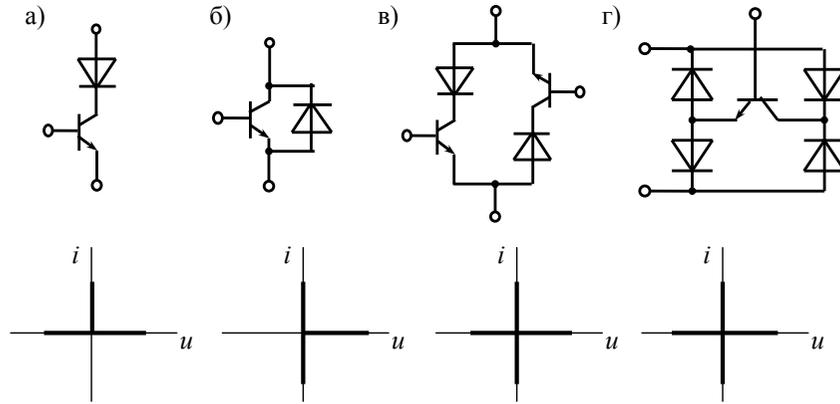


Рис. 4.6. Транзисторные ключи в модульном исполнении и их идеализированные вольт-амперные характеристики

Примеры силовых модулей на полевых транзисторах и биполярном транзисторе с изолированным затвором приведены на рис. 4.7.

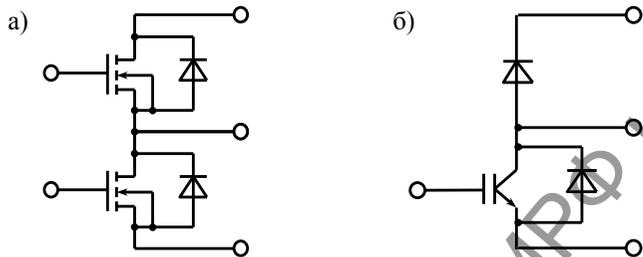


Рис. 4.7. Силовые модули на полевых транзисторах (а) и биполярном транзисторе с изолированным затвором (б)

Модуль на полевых транзисторах (рис. 4.7 а) содержат два последовательно соединенных ключа с обратными быстро восстанавливающимися дио-

от количества воздуха, засасываемого в единицу времени через входное отверстие камеры. Настройка выдержки времени осуществляется изменением площади сечения входного отверстия камеры с помощью специальной иглы.

6.4.5. Моторное реле времени

Моторные реле времени типа Е-52, РВ-4, ВС-10 и др. создают выдержку времени (1...360 с и более) при включении реле за счет замедления, получаемого в редукторе синхронного двигателя, входящего в состав реле. Структура реле (на примере программного реле типа ВС-10) показана на рис. 6.8а.

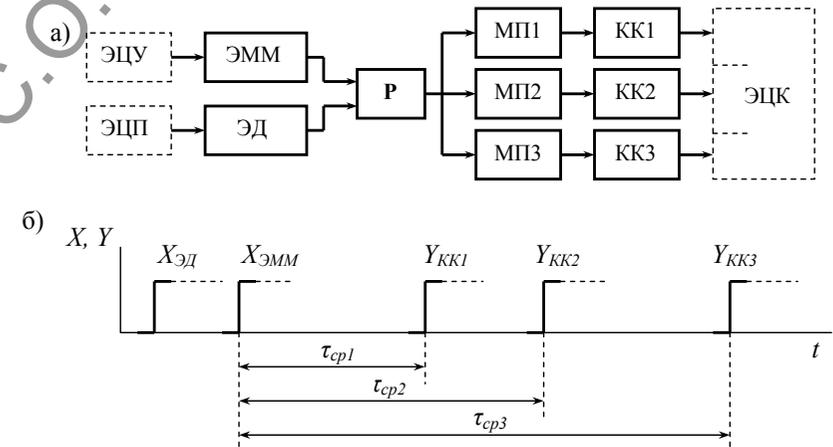


Рис. 6.8. Упрощенная структурная схема (а) и временные диаграммы работы (б) моторного реле времени типа ВС-10

В реле предусмотрен электродвигатель (ЭД), который получает питание по отдельной цепи (ЭЦП). Двигатель начинает работать с включением питания схемы, в которой используется реле. Вращение от двигателя до редуктора (Р) и далее к механическим передачам МП1, МП2, МП3 передается только после того, как сработает электромагнитный механизм (ЭММ) по сигналу управления (включения реле) из электрической цепи (ЭЦУ). Количество механических передач и, соответственно, коммутирующих контактов (КК) у рассматриваемого реле может быть три (как на рис. 6.4а) или шесть. В каждой механической пе-

трической цепи ЭЦ1, и команда, передаваемая в электрическую цепь ЭЦ2, условно представлены утолщенными линиями на диаграммах. Используются логические переменные:

$X = \langle \text{« катушке реле (рис. 6.4в) приложено напряжение } U \rangle$,

$Y = \langle \text{« замыкающий контакт (рис. 6.4г) замкнут} \rangle$.

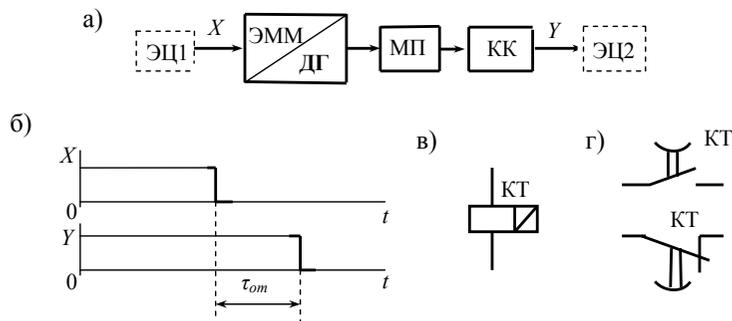


Рис. 6.7. Структурная схема (а), временные диаграммы работы (б), обозначения на электрической схеме катушки (в) и контакта (г) электромеханического реле времени

Выдержка времени при отпускании реле обозначена через τ_{om} .

Настройка реле на требуемую выдержку времени производится с помощью натяжения возвратной пружины и (или) установки немагнитных прокладок в электромагнитном механизме (см. п. 3.7.3).

6.4.4. Электромагнитное реле времени с пневматическим замедлителем

За электромагнитным реле времени с пневматическим замедлителем закрепилось название «электропневматическое реле времени».

Электропневматическое реле времени, например, типа РВП-2 имеет замедлитель – пневматический механизм в составе механической передачи с возвратной пружиной (см. п. 3.2.2). Он увеличивает время перемещения подвижного контактного узла (см. п. 2.2.1), создавая выдержку времени от 0,4 до 180 с как при срабатывании реле, так и при отпускании.

Пневматический механизм имеет камеру с диафрагмой, которая является элементом механической передачи. Скорость перемещения диафрагмы зависит

дами. В модуле на биполярном транзисторе с изолированным затвором реализовано последовательное соединение диода и транзистора с быстро восстанавливаемым диодом.

4.4. Тиристорные ключи

4.4.1. Применяемые тиристоры

В качестве силовых ключей в аппаратах применяют однооперационные тиристоры SCR (Silicon Controiled Rectifier) и двухоперационные (запираемые) тиристоры GTO (Gate – turn – off). На рис. 4.8 показаны условные изображения таких тиристоров (VS), запираемых в обратном направлении (управление по катоду). Три вывода из корпуса тиристора обозначены буквами: А – анод, К – катод, УЭ – управляющий электрод.

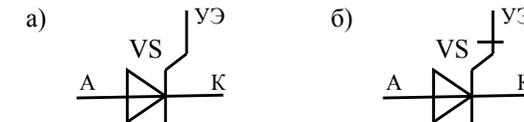


Рис. 4.8. Изображения тиристоров на электрических схемах: однооперационного (а), двухоперационного (б)

Кроме показанных на рис. 4.8 триодных тиристоров, запираемых в обратном направлении, существуют другие типы тиристоров, в том числе тиристоры, проводящие в обратном направлении, тиристоры, управляемые по аноду и др.

Тиристоры используются как выключатели и как импульсные регуляторы мощности, передаваемой электроприемнику от источника.

4.4.2. Вольт-амперная характеристика тиристора

Электрические свойства тиристоров рассмотрим на примере однооперационного тиристора (рис. 4.8а), запираемого в обратном направлении. Будем исходить из последовательной схемы включения тиристора VS с нагрузкой R_H , когда к электрической цепи приложено напряжение U . Обозначим: u_{np} – паде-

ние прямого напряжения на тиристоре (анод-катод), $u_{обр}$ – падение обратного напряжения (катод-анод), $i_{пр}$ – прямой ток тиристора (анод-катод), $i_{обр}$ – обратный ток тиристора (катод-анод).

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) тиристора показана на рис. 4.9.

Основной особенностью тиристора является наличие на его ВАХ участка 2 с отрицательным дифференциальным сопротивлением и, как следствие, работа тиристора в режиме переключения из непроводящего ток (иначе, *закрытого*) состояния (участок 1 на ВАХ) в проводящее (иначе, *открытое*) состояние (участок 3 на ВАХ).

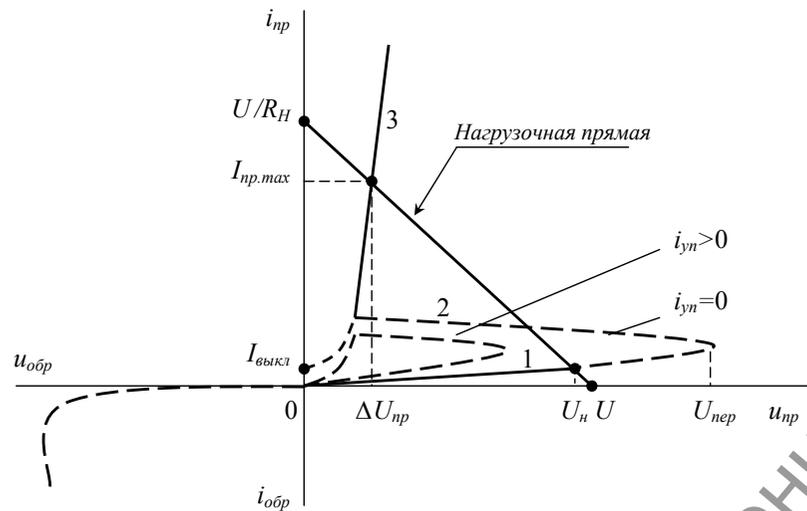


Рис. 4.9. Вольт-амперная характеристика однооперационного тиристора и нагрузочная прямая тиристорного ключа

Перевод тиристора из закрытого состояния в открытое состояние может осуществляться только при прямом напряжении $u_{пр}$ путем внешнего воздействия на прибор: изменением напряжения $u_{пр}$ между анодом и катодом или подачей на УЭ тока управления i_{yn} . В последнем случае достаточно подать на УЭ кратковременный импульс тока i_{yn} . При обратном напряжении $u_{обр}$ на тиристоре открыть тиристор невозможно ни изменением обратного напряжения $u_{обр}$, ни подачей тока управления i_{yn} на УЭ.

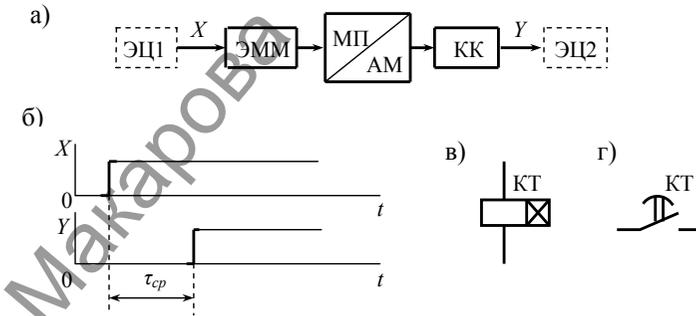


Рис. 6.6. Структурная схема (а), временные диаграммы работы (б), обозначения на электрической схеме катушки (в) и контакта (г) электромагнитного реле времени с анкерным механизмом

Действие реле показано с помощью временных диаграмм на рис. 6.6 б. Команда, поступающая из электрической цепи ЭЦ1, и команда, передаваемая в электрическую цепь ЭЦ2, условно представлены утолщенными линиями на диаграммах. Использованы логические переменные (см. п.1.6.3):

X = «к катушке реле (рис. 6.6 в) приложено напряжение $U > U_{ср}$ »,

Y = «коммутирующий контакт (рис. 6.6 г) замкнут».

Выдержка времени при срабатывании реле обозначена через $\tau_{ср}$.

6.4.3. Электромагнитное реле времени с демпферной гильзой

Электромагнитные реле времени типа РЭМ-200, РЭМ-20, РЭВ-800 имеют замедлитель в составе электромагнитного механизма (ЭММ) *постоянного тока* (рис. 6.7а). Замедлитель выполнен в виде короткозамкнутого медного кольца (см. п. 3.7.3), называемого *демпферной гильзой* (ДГ). Реле создает выдержку времени до 10 с *при отпуске*.

На рис. 6.7в показано обозначение катушки электромагнитного реле времени с запаздыванием при отпуске, на рис. 6.7 г – замыкающий контакт (вверху) и размыкающий контакт (внизу).

Действие реле с замыкающим коммутирующим контактом (КК) показано на рис. 6.7б с помощью временных диаграмм. Команда, поступающая из элек-

6.4. Реле времени

6.4.1. Назначение и основные параметры реле времени

Электромагнитные реле используются для коммутации электрической цепи (ЭЦ2 на рис. 6.1) с выдержкой времени (задержкой) более 250 мс после поступления на вход реле сигнала управления из другой цепи (ЭЦ1 на рис. 6.1). С этой целью применяются специальные *замедлители* в составе реле (см. п. 3.7.3, п. 3.7.4). Такое реле называют *реле времени*. Это аппарат, предназначенный для передачи команд³⁰ из одной электрической цепи в другую электрическую цепь с определенной предварительно установленной выдержкой времени³¹ [1].

Интервал времени от момента подачи управляющего сигнала на вход реле до момента срабатывания реле (см. п. 6.2.3) называют *выдержкой времени реле при срабатывании* (включении), а интервал времени от момента снятия управляющего сигнала до момента времени отпускания реле (см. также п. 6.2.3) – *выдержкой времени реле при отпуске* (отключении). Управляющий сигнал представляет собой скачкообразное изменение электрического напряжения на входе реле от 0 до $U > U_{cp}$ для срабатывания реле и от U до 0 для отпускания реле (U_{cp} – напряжение срабатывания реле).

6.4.2. Электромагнитное реле времени с анкерным механизмом

Электромагнитные реле времени типа ЭВ-100, ЭВ-200 имеют замедлитель – *анкерный (часовой) механизм* (АМ) в составе механической передачи (МП) реле (см. п. 3.7.4, рис. 6.6 а). Анкерный механизм увеличивает время движения подвижного контактного узла в контактной системе реле (см. п. 2.2.1), создавая выдержку времени от 0,1 до 20 с *при срабатывании* реле.

В реле применяют электромагнитный механизм *постоянного или переменного тока*. Настройка реле на требуемую выдержку времени производится с помощью смещения и последующего фиксирования контактной детали коммутирующего контакта (КК).

Рассматриваемый тиристор является не полностью управляемым полупроводниковым прибором, так как перевести тиристор из открытого в закрытое состояние нельзя током управления $i_{уп}$. Тиристор закроется, т. е. перейдет в непроводящее состояние, когда протекающий по нему ток $i_{пр}$ снизится до значения, близкого к нулю.

4.4.3. Основные параметры, характеризующие работу тиристора

По ВАХ тиристора с нагрузочной прямой (рис. 4.9) можно выделить точки и соответствующие им параметры, характеризующие работу прибора:

$U_{пер}$ – напряжение переключения (при подаче напряжения на прибор в прямом направлении, равного или превышающего $U_{пер}$, тиристор переходит из непроводящего состояния в проводящее состояние);

$I_{пер}$ – ток переключения (прямой ток, протекающий через прибор непосредственно перед переключением его в проводящее состояние при напряжении $U_{пер}$);

$I_{выкл}$ – ток выключения (при уменьшении тока через прибор до значения $I_{выкл}$ или ниже тиристор переходит в непроводящее состояние);

$I_{пр.мах}$ – максимальный прямой ток;

$\Delta U_{пр}$ – прямое падение напряжения на тиристоре при протекании через него максимального прямого тока.

Номинальное напряжение, на которое рассчитан тиристор, должно быть не менее напряжения $u_{нс}$, которое падает на нем, когда тиристор закрыт.

4.4.4. Некоторые разновидности тиристоров

В тиристорных ключах применяют полупроводниковые приборы различных типов (рис. 4.10):

- асимметричные тиристоры, в которых обычный тиристор интегрально объединен с встречновключенным силовым диодом, обеспечивающим протекание встречного для тиристора тока (рис. 4.11 а);

- симисторы – объединенные конструктивно пары встречновключенных тиристоров (рис. 4.11 б). Вольт-амперная характеристика симистора (симмет-

ричного тиристора) аналогична ВАХ, показанной на рис. 4.10, но она симметрична относительно начала координат (в третьем квадранте располагаются такие же ветви ВАХ, как и в первом квадранте);

- диодные тиристоры (динисторы), включаемые импульсом прямого напряжения (рис. 4.11 в);
- оптоотиристоры, управляемые световым потоком (рис. 4.11 з);
- двухоперационные (запираемые) тиристоры (рис. 4.11 д).

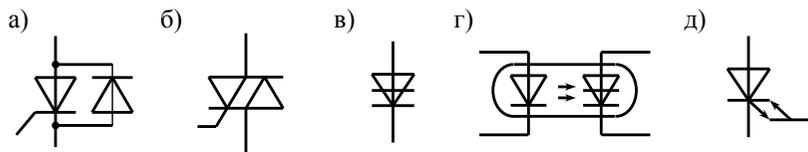


Рис. 4.10. Разновидности тиристоров

Запираемые тиристоры созданы с целью устранения неполной управляемости обычных тиристоров. Один из важнейших параметров двухоперационного тиристора – коэффициент отключения по току $K_{I(выкл)}$, равный отношению выключаемого тока $I_{пр(выкл)}$ в анодной цепи к соответствующему значению тока $I_{уп(выкл)}$ в цепи управления, который вызывает переход тиристора из открытого состояния в закрытое состояние.

Среди двухоперационных тиристоров выделяют следующие типы:

- запираемый тиристор GTO (Gate – turn – off), переключаемый в проводящее состояние и наоборот путем подачи на управляющий электрод сигналов соответствующей полярности;
- тиристор GCT (Gate commutated thyristor), коммутируемый по управляющему электроду, отличающийся наличием интегральной схемы управления;
- тиристор MCT (MOS-control thyristor), содержащий два полевых транзистора, один из которых обеспечивает процесс включения, подавая импульс тока на управляющий электрод, а другой – аналогично – процесс выключения тиристора.

Уставка напряжения отпускания реле U_{om} задается с помощью резистора R_0 одинаковой для всех трех контролируемых напряжений U_A , U_B , U_C в электрических цепях ЭЦ1_A, ЭЦ1_B, ЭЦ1_C. Величины U_A , U_B , U_C сравниваются компараторами (нелинейными элементами) с уставкой U_{om} . По результатам сравнения каждый компаратор формирует на своем выходе сигнал, уровень которого соответствует логической единице или логическому нулю. Любой кратковременный сигнал на выходе компаратора, вызванный провалом напряжения, преобразуется в сигнал большей длительности и подается в логическую схему И-НЕ (см. п. 8.4, п. 8.2). Появление нулевого сигнала на входе схемы И-НЕ вызывается снижением напряжения U_A , U_B или U_C за порог U_{om} . Тогда по единичному сигналу с выхода логической схемы И-НЕ формирователь импульсов управления (ФИУ) откроет электронный ключ (ЭК). Выходное электромагнитное реле (РЭМ) получит сигнал от ЭК по цепи (ЭЦ3). РЭМ сработает и произведет коммутацию электрической цепи (ЭЦ2) своим коммутирующим контактом. Тем самым РЭМ подаст команду³⁰ на отключение приемника электрической энергии (электродвигателя) от питания по всем контролируемым цепям ЭЦ1_A, ЭЦ1_B, ЭЦ1_C.

Для защиты электродвигателей, тиристорных преобразователей или других трехфазных потребителей при снижении симметричного напряжения, асимметрии междуфазных напряжений и обратном чередовании фаз применяют комбинированные полупроводниковые реле ЕЛ-10-1, ЕЛ-10-2. В каждом из них предусматривается выходное электромагнитное реле, которое срабатывает, при снижении напряжения в одной из фаз до 55...65% $U_{ном}$. При обрыве двух или трех фаз одновременно или при обратном следовании фаз реле срабатывает при напряжении 70...75 % $U_{ном}$. Коэффициент возврата реле не менее 0,9. Время срабатывания реле ЕЛ-10-1 не превышает 5 с. Реле не срабатывает при колебаниях симметричного напряжения в пределах $(0,85...1,10)U_{ном}$.

У реле постоянного тока в составе измерительного преобразователя вместо трансформатора тока ТА применяют *шунт* и специальную схему преобразования напряжения, снимаемого с шунта и подаваемого на компаратор.

6.3.3. Комбинированное полупроводниковое реле напряжения

Техническую реализацию комбинированного полупроводникового реле напряжения выполняют в соответствии со схемой на рис. 6.4. Вместо трансформатора тока применяется трансформатор напряжения или, возможно, делитель напряжения. С помощью опорного напряжения, подаваемого к компаратору, задается либо уставка напряжения отпускания для реле минимального напряжения, либо уставка напряжения срабатывания для реле максимального напряжения.

Для трехфазных электрических цепей применяют трехфазные реле минимального напряжения, с помощью которых можно осуществлять контроль трех линейных или трех фазных напряжений. Упрощенная функциональная схема одного из вариантов построения такого реле приведена на рис. 6.5 [10].

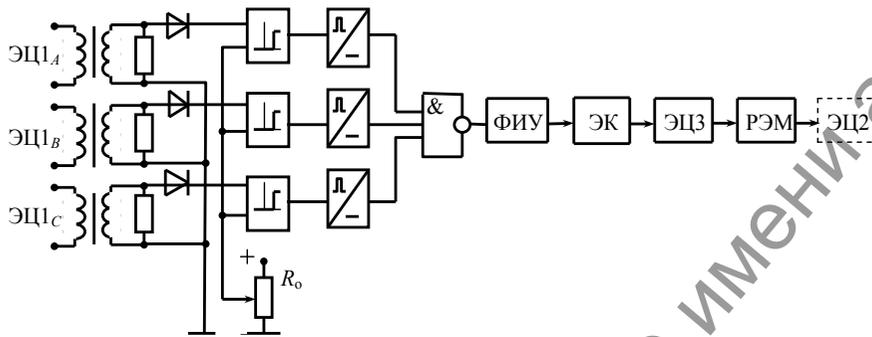


Рис. 6.5. Упрощенная функциональная схема трехфазного комбинированного полупроводникового реле напряжения

С помощью трехфазного реле минимального напряжения осуществляется защита трехфазных приемников электрической энергии при недопустимом снижении фазного или линейного напряжения в контролируемых цепях ЭЦ1А, ЭЦ1В, ЭЦ1С.

Тиристоры применяют в мощных ключах, поскольку они способны коммутировать цепи напряжением до 10 кВ с токами до 10 кА. Частота коммутации для наиболее мощных тиристорных ключей обычно не превышает 1 кГц. Современные образцы МСТ показывают способности коммутировать мощности выше 10 МВт при частоте 10 кГц.

4.5. Безопасная работа полупроводниковых ключей

4.5.1. Коммутационные процессы

Динамические режимы работы ключей – *коммутационные процессы* перехода из отключенного состояния во включенное состояние и наоборот так же, как и статические режимы характеризуются вольт-амперными характеристиками. Динамическую ВАХ ключа называют также *траекторией переключения* (коммутации). В практических приложениях она обычно представляется в координатах анодного напряжения u_S и анодного тока i_S , протекающего через прибор. Их определяют на интервале переходного процесса с учетом параметров коммутируемой цепи. Используются упрощенные математические модели, например (рис. 4.11): линейно спадающее напряжение на интервале времени включения и линейно спадающий ток на интервале времени отключения [4].

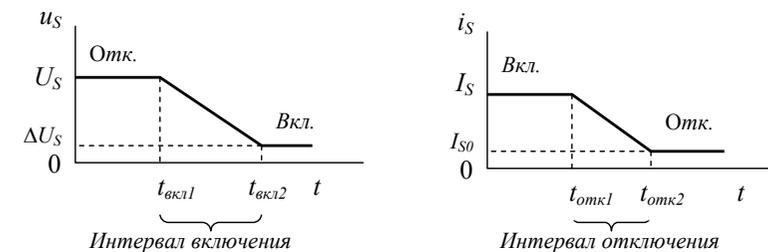


Рис. 4.11. Упрощенные модели коммутационных процессов включения (а) и отключения (б) ключа

Ток $i_{Sвкл}$ ключа при включении и падение напряжения $\Delta u_{Sотк}$ на нем при отключении зависят от параметров коммутируемой цепи и соответствующим

образом изменяются во времени на интервалах включения ($t_{вкл1}$, $t_{вкл2}$) и интервалах отключения ($t_{отк1}$, $t_{отк2}$).

4.5.2. Потери энергии в ключе

Мощность потерь (рассеяния) электроэнергии в ключе на цикле T «включить/отключить» может быть представлена двумя составляющими:

в статике:

$$P_c = \frac{1}{T} (I_S \Delta U_S \tau_{вкл} + I_{S0} U_S \tau_{отк}),$$

в динамике:

$$P_o = \frac{1}{2T} [(U_S - \Delta U_S) \int_{t_{вкл1}}^{t_{вкл2}} i_S dt + (I_S - I_{S0}) \int_{t_{отк1}}^{t_{отк2}} u_S dt],$$

где $\tau_{вкл}$ и $\tau_{отк}$ – соответственно продолжительность включенного и продолжительность отключенного состояния ключа на цикле T .

Сумма $P_c + P_o$ определяет среднее значение мощности потерь электроэнергии, расходуемой на нагрев ключа.

При малой частоте коммутации $f = 1/T$ динамическими потерями можно пренебречь, и среднее значение потерь мощности на нагрев будет определяться только соотношением длин интервалов $\tau_{вкл}$ «включено» и $\tau_{отк}$ «отключено».

При увеличении частоты f возрастают динамические потери в ключе по отношению к статическим потерям. Динамические потери становятся определяющими на высоких частотах коммутации.

4.5.3. Область безопасной работы ключа

Область допустимых значений электрических параметров ключа, при которых ключ работает без повреждений, называют *областью безопасной работы* (ОБР).

Общепринятым является графическое представление ОБР на плоскости в координатах тока i_S в ключе и падения напряжения u_S на ключе. Учитываются допустимые значения I_{Sdon} , U_{Sdon} параметров i_S , u_S , а также допустимое

Упрощенная функциональная схема комбинированного реле переменного тока показана на рис. 6.4 [10].

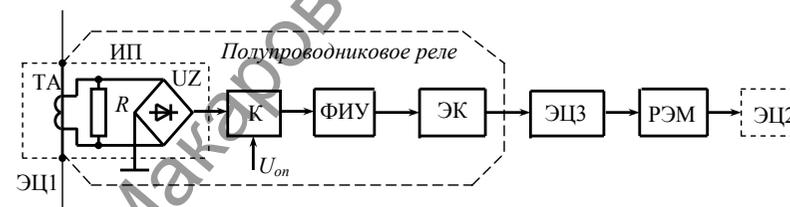


Рис. 6.4. Упрощенная функциональная схема комбинированного полупроводникового реле тока

Измерительный преобразователь (ИП) реле переменного тока имеет на входе трансформатор тока (ТА), нагруженный на малое по величине активное сопротивление R . Падение напряжения на этом сопротивлении пропорционально первичному току в контролируемой цепи (ЭЦ1). Напряжение, снимаемое с сопротивления R , выпрямляется выпрямителем (UZ) и сравнивается в *компараторе*²⁹ (К) с опорным напряжением $U_{он}$. В качестве компаратора обычно используют операционный усилитель (см. п. 4.8.5) с положительной обратной связью. Уставка тока срабатывания реле задается при помощи соответствующего выбора величины опорного напряжения.

Сигнал с компаратора передается на формирователь импульсов управления (ФИУ – см. п. 4.7) электронным ключом (ЭК). Когда ток в контролируемой цепи превысит значение уставки, заданной опорным напряжением, электронный ключ откроется по сигналу с компаратора и включит электромагнитное реле (РЭМ) по электрической цепи (ЭЦ3). РЭМ произведет коммутацию цепи (ЭЦ2) своими контактами.

Уменьшение тока в контролируемой цепи ЭЦ1 ниже определенного уставкой значения вызовет переход электронного ключа в непроводящее состояние, отключение реле РЭМ и коммутацию цепи ЭЦ2.

- ток утечки (включенное состояние) не более 10 мА;
- время переключения не более 10 мс;
- напряжение пробоя 2500 В в течение 1 минуты;
- сопротивление изоляции 500 Мом (при напряжении 500 В);
- температура окружающей среды $-30 \dots +75^\circ\text{C}$;
- относительная влажность до 95% (без образования конденсата);
- габаритные размеры 57,5x44x32 мм;
- способ монтажа – винтами на монтажную поверхность;
- масса не более 135 г.

Схема подключения реле GDHxxxxZD3 с управлением постоянным током показана на рис. 6.3.

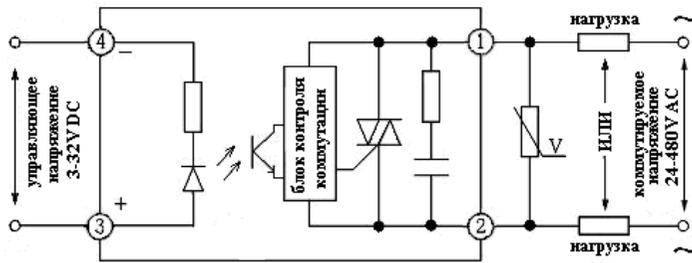


Рис. 6.3. Функциональная схема подключения твердотельного реле GDHxxxxZD3

В обозначении реле GDHxxxxZD3 последние три символа ZD3 означают, что это реле с управлением постоянным током (DC) при напряжении 3-32 В (включение реле). Реле коммутирует цепь переменного тока (AC) симистором при напряжении 24-480 В.

6.3.2. Комбинированное полупроводниковое реле тока

В комбинированном реле с помощью электронного чаще всего транзисторного ключа (см. п. 4.2.4, п. 4.3.1) производится включение и отключение выходного электромагнитного реле напряжения, которое конструктивно объединяют с полупроводниковым реле.

значение $P_{S\text{доп}}$ рассеиваемой мощности $p_s = i_s u_s$. Они определяют границы ОБР (рис. 4.12).

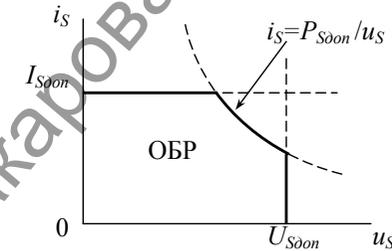


Рис. 4.12. Область безопасной работы ключа (ОБР)

В зависимости от типа ключевого прибора число и характер ограничений, определяющих ОБР, могут изменяться, могут появляться дополнительные границы ОБР. Кроме того, границы ОБР зависят от продолжительности нахождения ключа во включенном состоянии и от частоты коммутации.

Мгновенные значения i_s и u_s в любой момент времени во всех режимах работы ключа, включая процесс коммутации, не должны выходить за пределы ОБР по определению. Это значит, что статические и динамические ВАХ ключа должны находиться внутри ОБР. В противном случае надежная работа ключа не гарантируется.

Полное соответствие ВАХ и ОБР сложно обеспечить без принятия специальных мер защиты ключевого прибора. Поэтому в схему устройства коммутации включают дополнительные элементы, например конденсаторы или реакторы, с помощью которых достигается соответствие динамических ВАХ ключа и его ОБР. Совокупность таких дополнительных элементов, определенным образом подключенных в схему устройства коммутации, называют *цепью формирования траектории переключения* (ЦФТП) или *снаббером* (снабберной цепью). По существу снаббер является устройством защиты ключа в динамических режимах.

4.5.4. Обобщенные показатели полупроводниковых приборов, используемых в силовых электронных ключах

Обобщенные показатели полупроводниковых приборов, используемых в силовых электронных ключах, приведены в табл. 4.1²⁰.

Обобщенные показатели полупроводниковых приборов

Таблица 4.1

Вид прибора	Предельное коммутируемое напряжение, В	Предельный коммутируемый ток, А	Прямое падение напряжения, В	Частота коммутации, Гц	Ток утечки не более, мА	Вид управления
Тиристор (тир.)	10000	5000	< 1,9	< 400	3	ток
Симистор	800	40	< 1,4	< 400	1	ток
Запираемый тир.	4500	3000	< 4,0	< 2000	30	ток
МОП-транзистор	800	50	< 3,2	< 10 ⁵	0,3	напр.
МОПБТ	3500	1200	< 3,0	< 5 · 10 ⁴	1	напр.
Запираемый тир. с МОП-управлением	100	50	< 1,5	< 2,5 · 10 ⁴	1	напр.

4.6. Сравнительная характеристика силовых ключей

4.6.1. Показатели функционирования силовых ключей

Коммутирующие контакты обладают рядом преимуществ по сравнению с электронными ключами. Они в большей степени приближаются к «идеальному» ключу по таким показателям как устойчивость к токам перегрузки, короткого замыкания и к воздействию перенапряжения; тепловые потери на замкнутом контакте; остаточное напряжение (падение напряжения на замкнутом контакте); гальваническая развязка силовых и вспомогательных цепей («сухие» контакты). Существенные недостатки: возникновение электрической дуги и вытекающие из этого отрицательные последствия (они рассмотрены в разделе 2), а также низкая частота коммутации.

Количественные оценки некоторых показателей, удобных для сравнения силовых ключей, приведены в табл. 4.2.

Реле общего назначения являются альтернативой электромеханическим и полупроводниковым реле на основе тиристоров.

Оно состоит из светодиода, оптически связанного с матрицей фотодиодов, которые управляют выходным коммутирующим элементом – парой МОП-транзисторов, соединенных истоками. Схема с МОП-транзисторами позволяет получить переключатель постоянного или переменного тока.

Применяется для коммутации цепей постоянного и переменного тока систем автоматического управления и импульсных источников питания.

Реверсивные реле обеспечивают включение, отключение, блокировку и реверсирование асинхронных электродвигателей.

Реле имеют оптронную развязку цепей управления от силовых цепей, а также вход для сигнала блокировки включения реле.

Преимуществами твердотельных реле являются:

- длительный срок службы;
- отсутствие дребезга контактов и искрения при переключениях;
- низкий уровень электромагнитных помех;
- отсутствие акустического шума;
- низкое энергопотребление;
- высокое быстродействие.

Далее в качестве примера приведены некоторые технические характеристики однофазного твердотельного реле типа GDH, рассчитанного на номинальный коммутируемый переменный ток 10 А с коммутацией цепи при переходе тока через ноль:

- коммутируемое напряжение 24-480 В;
- напряжение управления 3-32 В постоянного тока или 70-280 В переменного тока;
- потребляемый ток по цепи управления постоянным током 3-25 мА, по цепи управления переменным током не более 12 мА;
- напряжение вкл/выкл. по цепи постоянного тока 3 В / 1 В, по цепи переменного тока 70 В / 10 В;

6.3. Электронные и комбинированные реле

6.3.1. Полупроводниковые твердотельные реле

Твердотельное реле представляет собой полупроводниковый прибор, предназначенный для бесконтактной коммутации цепей постоянного или переменного тока по сигналу управления. Это новый тип бесконтактных реле, выполненных по современным мировым стандартам и технологиям. Они с успехом используются для замены традиционных электромагнитных реле, а также для замены контакторов и магнитных пускателей (см. п. 5.4.3).

Твердотельные реле делят на четыре категории по функциональному назначению и роду тока²⁸: реле переменного тока; реле постоянного тока, реле общего назначения, реверсивные реле.

Реле переменного тока с оптосимисторами является альтернативой электромагнитного реле.

В состав реле входят (см. п. 5.4.3, рис. 5.9) светодиод, оптически связанный с оптосимистором, который управляет мощным коммутирующим элементом – симистором или двумя тиристорами, включенными встречно-параллельно. В зависимости от исполнения реле может содержать встроенную схему контроля перехода тока через «ноль» (реле типа ТМ) или не содержать такую схему (реле типа ТС).

Применяется для коммутации цепей переменного тока, в том числе цепей питания электродвигателей.

Реле постоянного тока с МОП-транзисторами является альтернативой электромагнитного реле в цепи постоянного тока.

Состоит из светодиода, который оптически связан с фототранзистором (реле типа 5П40.10П) или с фотоэлектрической матрицей диодов (реле типа 5П20.10П), которая управляет выходным элементом – мощным МОП-транзистором.

Применяется для коммутации цепей постоянного тока, в том числе силовых цепей электродвигателей постоянного тока, импульсных источников питания, быстродействующих систем защиты.

Показатели функционирования силовых ключей

Таблица 4.2

Показатель	«Идеальный» ключ	Коммутирующий контакт	Электронный ключ
Быстродействие, мс	$\tau = 0$	$\tau > 10$	$\tau < 1$
Ресурс работы, число циклов	$N = \infty$	$N < 10^7$	$N = \infty$
Наличие электрической дуги	нет	есть	нет
Возникновение перенапряжений и сверхтоков	нет	почти нет	есть
Тепловые потери на ключе	нет	почти нет	есть
Остаточное напряжение на ключе, В	$\Delta U = 0$	$\Delta U \approx 0$	$\Delta U \leq 3$
Гальваническая развязка между цепями, Ом	$R_{\text{изоляция}} = \infty$	$R_{\text{изоляция}} \rightarrow \infty$	$R_{\text{изоляция}} < 10^9$
Затраты мощности на включение и удержание во включенном состоянии, Вт	$P = 0$	$P > 10$	$P \leq 1$

В тех применениях ключей, где требуется большая частота коммутации электрической цепи, инерционность коммутирующих контактов ограничивает, либо делает невозможным их применение. К тому же износ массы контактного материала зависит от количества циклов «включить-выключить» и от силы коммутируемого тока. Например, такой износ у сильноточных контакторов и пускателей оценивают по пропорциональной зависимости от количества циклов «включить-выключить» и по квадратичной зависимости от силы отключаемого тока. Поэтому при больших значениях отключаемого тока и количестве циклов появляется необходимость в частой замене коммутационного контактного аппарата.

Существенный недостаток электронных ключей – это слабая устойчивость к перенапряжениям и сверхтокам. Поэтому для обеспечения их работоспособности приходится применять дополнительные элементы и узлы, например, снабберные цепи, что приводит к усложнению конструкции и удорожанию аппарата.

4.6.2. Сопоставление свойств коммутирующих контактов и электронных ключей

Свойства коммутирующих контактов и электронных ключей

Таблица 4.3

Особенность, свойство	Коммутирующие контакты	Электронные ключи
1	2	3
Возможность плавного изменения тока в управляемой цепи (усилительный режим) с переходом в скачкообразное его изменение (коммутационный режим)	Нет возможности плавного управления, работают только в коммутационном режиме	Работают надежно в любом режиме
Возможность непосредственного использования слабых электрических сигналов для управления ключом	Энергопотребление приводов контактных систем сравнительно велико ($P > 10$ Вт)	Легко осуществляется управление слабыми электрическими сигналами
Тепловые потери и нагрев в ключе при токах нагрузки	Потери и нагрев небольшие, т.к. падение напряжения на ключе при включенном состоянии обычно составляет единицы милливольт	Потери высокие, т.к. падение напряжения на ключе при включенном состоянии достигает одного и более вольт
Устойчивость к перенапряжениям	Выдерживают значительные перенапряжения; пробивное напряжение – до десятков киловольт	Требуется специальная защита от перенапряжений; допустимые обратные напряжения обычно составляют сотни вольт
Устойчивость к токовым перегрузкам	Допустима перегрузка сверхтоком примерно в 700 раз большим по отношению к номинальному току при времени его действия до 0,01 с	Необходима специальная защита от сверхтоков; допустимая перегрузка может достигать лишь примерно 30-кратного значения номинального тока при времени действия до 0,01 с
Стойкость к ударным нагрузкам и вибрации	Подвержены влиянию ударных нагрузок и вибрации	Практически не подвержены влиянию ударных нагрузок и вибрации за исключением элементов подсоединения.
Надежность	Надежность высокая, но зависит от качества обслуживания	Надежность высокая и почти не зависит от обслуживания
Звуковые эффекты	Шум при работе, возможно гудение электромагнита	Отсутствуют шумы

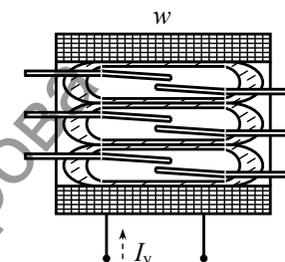


Рис. 6.2. Герконовое реле с тремя коммутирующими контактами

Герконовые реле имеют высокое быстродействие (время срабатывания и отпускания до 3 мс), что позволяет использовать герконы при частоте коммутаций до 1000 в секунду. Герконы выдерживают до 10^8 и более циклов коммутаций. Возможность работы от кратковременных импульсов I_y (десятки микросекунд) и малая энергия, потребляемая при таком управлении, позволяют широко использовать герконы как выходные (усилительные) элементы в серии полупроводниковых элементов «Логика И».

Основной недостаток герконовых реле – малая допустимая токовая нагрузка (I) на контакты (максимальная нагрузка у герсиконов, например, $I_{ном}=6,3$ А у герсикона типа КМГ-12). Другой существенный недостаток – «дребезг» контактов при срабатывании реле, т.е. вибрация контактных пластин, вызванная их упругостью (продолжительность вибрации может достигать половины времени срабатывания).

Обычные герконы типа КЭМ, МК, МУК и др., применяемые в реле, изготовляют на ток до 3 А напряжением до 300 В. Время срабатывания от 3 до 10 мс. Ресурс коммутационных циклов составляет $10^7 \dots 10^9$.

Герконы применяют в реле напряжения, например, РЭС42, РЭС43, РЭС44, в реле тока и др. Реле промежуточные герконовые серии РПГ применяются в схемах автоматики и управления с источниками питания (в зависимости от марки реле) на напряжения 12, 15, 24, 48, 60, 110 и 220 В постоянного тока или выпрямленного трехфазного тока. Реле пригодны для работы в системах управления на базе микропроцессорной техники.

Разработаны конструкции герконовых реле с памятью (см. п. 1.6.6).

несколько ниже этого значения. Когда напряжение упадет до значения уставки реле на отпускание, оно отключится и тем самым подаст команду²⁹ (в цепь ЭЦ2 на рис. 6.1) на отключение нагрузки (например, электродвигателя).

Реле максимального напряжения срабатывает и отключает контролируемое устройство, если напряжение в цепи (ЭЦ1 на рис. 6.1) превысит допустимое значение. Уставка на срабатывание (включение) реле несколько выше предельно допустимого значения напряжения, и пока напряжение в цепи не превысит это значение, реле остается в отключенном состоянии. Если же напряжение в цепи достигнет значения уставки реле на срабатывание, то реле максимального напряжения включится и подаст команду (в цепь ЭЦ2 на рис. 6.1) на отключение нагрузки (например, двигателя в электроприводе).

Настройка реле производится путем изменения натяжения возвратной пружины механической передачи реле (см. п. 3.2.2, п. 3.3). Для этого предусматривают специальные органы настройки, например, винт, вращение которого приводит к дополнительному сжатию или растяжению возвратной пружины.

Коммутирующие контакты максимальных и минимальных реле в электроприводе обычно включают в цепи катушек контакторов, с помощью которых отключают электродвигатели от питания при возникновении ненормальных режимов работы.

6.2.5. Герконовые реле

Основой герконового реле служит магнитоуправляемый контакт – геркон (см. п. 3.8). На рис. 6.2 в качестве примера приведено герконовое реле с тремя коммутирующими контактами.

Реле срабатывает и контакты оказываются замкнутыми, когда по обмотке катушки (с количеством витков w), охватывающей три геркона, протекает ток управления $I_y \geq I_{cp}$ превосходящий по величине ток срабатывания I_{cp} .

Помимо герконовых реле с замыкающими контактами существуют герконовые реле с размыкающими контактами (в конструкцию добавлен постоянный магнит). Существуют также поляризованные герконовые реле.

Продолжение табл. 4.3

1	2	3
Восприимчивость к искажениям сигнала управления	Практически невосприимчивы к искажениям сигнала управления приводом контактной системы	Возможны ложные срабатывания, в том числе от случайных импульсных помех малой продолжительности
Размеры аппарата	Компактные аппараты	Размеры аппарата значительно больше, чем контактного аппарата (при одинаковой коммутационной способности)
Стоимость аппарата	Стоимость контактных аппаратов относительно невысокая	Стоимость бесконтактных аппаратов значительно выше в сравнении с контактными аппаратами; стоимость снижается благодаря совершенствованию технологии производства и увеличению масштабов выпуска

4.7. Формирователи импульсов управления полупроводниковыми ключами

4.7.1. ФИУ биполярного транзистора

ФИУ биполярного транзистора вырабатывает импульсы управления необходимой мощности и формы, чтобы выполнялись следующие условия:

снижение времени задержки на включение за счет повышенной амплитуды тока базы при включении;

уменьшение накопленного заряда в базе после включения путем снижения тока базы;

ускорение выключения транзистора за счет подачи на базу импульса обратного тока;

снижение тока утечки транзистора после его выключения за счет приложения обратного напряжения база-эмиттер.

Наилучшие формы тока базы i_B и напряжения база-эмиттер $u_{БЭ}$, удовлетворяющие перечисленным условиям, показаны на рис. 4.13.

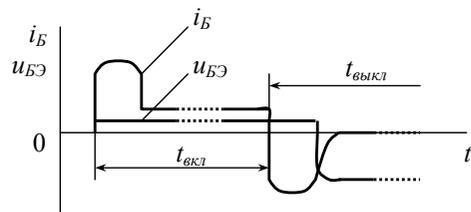


Рис. 4.13. Типовые формы сигналов управления ключевым режимом работы биполярного транзистора

В аппаратах применяют различные по сложности ФИУ, обеспечивающие в той или иной степени приближение импульсов управления к форме, показанной на рис. 4.13. Для уменьшения потребляемой мощности применяют схемы ФИУ с парными (комплемментарными) транзисторами, работающими попеременно при включении и выключении. Один из вариантов схемы ФИУ показан на рис. 4.14.

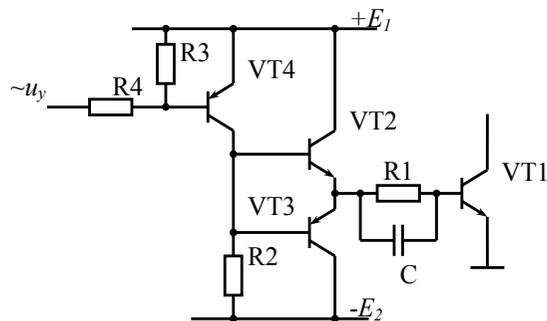


Рис. 4.14. Формирователь импульсов управления биполярным транзистором

Если импульс управления u_y не подается ($u_y=0$), то транзистор VT4 открыт. Открыт также транзистор VT2 током коллектора VT4. Силовой транзистор VT1 включен усиленным током эмиттера транзистора VT2. Транзистор VT3 заперт, т.к. потенциал его базы положительный по отношению к потенциалу на эмиттере. Конденсатор C заряжен током базы силового транзистора VT1.

Время срабатывания реле (τ_{cp}) – промежуток времени с момента подачи напряжения срабатывания на катушку реле до момента переключения его контактов.

Время отпущения реле (τ_{om}) – промежуток времени с момента снятия напряжения с катушки до момента возвращения контактов в исходное положение.

Уставка реле – величина напряжения или тока, на которую настроено реле и при которой оно срабатывает или отпускает.

Для повышения быстродействия реле применяют специальные схемы подключения обмотки катушки реле к электрической цепи (см. п. 3.7.1). Снижение быстродействия реле может быть осуществлено, если это требуется, также с помощью схемных решений (см. п. 3.7.2).

6.2.4. Настройка реле на срабатывание или на отпущение

Реле максимального тока настраивают по току срабатывания ($x_{cp}=I_{cp}$). Например, катушки реле максимального тока серии РЭВ выполняют на номинальные токи от 2,5 до 600 А. Уставка по току срабатывания ограничивается пределами $I_{cp}=(1,1\dots 7)I_{ном,р}$ относительно номинального тока катушки реле $I_{ном,р}$. Коэффициент возврата $k_B=0,2\dots 0,4$. Реле выполняются с самовозвратом и с ручным возвратом. В последнем случае используют механическую передачу с защелкой (см. п. 3.2.3).

Реле минимального напряжения настраивают на напряжение отпущения ($x_{om}=U_{om}$). Например, реле минимального напряжения серии РЭМ в зависимости от исполнения рассчитаны на номинальные напряжения втягивающей катушки 24, 55, 110, 220 В постоянного тока. Напряжение отпущения у реле напряжения составляет 15..45 % от номинального значения напряжения катушки. Коэффициент возврата от 0,3 до 0,8.

Реле минимального напряжения остается включенным, пока контролируемое им напряжение (в цепи ЭЦ1 на рис. 6.1) не окажется ниже минимального допустимого значения напряжения. Уставка реле минимального напряжения

сти работы реле, его динамические характеристики и характеристика управления определяются свойствами электромагнитного привода постоянного тока (см. п. 3.4, п. 3.5).

Для реле, подключаемого к электрической цепи управления переменного тока, применяют шихтованные магнитопроводы, диаметр катушки увеличивают, а длину уменьшают с целью улучшения отвода тепла от катушки и сердечника (см. п. 3.6.1). Особенности работы реле, его динамические характеристики и характеристика управления определяются свойствами электромагнитного привода переменного тока (см. п. 3.6).

6.2.3. Основные параметры электромагнитных реле

Электромагнитные реле характеризуются следующими основными параметрами.

Напряжение (ток) срабатывания реле ($x_{ср}$) – наименьшее значение напряжения на клеммах катушки электромагнитного механизма реле (или наименьшее значение тока в ней), при котором якорь надежно притягивается к сердечнику, а замыкающие контакты переходят из разомкнутого состояния в замкнутое. В паспорте реле напряжения указывается номинальное напряжение, на которое рассчитано включение катушки электромагнитного механизма реле, несколько превышающее напряжение срабатывания. Этим обеспечивается надежность срабатывания реле.

Напряжение (ток) отпускания реле ($x_{от}$) – наибольшее напряжение на клеммах катушки электромагнитного механизма реле (или наибольший ток в ней), при котором тяговое усилие, действующее на якорь электромагнитного механизма, уменьшается до значения, необходимого для надежного отпадания якоря от сердечника, а замыкающие контакты переходят из замкнутого состояния в разомкнутое состояние.

Коэффициент возврата реле – отношение напряжения (тока) отпускания к напряжению (току) срабатывания.

В момент поступления импульса $u_y > 0$ транзисторы VT4 и VT2 закрываются, а транзистор VT3 включается напряжением конденсатора C. Разряжаясь, конденсатор создает запирающий ток базы силового транзистора VT1.

4.7.2. ФИУ полевого транзистора

ФИУ полевого транзистора большой мощности реализуют по типовой схеме двухтактного эмиттерного повторителя на парных биполярных транзисторах (рис. 4.15).

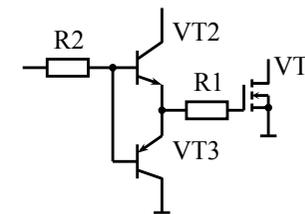


Рис. 4.15. ФИУ полевого транзистора

В этой схеме учитываются особенности полевого транзистора:

при постоянном напряжении затвор – исток через затвор протекает незначительный порядка нескольких наноампер ток;

на процессы включения и выключения транзистора значительное влияние оказывает его входная емкость, скорость перезаряда которой определяет время включения и выключения транзистора.

Биполярные транзисторы в схеме на рис. 4.15 исполняют роль источников тока, ускоряющих перезаряд входной емкости полевого транзистора.

4.7.3. ФИУ тиристора

ФИУ тиристора вырабатывает и подает на управляющий электрод тиристора импульсы на включение тиристора. Импульсы подаются тогда, когда напряжение анод-катод тиристора положительно. В противном случае включение тиристора не произойдет.

Для ускорения включения тиристора при условии, что скорость нарастания анодного тока должна быть ограничена определенной величиной, импульс тока на включение должен иметь крутой фронт и повышенную амплитуду в начальный момент (рис. 4.16а).

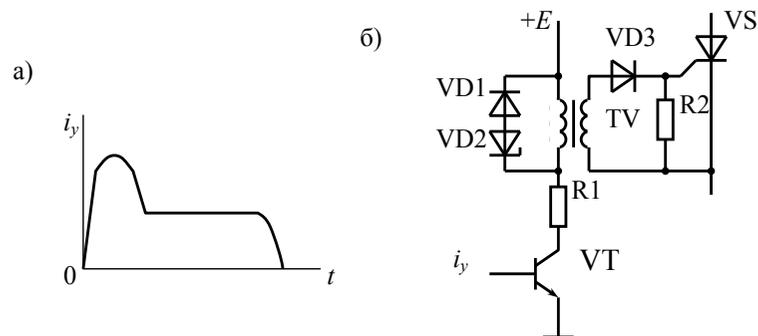


Рис. 4.16. Идеализированная форма импульса тока включения тиристора (а) и ФИУ тиристора (б)

Включающий импульс тока i_y должен иметь необходимую длительность для гарантированного включения тиристора.

Типовая схема ФИУ с импульсным трансформатором TV приведена на рис. 4.16б для однооперационного тиристора VS. Диод VD1 и стабилитрон VD2 обеспечивают перемагничивание трансформатора и предотвращают перенапряжение на транзисторе VT. Резистор R1 ограничивает ток коллектора транзистора VT и одновременно ток i_y управления тиристором. Резистор R2 защищает тиристор от включения помехами. Диод VD3 предотвращает появление отрицательного напряжения на управляющем электроде тиристора.

Схема ФИУ для двухоперационного тиристора значительно сложнее схемы приведенной на рис. 4.16б. По топологии она близка к схемам ФИУ биполярного транзистора.

Входной сигнал вызывает появление электромагнитной силы тяги в электромагнитном механизме ЭММ (см. п. 3.3.4). Под действием силы тяги якорь ЭММ перемещается, и это перемещение передается коммутирующему контакту КК (см. п. 2.2) с помощью механической передачи с возвратной пружиной (см. п. 3.2.2).

Контактная система электромагнитных реле может содержать от одного до 12 коммутирующих контактов (КК), рассчитанных на длительные постоянные или переменные токи до 16 А у некоторых реле.

На рис. 6.1 б показаны условные обозначения электромагнитных приводов (катушек) реле тока КА и реле напряжения КV.

6.2.2. Особенности электромагнитных реле

Реле тока и реле напряжения имеют одинаковую структуру (рис. 6.1а), но функциональные части реле имеют конструктивные отличия. Различаются в исполнении электромагнитные (втягивающие) катушки реле.

У реле тока обмотка катушки выполнена толстым проводом и имеет небольшое количество витков, что обеспечивает малое сопротивление току, протекающему по обмотке. Реле тока применяют для контроля силы тока в электрической цепи (ЭЦ1) и передачи информации о контролируемой величине типа «больше» или «меньше» в другую цепь (ЭЦ2) с помощью коммутирующего контакта (КК).

Сопротивление обмотка катушки реле напряжения большое. Оно создается большим количеством витков тонкого провода. Обмотку обычно включают на полное напряжение сети. Реле напряжения применяют для контроля уровня напряжения в электрической цепи и передачи информации о контролируемой величине в другую цепь.

Различия в конструкциях электромагнитных механизмов реле обусловлены тем, к какой электрической цепи должна быть подключена катушка реле. Если это цепь постоянного тока, то магнитопровод выполняют цельнометаллическим. Катушка удлиненная, относительно небольшого диаметра. Особенно

нированном реле используется в качестве выходного устройства. Коммутация электрических цепей осуществляется контактами электромагнитного реле.

В электроприводе с помощью реле реализуют определенные программы управления электродвигателем, например, пуск двигателя в функции времени, пуск в функции скорости и др. Реле используются также для защиты двигателей и других элементов электроприводов при возникновении ненормальных режимов работы.

Реле напряжения, так называемые *промежуточные реле*, применяют для размножения сигналов управления, то есть для увеличения числа коммутирующих контактов, если количество контактов какого-либо реле или вспомогательных контактов контактора в схеме управления недостаточно или допустимый ток на контактах слишком мал. При необходимости увеличения времени срабатывания или времени отпускания реле более 250 мс применяют реле времени.

6.2. Электромагнитные реле тока и реле напряжения

6.2.1. Структурная схема электромагнитного реле

Электромагнитное реле (РЭМ) является элементом канала связи электрических цепей, например двух цепей ЭЦ1 и ЭЦ2. Оно может быть представлено структурной схемой, как показано на рис. 6.1а.

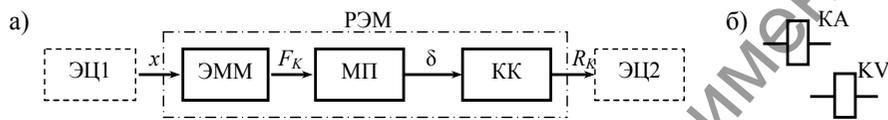


Рис. 6.1. Структурная схема электромагнитного реле (а) и изображение электромагнитных приводов (катушек) реле тока КА и реле напряжения KV на электрических схемах (б)

Входной сигнал управления электромагнитным реле поступает из электрической цепи ЭЦ1 на обмотку включающей катушки электромагнитного привода (см. п. 3.3.1, п. 3.3.2). Входная переменная x у реле тока – электрический ток, у реле напряжения – электрическое напряжение.

4.8. Интегрированные функциональные элементы и устройства

4.8.1. Интегральные схемы

В целях повышения КПД, снижения энергопотребления, уменьшения массы и габаритов аппарата применяют *интегральные схемы*²¹ (ИС) в составе устройства (системы) управления электронного аппарата. С их помощью осуществляется выработка и преобразование так называемых сигналов информационного уровня, напряжением, как правило, до 10 В.

По функциональному признаку ИС принято разделять на цифровые и аналоговые ИМС.

Основной особенностью цифровых ИС является то, что обрабатываемые ими сигналы имеют вид импульсов с двумя четко выраженными уровнями: высокий уровень 5...10 В соответствует логической 1, низкий уровень 0...1 В соответствует логическому 0. Цифровые ИС применяются для обработки цифровых сигналов, представляющих собой коды зашифрованной информации.

Наиболее простыми и распространенными цифровыми ИМС являются логические элементы. Далее по мере возрастания сложности выполняемых операций выделяют:

цифровой узел (логическая схема), который представляет собой несколько логических элементов, выполняющих в совокупности определенную функцию;

цифровое устройство в виде комплекса узлов, выполняющее на основе логических, вычислительных и других операций сложные функции управления.

Аналоговые ИС предназначены для обработки аналоговых (непрерывных во времени) сигналов. Аналоговые сигналы несут информацию, которая соответствует изменениям какого-либо параметра (амплитуды, частоты и т.д.) напряжения или тока, причем эти изменения являются непрерывными во времени. В настоящее время из аналоговых ИС широкое применение получили операционные усилители²² (ОУ).

4.8.2. Основные логические элементы

Как правило, сложные цифровые устройства основаны на соединении по определенной схеме логических элементов НЕ, И, ИЛИ и комбинаций типа И-НЕ, ИЛИ-НЕ, И-ИЛИ-НЕ, И-ИЛИ и др.

Зависимость выходной логической переменной Y_i устройства от входных переменных X_j ($j=1, 2, \dots, m$) характеризуется логической функцией Булевой алгебры²³

$$Y_i = f_i(X_1, X_2, \dots, X_m), \quad i=1, 2, \dots, n.$$

Наиболее полная и распространенная форма представления логической функции – это таблица истинности. В табл. 4.4 представлены некоторые логические функции двух переменных X_1 и X_2 .

Основными операциями, выполняемыми с логическими переменными, являются дизъюнкция (ИЛИ), конъюнкция (И), инверсия (НЕ). На основании этих операций может быть построена любая логическая функция.

Таблица истинности типовых функций двух переменных

Таблица 4.4.

Номер набора	Набор переменных		Y_I ИЛИ	Y_{II} И	Y_{III} ИЛИ-НЕ	Y_{IV} И-НЕ	Y_V ~	Y_{VI} ⊕
	X_1	X_2						
1	0	0	0	0	1	1	1	0
2	1	0	1	0	0	1	0	1
3	0	1	1	0	0	1	0	1
4	1	1	1	1	0	0	1	0

Интегральные схемы, предназначенные для передачи и обработки сигналов в логической цифровой форме – *логических сигналов*, называются логическими интегральными элементами. Условные обозначения логических элементов показаны на рис. 4.17.

коэффициент k_p передачи энергии по электрической цепи (см. п. 1.5) практически от 0 до 1, например, при срабатывании реле и от 1 до 0 при отпуске реле;

- реле *срабатывает*, изменяя выходную переменную (сопротивление в цепи), когда при положительной производной $dx(t)/dt > 0$ значение входной переменной $x(t) > 0$ достигает определенной величины x_{cp} , называемой *параметром срабатывания*;

- реле *отпускает* (после срабатывания), когда при отрицательной производной $dx(t)/dt < 0$ значение входной переменной $x(t) > 0$ достигает величины x_{om} , называемой *параметром отпускания* ($x_{om} \leq x_{cp}$).

По времени срабатывания τ_{cp} или времени отпускания τ_{om} все реле тока и напряжения подразделяют на быстродействующие ($\tau_{cp} < 50$ мс) и нормальные ($\tau_{cp} = 50 \dots 250$ мс). Реле с временем срабатывания более 250 мс называют *реле времени*.

Среди электромеханических реле получили наибольшее распространение *электромагнитные реле*. В состав таких реле кроме коммутирующих контактов входит электромагнитный привод (см. п. 3.3). В соответствии с видом привода (см. п. 3.4, п. 3.5, п. 3.6) выделяют реле постоянного тока, поляризованные реле и реле переменного тока. За первой и третьей группами реле закрепилось название «нейтральные реле». Их работа не зависит от направления тока в обмотке катушки электромагнитного привода. Работа поляризованных реле зависит от направления тока в витках катушки.

В контактных системах электромеханических реле не предусматриваются дугогасительные устройства.

В отличие от электромеханических реле, статические реле не имеют подвижных частей (см. п. 1.9) и коммутирующих контактов. Наибольшее распространение среди статических реле получили *электронные твердотельные реле* постоянного тока, переменного тока, реле общего назначения.

В некоторых реле конструктивно и функционально совмещены электронные компоненты, например, цифровой системы управления (см. п. 4.1) с малогабаритными электромагнитными реле. Электромагнитное реле в таком *комби-*

РЕЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ УПРАВЛЕНИЯ

6.1. Общие сведения

Реле – это электромеханические или статические аппараты (см. п. 1.9), которые предназначены для коммутации электрических цепей в схемах автоматизированного управления технологическими установками, электрическими сетями и системами [1]. Под реле понимают такой электроаппарат, в котором при плавном изменении управляющего (входного) параметра до определенной наперед заданной величины происходит скачкообразное изменение управляемого (выходного) параметра [10].

Для конкретизации определения реле как электроаппарата (см. п. 1.1) будем исходить из следующих положений:

- объектом управления реле (см. п. 1.1.3) является электрическая цепь или несколько электрических цепей, причем эти цепи слаботочные, они относятся к электрическим цепям управления²⁸;
- электромеханическое реле воздействует на электрическую цепь путем коммутации электрической цепи своими коммутирующим контактом (см. п. 2.1, п. 2.2), статическое реле производит коммутацию электрической цепи с помощью электронного ключа (см. п. 4.3, п. 4.4); коммутирующий контакт или электронный ключ реле называют *коммутирующим элементом*;
- управляющее воздействие x (см. п. 1.1.2) на входе реле может быть электрическим, механическим, оптическим (электромагнитные волны) или иной природы; входная переменная $x(t)$ определяет, как правило, название реле, например, реле напряжения, реле скорости, фотореле и т.п.;
- выходная переменная реле – электрическое сопротивление, создаваемое коммутирующим элементом в электрической цепи (см. п. 1.5.1);
- характеристика управления реле (см. 1.6.3) существенно нелинейная (см. п. 1.6.2); это аппарат прерывистого управления, который изменяет коэф-

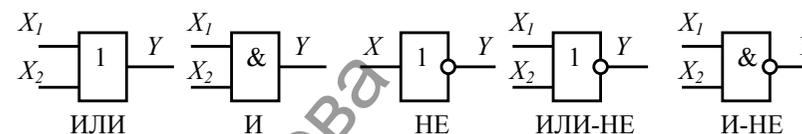


Рис. 4.17. Условные обозначения типовых логических элементов

Из логических элементов могут быть образованы различные в функциональном отношении логические схемы (ЛС). Среди них в зависимости от принципа обработки сигналов различают комбинационные и последовательные ЛС. В комбинационной ЛС сигнал на выходе зависит от сигналов, действующих на входах. Последовательная ЛС имеет память, сигнал на ее выходе зависит не только от сигналов на входах, но и от предшествующего состояния схемы (см. п. 1.6.4, п. 1.6.5).

4.8.3. Логическая схема с памятью

Одним из важнейших узлов логических элементов, который реализует функцию «Память», является триггер. Его выходная переменная зависит не только от комбинации значений двух входных переменных X_1 и X_2 , но и от предшествующего состояния триггера. Для того чтобы запомнить кратковременный входной сигнал $X_1=1$ или $X_2=1$ используется обратная связь. Выходная переменная Y подается на вход триггера. Если принять, что по сигналу $X_1=1$ триггер должен устанавливать на выходе $Y=1$, а по сигналу $X_2=1$ устанавливать $Y=0$, то оператор триггера можно представить логическим выражением

$$Y = (X_1 + Y) \cdot \bar{X}_2.$$

Одновременная подача сигналов $X_1=1$ и $X_2=1$ в рассматриваемом случае теряет смысл и исключается.

Схема реализации триггера в соответствии с приведенным логическим выражением показана на рис. 4.18а. Условное графическое изображение триггера, реализованного на интегральной схеме, приведено на рис. 4.18б.

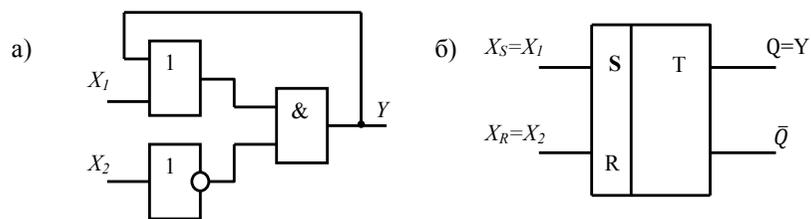


Рис. 4.18. Реализация триггера на элементах НЕ, ИЛИ, И (а) и условное обозначение RS-триггера (б)

По способу переключения и по закону функционирования триггеры можно разделить на следующие группы: RS-триггеры с раздельной установкой 0 и 1; D-триггеры задержки; универсальные JK-триггеры; T-триггеры счетные. Название триггеров определяется первыми буквами слов на английском языке: S (set – *установить*); R (reset – *выключить*); T (toggle – *релаксатор*); J (jerk – *резко включить*); K (kill – *резко выключить*); D (delay – *задержка*). Выходной сигнал триггера принято обозначать буквой Q. Приведенный на рис. 4.18 триггер относится к группе RS-триггеров. Такие триггеры, как и триггеры других типов, могут быть реализованы на различных логических элементах и поэтому могут быть представлены различными логическими схемами. Промышленность выпускает интегральные схемы триггеров.

4.8.4. Цифровые устройства

На основе логических схем и триггеров реализуют различные функциональные устройства цифровых систем управления (регистры, счетчики, дешифраторы, шифраторы, мультиплексоры, сумматоры, запоминающие устройства и др.). На их основе может быть синтезировано унифицированное устройство с широким набором логических и вычислительных функций, воспроизведение которых осуществляется с помощью заранее составленной программы управляющих воздействий. Такое программно-управляемое унифицированное цифровое устройство, выполненное на большой интегральной схеме, называют *микромикропроцессором* (МП). Он предназначен для обработки цифровой информа-

5.6.3. Характеристика управления усилителя

При уменьшении управляющего напряжения u_y время пребывания дросселей в насыщенном состоянии уменьшается, уменьшается ширина (по основанию) импульсов рабочего тока. Если изменить полярность управляющего сигнала, то изменится только порядок насыщения дросселей. Характер изменения во времени рабочего тока останется прежним. Не изменится ни величина, ни фаза рабочего тока. Ток в нагрузке переменный, но не синусоидальный и

$$w_p I_p = w_y I_y \quad (5.7)$$

где I_p – среднее значение тока, определяемое по формуле (5.2); I_y – среднее значение тока управления.

Равенство (5.7) называют основным соотношением магнитного усилителя. Ему соответствует характеристика управления (см. п. 1.6.3) магнитного усилителя, аналогичная по форме характеристике дросселя, показанной на рис. 5.20. Поскольку реальная кривая намагничивания стали сердечника все же отличается от «идеальной кривой», показанной на рис. 5.18, характеристика управления магнитного усилителя приобретает вид, как на рис. 5.23.

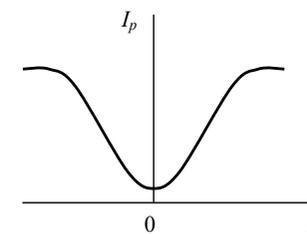


Рис. 5.23. Характеристика управления магнитного усилителя

Динамические свойства магнитного усилителя зависят от сопротивления цепи управления переменному току. Если это сопротивление велико, то рабочая обмотка практически не оказывает влияния на входной сигнал. Если же сопротивление мало, то наводимые в обмотках ЭДС приводят к запаздыванию рабочего тока i_p относительно входного сигнала u_y при изменении его уровня.

В насыщенном дросселе $\Phi = \Phi_{кр} = \text{const}$. Индуктивность его части рабочей обмотки равна нулю. Следовательно, равно нулю реактивное сопротивление этой части рабочей обмотки. Ненасыщенному состоянию другого дросселя соответствует одно из равенств (5.4) или (5.5). В этом случае при $i_p \neq 0$ рабочий ток $i_p \neq 0$, и на части рабочей обмотки этого дросселя падает напряжение

$$u_p = u - i_p R_H, \quad (5.6)$$

где u – мгновенное значение переменного напряжения U . Величина u_p зависит от сопротивления цепи обмотки управления. Это объясняется тем, что когда один дроссель насыщен, а другой нет, переменная ЭДС, наведенная в обмотке управления изменяющимся магнитным потоком ненасыщенной части рабочей обмотки, не будет компенсироваться, так как магнитный поток в насыщенной части рабочей обмотки постоянен и не наводит ЭДС в обмотке управления. В результате в обмотке управления будет наводиться переменный ток. Так как для ненасыщенного дросселя должно выполняться одно из равенств (5.4) или (5.5) (сумма МДС равна нулю), то ток обмотки управления повторяет форму тока рабочей цепи. Иначе говоря, ненасыщенный дроссель работает в режиме трансформатора тока. Сопротивление цепи управления является нагрузкой трансформатора.

При большом сопротивлении цепи управления переменному току влияние наведенной в цепи управления ЭДС на входной сигнал незначительно, и им можно пренебречь. В этом случае ток i'_p в рабочей обмотке не зависит от напряжения u и в соответствии с равенством (5.4) или (5.5) целиком определяется током в цепи управления, что отображено на диаграмме рис. 5.22в.

Если сопротивление цепи управления мало, то величина u_p будет пренебрежимо малой по сравнению с $i_p R_H$. Ток i''_p в рабочей цепи в соответствии с равенством (5.6) определяется сопротивлением нагрузки R_H и имеет форму отрезков синусоиды как показано на рис. 5.22г.

ции и управления процессом этой обработки. Микропроцессор как управляющее устройство может входить составной частью в систему управления электронного аппарата.

Представим микропроцессор в виде некоторого «черного ящика» (рис. 4.19а). Он имеет вход и выход для рабочей информации (данные D, \hat{D}) и вход для команд X управления данными.

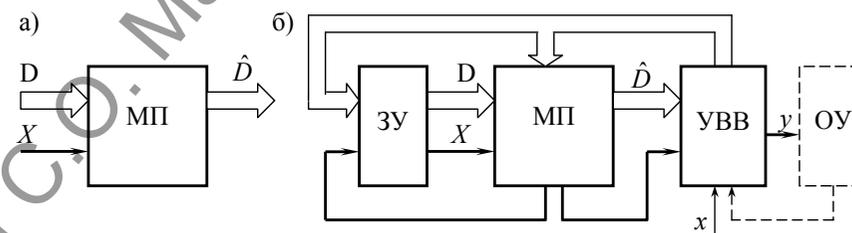


Рис. 4.19. Микропроцессор как «черный ящик» (а) и упрощенная структура микропроцессорной системы управления (б)

Внутри МП происходят два процесса: процесс обработки данных, в котором поступающие в МП данные D подвергаются логическим и вычислительным операциям и в новом качестве \hat{D} выводятся из МП, и процесс управления обработкой данных D на основе заранее составленной программы (X).

Источником исходных данных и программы является запоминающее устройство (ЗУ). Приемником обработанных данных служит так называемое «устройство ввода-вывода» (УВВ), через которое обработанная цифровая рабочая информация \hat{D} в преобразованном виде передается на объект управления (ОУ), например, формирователь импульсов управления электронным ключом (рис. 4.19б). Из ОУ в УВВ по обратной связи может поступать информация о состоянии объекта управления. Поток рабочей информации может иметь обратное направление от УВВ к МП и к ЗУ. Это позволяет обрабатывать данные обратных связей и запоминать результаты операций, выполненных микропроцессором. Взаимосвязанная совместная работа всех устройств обеспечивается управляющими сигналами, которые передаются от МП к ЗУ и к УВВ. согласо-

вание действий во времени достигается с помощью синхронизирующих импульсов, для выработки которых предусматривают генератор тактовых импульсов. При такой организации информационных процессов МП, ЗУ и УВВ в совокупности называют *микропроцессорной системой управления*.

4.8.5. Аналоговые интегральные схемы

К аналоговым ИС относят все виды интегральных схем, работа которых связана с обработкой непрерывных во времени сигналов. Такими ИС являются усилители электрических сигналов, фильтры, перемножители сигналов и др. Широкое распространение получили операционные усилители (ОУ). Их используют в различных функциональных устройствах, поскольку на основе ОУ удается реализовать широкий спектр линейных и нелинейных операторов преобразования входных сигналов в выходные сигналы (см. п. 1.6.1, п. 1.6.2).

Операционный усилитель – это аналоговая интегральная схема, которая имеет, как минимум, пять выводов (рис. 4.20).

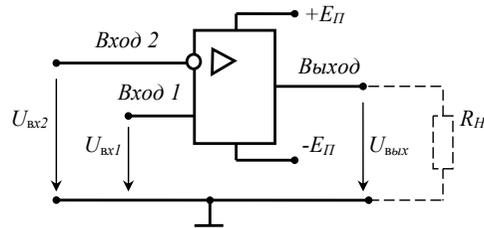


Рис. 4.20. Условное графическое изображение операционного усилителя

Два вывода ОУ используются в качестве входных, один выход является выходным, два оставшихся вывода используются для подключения источника питания ОУ. В зависимости от фазовых соотношений входного и выходного сигналов один из входных выходов (вход 1) называется неинвертирующим, другой (вход 2) – инвертирующим. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ связано с входными напряжениями $U_{\text{вх1}}$ и $U_{\text{вх2}}$ соотношением

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{УО}}(U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}),$$

$$w_p i_p + w_y i_y = 0, \quad (5.4)$$

а ненасыщенному состоянию другого дросселя – равенство

$$w_p i_p - w_y i_y = 0, \quad (5.5)$$

где i_p и i_y соответственно ток в рабочей обмотке и ток в обмотке управления. Разные знаки в равенствах (5.4) и (5.5) объясняются тем, что для одного дросселя направления магнитодвижущих сил (МДС) $w_p i_p$ и $w_y i_y$ одинаковые, а для другого дросселя МДС обмоток имеют противоположные направления. Равенства (5.4) и (5.5) должны выполняться одновременно, если оба дросселя не насыщены. Это возможно только, если $i_p = i_y = 0$. Таким образом, в случае, когда оба дросселя не насыщены, ток в нагрузке R_H (рис. 5.21 б) равен нулю.

Сказанное иллюстрируется с помощью временных диаграмм на рис. 5.22. Они отличаются от диаграмм односердечникового магнитного усилителя (см. рис. 5.19) вследствие возникновения магнитного потока Φ_2 во втором сердечнике.

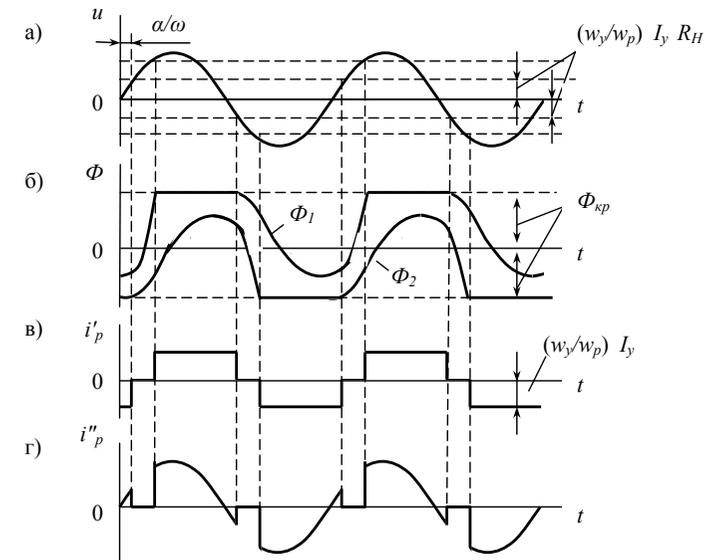


Рис. 5.22. Временные диаграммы работы двухсердечникового магнитного усилителя с "идеальной" сталью

Усилитель состоит из двух дросселей с сердечниками 1 и 2. Рабочая обмотка состоит из двух частей с одинаковым количеством витков w_p . Они располагаются на сердечниках 1 и 2, соединены согласно и подключены к цепи переменного тока с напряжением $u=U_m \sin \omega t$ и нагрузкой R_H .

Обмотка управления с количеством витков w_y охватывает оба сердечника. На нее подается сигнал управления – напряжение u_y постоянного тока.

5.6.2. Электромагнитные процессы в усилителе

Сердечники современных магнитных усилителей имеют характеристику намагничивания, близкую по форме к кривой намагничивания идеальной стали (см. рис. 5.18). Поэтому воспользуемся результатами анализа работы дросселя с подмагничиванием, полученными в п. 5.5.2.

Если сигнал управления отсутствует ($u_y = 0$), то магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 (рис. 5.21), создаваемые в сердечниках 1 и 2 рабочей обмоткой, равны по величине. Для обмотки управления они имеют встречное направление. Поэтому ЭДС индукции в обмотке управления равна нулю. Параметры усилителя и цепи переменного тока выбираются такими, что оба сердечника находятся в ненасыщенном состоянии (см. п.5.2.2).

Если сигнал управления подан на обмотку w_y , то нормальный режим работы двухсердечникового магнитного усилителя характеризуется процессом последовательной смены состояния дросселей во времени. Допустим, что в данный момент времени первый дроссель насыщен, второй дроссель не насыщен. Через некоторое время дроссели переходят в состояние, когда они оба не насыщены. Затем следует состояние, при котором второй дроссель насыщен, а первый не насыщен. Затем снова они не насыщены и так далее. Для магнитного усилителя исключают состояние одновременного насыщения обоих дросселей. Иначе магнитный усилитель становится неуправляемым.

Ненасыщенное состояние дросселя возможно только при равной нулю магнитодвижущей (намагничивающей) силе. Следовательно, ненасыщенному состоянию одного дросселя соответствует равенство

где K_{U0} – собственный коэффициент усиления ОУ по напряжению (ограничивается значениями $10^5 \dots 10^6$).

Из приведенного выражения следует, что ОУ воспринимает только разность входных напряжений, называемую дифференциальным входным сигналом, и нечувствителен к любой составляющей входного напряжения, воздействующей одновременно на оба входа ОУ.

В качестве источника питания ОУ используют двухполярный источник напряжения ($+E_{П}$, $-E_{П}$). Средний вывод этого источника, как правило, является общей шиной для входных и выходных сигналов и в большинстве случаев не подключается к ОУ. Напряжение питания реальных ОУ находится в диапазоне $\pm 3 \dots \pm 18$ В. Применение источника питания со средней точкой обеспечивает возможность изменения не только уровня, но и полярности как входного, так и выходного напряжений ОУ.

На рис. 4.21 приведены схемы функциональных преобразователей входного сигнала (напряжения) $u_{вх}$ в выходной сигнал $u_{вых}$ на основе неинверсивного (а) и инверсивного (б) ОУ.

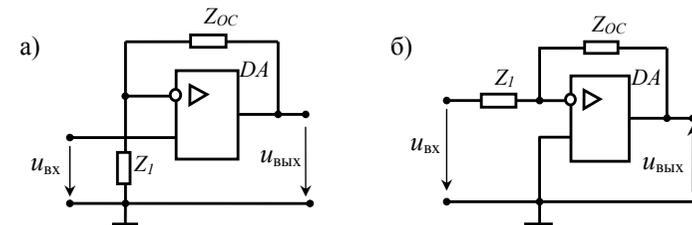
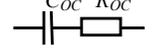
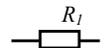
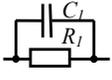


Рис. 4.21. Схемы функциональных преобразователей на основе неинвертирующего (а) и инвертирующего (б) усилителей (ДА)

Для создания сопротивлений Z_1 и Z_{oc} применяются резисторы (R_1 , R_{oc}) и конденсаторы (C_1 , C_{oc}), а также полупроводниковые приборы: выпрямительные диоды, стабилитроны, транзисторы и др. В табл. 4.5 приведены зависимости выходного напряжения $u_{вых}$ от входного напряжения $u_{вх}$ функциональных преобразователей (регуляторов) с инвертирующим ОУ (рис. 4.21б) при различных реализациях Z_1 и Z_{oc} .

Реализация некоторых функциональных преобразователей
на инвертирующем ОУ

Таблица 4.5

Z_{OC} Z_I			
	$u_{\text{вых}} = Ku_{\text{вх}}$ $K=R_{OC}/R_I$	$u_{\text{вых}} = \frac{1}{T_{II}} \int u_{\text{вх}} dt$ $T_{II} = R_I C_{OC}$	$u_{\text{вых}} = Ku_{\text{вх}} + \frac{1}{T_{II}} \int u_{\text{вх}} dt$ $k=R_{OC}/R_I, T_{II} = R_I C_{OC}$
	$u_{\text{вых}} = Ku_{\text{вх}} + T_{Д} \frac{du_{\text{вх}}}{dt}$ $T_{Д} = R_{OC} C_I$	—	$u_{\text{вых}} = Ku_{\text{вх}} + T_{Д} \frac{du_{\text{вх}}}{dt} + \frac{1}{T_{II}} \int u_{\text{вх}} dt$ $K=R_{OC}/R_I, T_{Д} = R_{OC} C_I,$ $T_{II} = R_I C_{OC}$

Значение I_p тока в рабочей цепи зависит только от абсолютной величины $|i_y|$ тока управления i_y и не зависит от его направления в обмотке управления. Характеристика управления дросселя симметрична относительно оси ординат.

График характеристики управления (рис. 5.20) позволяет сделать вывод, что дроссель с подмагничиванием может быть использован в качестве коммутатора цепи переменного тока при двухуровневом сигнале управления i_y : когда $i_y=0$, нагрузка отключена, когда $i_y > I_{yn}$, нагрузка подключена.

Дроссель с подмагничиванием может быть использован также в качестве аналогового усилителя сигнала i_y , изменяющегося в диапазоне $0 < i_y < I_{yn}$. Иногда его называют односердечниковым магнитным усилителем.

5.6. Магнитный усилитель

5.6.1. Усилитель на основе двух дросселей с подмагничиванием

Односердечниковый магнитный усилитель имеет существенный недостаток. При протекании тока в рабочей цепи в его обмотке управления индуцируется переменная электродвижущая сила, которая может нарушить нормальную работу источника сигнала. Поэтому применяют *двухсердечниковые* магнитные усилители (с двумя сердечниками), в которых ослабляется указанный недостаток.

Представим двухсердечниковый магнитный усилитель с помощью изобразительной модели, показанной на рис. 5.21 а. Электрическая схема подключения усилителя представлена на рис. 5.21 б.

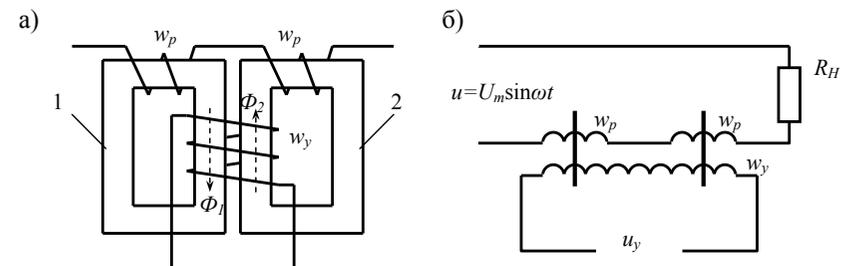


Рис. 5.21. Изобразительная модель двухсердечникового магнитного усилителя (а) и электрическая схема его подключения (б)

до бесконечности (см. нижнюю диаграмму). Когда дроссель не насыщен, токи в его обмотках удовлетворяют условию (5.1).

5.5.3. Характеристика управления дросселя

Если увеличивать ток управления i_y в обмотке управления дросселя, то возрастет угол насыщения α (см. верхнюю диаграмму на рис. 5.19), уменьшается интервал времени нахождения дросселя в ненасыщенном состоянии и возрастает на периоде $T=2\pi/\omega$ переменного напряжения $u=U_m\sin\omega t$ среднее значение

$$I_p = \frac{1}{T} \int_0^T |i_p| dt \quad (5.2)$$

абсолютной величины $|i_p|$ тока i_p в рабочей цепи. Величину I_p можно рассматривать как среднее значение выпрямленного тока i_p .

Если ток управления i_y достигнет и превысит значение

$$I_{yn} = U_m / [(w_y/w_p)R_H], \quad (5.3)$$

дроссель не будет выходить из режима насыщения, и в рабочей цепи будет протекать синусоидальный ток $i_p = u / R_H$. Величина I_p (5.2) достигнет наибольшего значения

$$I_{pn} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \frac{u}{R_H} dt = \frac{2U_m}{R_H T} \int_0^{T/2} \sin\omega t dt = \frac{4U_m}{R_H T \omega}.$$

При $i_y=0$ дроссель будет все время сохранять ненасыщенное состояние. Тока в рабочей цепи не будет. В линейном приближении характеристику управления дросселя зависимость I_p от i_y можно представить так, как показано на рис. 5.20.

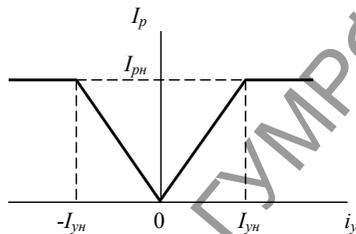


Рис. 5.20. Статическая характеристика дросселя в линейном приближении

Глава 5

ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫЕ АППАРАТЫ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

5.1. Общие сведения

К аппаратам силовых (сильноточных) электрических цепей относятся контакторы различных типов, тиристорные коммутаторы, магнитные и тиристорные пускатели. Перечисленные аппараты являются дистанционно управляемыми (см. п. 1.4.1) электромеханическими или электронными устройствами (см. п. 1.1.1).

Как правило, под контактором понимают электромагнитный аппарат контактной коммутации, основными функциональными частями которого являются контактная система (см. п. 2.1.1), электромагнитный механизм (см. п. 3.3.2) и механическая передача (см. п. 3.2.2). Коммутирующие контакты электромагнитных контакторов рассчитаны на коммутацию силовых цепей с токами до 600 А. Для гашения электрической дуги на коммутирующих контактах (см. п. 2.4.1) применяют дугогасительные устройства различных типов (см. п. 2.5).

Контакторами называют также некоторые аппараты неконтактной коммутации силовых цепей с помощью электронных ключей. Примером служит «твердотельный контактор» (см. п. 5.4.3).

Слово «коммутатор» употребляется в названии аппаратов контактной или бесконтактной коммутации силовых цепей.

Аппараты, специально предназначенные для пуска, останова, реверсирования и защиты от перегрузки асинхронных электродвигателей, выполненные на основе контакторов и коммутаторов, называют «пускателями». Они, как правило, представляют собой комплектные аппараты (см. п. 1.4.2). Применение в них тиристорных ключей и систем импульсно-фазового управления ими позволило создать пускатели, которые производят плавный пуск и остановку асинхронных электродвигателей (см. п. 5.4.6 и п. 5.4.7).

Большинство из рассматриваемых аппаратов имеют существенно нелинейные характеристики управления (см. 1.6.3). Это аппараты прерывистого управления (см. п. 1.6.2). Они изменяют коэффициент k_p передачи энергии по электрической цепи практически от 0 до 1, например, при включении и от 1 до 0 при отключении. Такое изменение коэффициента передачи энергии происходит практически мгновенно в сравнении со временем пребывания аппарата во включенном или отключенном состоянии. Тем самым снижаются до минимума потери энергии в коммутируемой аппаратом электрической цепи (см. п. 1.5).

Для некоторых электроприводов управление передачей энергии по электрической цепи переменного тока реализуют путем изменения индуктивности рабочей обмотки дросселя, подсоединенной к цепи по аналогии с тем, как подсоединяют коммутирующий контакт или электронный ключ. Изменение индуктивности рабочей обмотки вызывает изменение реактивного индуктивного сопротивления электрической цепи и коэффициента k_p передачи энергии по ней. Управление индуктивностью производится по слаботочной электрической цепи путем подмагничивания сердечника дросселя.

Управляемые дроссели с подмагничиванием, собранные по определенным электрическим схемам называют магнитными усилителями.

5.2. Электромагнитные контакторы

5.2.1. Составные части и принцип действия контактора

Контактором называется электрический аппарат, предназначенный для многократного дистанционного включения и отключения силовой электрической нагрузки переменного тока или постоянного тока, а также редких отключений токов перегрузки [1].

В состав *электромагнитного контактора* входят: электромагнитный механизм (см. п. 3.3.2), коммутирующие контакты (см. п. 2.2), механическая передача с возвратной пружиной (см. п. 3.2.2). Структурная схема электромагнитного контактора показана на рис. 5.1а.

Граничный момент времени t перехода дросселя из насыщенного состояния при $H \neq 0$ в ненасыщенное состояние при $H = 0$ определяется условием равенства нулю суммы магнитодвижущих сил (МДС) рабочей обмотки и обмотки управления:

$$w_p i_p + w_y i_y = 0, \quad (5.1)$$

когда ток в рабочей цепи снижается до значения $i_p = -(w_y / w_p) i_y$ при мгновенном значении $u = i_p R_H = U_\alpha = -(w_y / w_p) i_y R_H$ напряжения питания цепи (отмечено пунктирной линией на верхней диаграмме). Теперь магнитный поток Φ в сердечнике дросселя начинает снижаться от значения $\Phi = \Phi_{kp}$, соответствующего индукции B_{kp} , до значения $\Phi_{kp} - \Phi_\Delta$ пока напряжение u , перейдя через минимальное значение, не достигнет вновь величины $u = U_\alpha = -(w_y / w_p) i_y R_H$. Все это время дроссель не насыщен ($H = 0$) и, следовательно, токи в его обмотках удовлетворяют условию (5.1).

Исходя из закона электромагнитной индукции, представим

$$\Phi_\Delta = \left| \frac{1}{w_p} \int_{t_2}^{t_3} (u - U_\alpha) dt \right| \Rightarrow S_1$$

и охарактеризуем величину Φ_Δ площадью S_1 , показанной на верхней диаграмме. Тогда справа от момента t_3 при возрастании напряжения u и потока Φ последний достигнет значения Φ_{kp} , когда площадь S_2 станет равной площади S_1 в момент t_4 . При этом на интервале (t_3, t_4) поток Φ изменится на величину Φ_Δ и вызовет в момент t_4 переход дросселя в насыщенное состояние ($H \neq 0$). Соответствующий уровень напряжения u показан на верхней диаграмме горизонтальной пунктирной линией.

Из диаграмм следует, что ток i_p в рабочей цепи переменный, но по характеру изменения во времени не синусоидальный. На каждом периоде переменного напряжения дроссель некоторое время пребывает в насыщенном состоянии ($H \neq 0$) и индуктивность L рабочей обмотки снижается до нуля, а затем с переходом в ненасыщенное состояние ($H \neq 0$) индуктивность L вновь возрастает

5.5.2. Управление передачей энергии по электрической цепи

Рассмотрим работу дросселя с насыщением, которым управляют с помощью подмагничивания сердечника. Используется схема последовательного подключения (см. п.1.5.2) дросселя А в соответствии с рис. 5.17б.

Примем следующие допущения:

- 1) сталь сердечника характеризуется кривой намагничивания, показанной на рис. 5.18;
- 2) нагрузка рабочей цепи имеет активное сопротивление R_H ;
- 3) источник сигнала управления является источником тока i_y (источник с большим внутренним сопротивлением);

Временные диаграммы, характеризующие работу дросселя с подмагничиванием, приведены на рис. 5.19.

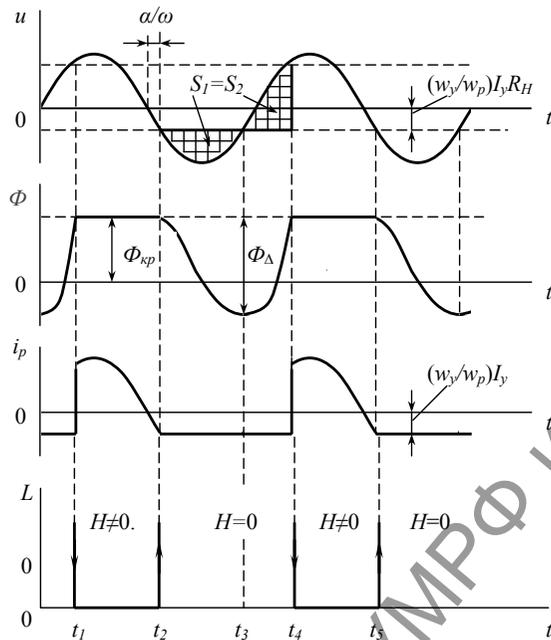


Рис. 5.19. Временные диаграммы работы дросселя с подмагничиванием

В большинстве контакторов предусматривают две группы коммутирующих контактов:

КК_Г – главные контакты (от одного до пяти), предназначенные для коммутации силовых (главных) электрических цепей (ЭЦС);

КК_В – вспомогательные контакты (до пяти), предназначенные для коммутации слаботочных электрических цепей (ЭЦ).

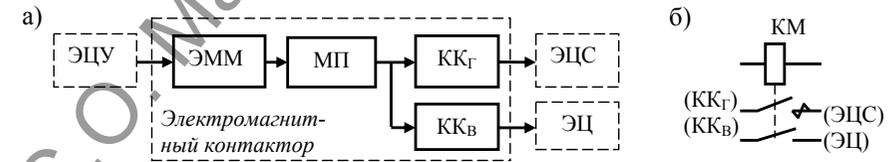


Рис. 5.1. Структурная схема электромагнитного контактора (а) и изображение его элементов на электрической схеме (б)

Электромагнитный механизм ЭММ обеспечивает дистанционное управление контактором по электрической цепи управления ЭЦУ. При подаче питания на катушку электромагнитного механизма его якорь замыкается (втягивается) и через механическую передачу МП изменяет положение коммутирующих контактов КК_Г и КК_В. После отключения катушки от питания возвратная пружина переводит якорь в разомкнутое положение, при этом коммутирующие контакты возвращаются в исходное положение. Контактор – аппарат без памяти (см. п. 1.6.5).

Втягивающая катушка ЭММ должна обеспечивать надежную работу контактора при снижении напряжения до $0,85U_{ном}$. По нагреву катушка должна допускать повышение напряжения до $1,05U_{ном}$. Кроме катушек напряжения (шунтовых) могут использоваться токовые (серийные) катушки.

На рис. 5.1б приведен пример изображения частей контактора на принципиальных электрических схемах (использован способ совмещенного изображения – см. п. 1.3.2). Для сопоставления со структурной схемой в скобках указаны сокращенные наименования элементов структурной схемы. Прямоугольник (КМ) обозначает электромагнитный привод (катушку ЭММ). Показан только

один главный контакт KK_G и один вспомогательный контакт KK_B (контактов может быть несколько). Контакт KK_G замыкающий с дугогашением (см. п. 2.5). Вспомогательный контакт KK_B замыкающий без дугогашения.

Главные контакты (KK_G) контакторов выполняют пальцевого или мостикового типа (см. п. 2.2.1 – п. 2.2.4). В контакторах с поворотным якорем наибольшее распространение получили пальцевые линейные контакты. В контакторах с прямоходовыми электромагнитами применяются мостиковые контакты. Механическая износоустойчивость коммутирующих контактов до $5 \cdot 10^7$ циклов замыканий для контакторов тяжелого режима работы. Главные контакты рассчитывают на длительные токи до 600 А и более. Основными показателями, характеризующими контакты, являются: раствор и провал контакта, начальное нажатие и конечное нажатие (см. п. 2.2.2).

Вспомогательные контакты (их называют также блокировочными контактами или блокконтактами KK_B) служат для производства переключений в цепях управления, блокировки и сигнализации (ЭЦ). Эти контакты могут быть выполнены замыкающими или размыкающими, главным образом мостиковыми, реже пальцевыми. Их рассчитывают на длительное проведение тока не более 20 А и отключение тока не более 5 А.

5.2.2. Классификация контакторов

Классифицируют контакторы по следующим признакам:

- по роду тока – постоянного и переменного тока (контакторы постоянного тока предназначены для коммутации цепей постоянного тока и, как правило, приводятся в действие электромагнитом ЭММ постоянного тока; контакторы переменного тока предназначены для коммутации цепей переменного тока, а электромагниты этих контакторов могут быть как переменного, так и постоянного тока);
- по числу полюсов – одно-, двух- и трехполюсные (число полюсов определяется количеством главных контактов, предназначенных для коммутации силовых цепей);

является функцией от магнитной проницаемости μ сердечника при постоянных значениях площади S поперечного сечения сердечника и длины l средней линии магнитной индукции;

Сердечник дросселя выполняют из стали, магнитные свойства которой приближаются к свойствам «идеальной» стали, для которой характеристика намагничивания имеет вид, показанный на рис. 5.18.

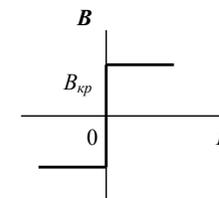


Рис. 5.18. Характеристика намагничивания «идеальной» стали сердечника (B – индукция, H – напряженность магнитного поля)

Управляемый дроссель с сердечником из «идеальной» стали в некотором смысле подобен электрическому контакту. При $H \rightarrow 0$, когда $\mu = dB/dH \rightarrow \infty$, он способен как бы «размыкать» электрическую цепь по переменному току своей рабочей обмоткой, создавая $L \rightarrow \infty$ и большое индуктивное сопротивление X_L переменному току. При $H \neq 0$, когда $\mu = dB/dH \rightarrow 0$, рабочая обмотка как бы «замыкает» цепь, уменьшая индуктивность L и реактивное сопротивление переменному току до нуля. Таким образом, дроссель с насыщением способен коммутировать переменную составляющую тока в цепи.

На величину напряженности магнитного поля H в сердечнике дросселя влияет магнитодвижущая сила $w_y i_y$, создаваемая током i_y в витках обмотки управления w_y . Ток i_y является управляющим воздействием на дроссель (см. п. 1.1), его входной переменной управления.

Магнитодвижущая сила $w_p i_p$, создаваемая током i_p рабочей обмотки также влияет на напряженность магнитного поля H . Ток i_p , протекающий по цепи переменного тока с источником напряжения $u = U_m \sin \omega t$, оказывает возмущающее воздействие на дроссель – является возмущением (см. п. 1.2.3).

5.5. Управляемый дроссель с подмагничиванием

5.5.1. Свойства дросселя с подмагничиванием

Изобразительная модель дросселя с подмагничиванием и электрическая схема подключения дросселя к электрической цепи показаны на рис.5.17.

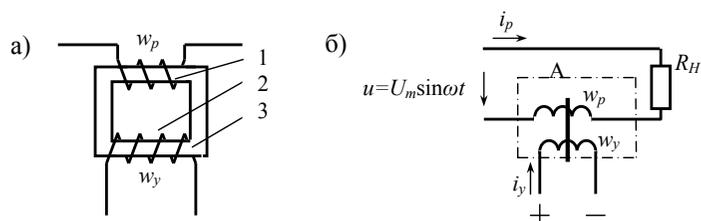


Рис. 5.17. Изобразительная модель дросселя с подмагничиванием (а) и электрическая схема подключения дросселя к электрической цепи (б)

На рис. 5.17:

1 – рабочая обмотка дросселя с количеством витков w_p ; она подключается к управляемой дросселем цепи переменного тока с источником напряжения ($u = U_m \sin \omega t$ – см. п. 1.2.2) и с приемником электрической энергии (нагрузкой R_H);

2 – обмотка управления с количеством витков w_y ; она подключается к цепи постоянного тока (i_y) с источником сигнала управления;

3 – магнитопровод (сердечник); на рис. 5.17б он изображен вертикальной линией, пересекающей обмотки дросселя.

Активное сопротивление рабочей обмотки дросселя мало, поэтому рабочая обмотка создает в электрической цепи реактивное индуктивное сопротивление

$$X_L = L\omega = \left(\frac{\mu S}{l} w_p^2 \right) \omega,$$

где индуктивность

$$L = \frac{\mu S}{l} w_p^2$$

- по положению главных контактов – с замыкающими и размыкающими главными контактами или с различными сочетаниями этих контактов;
- по номинальному напряжению и роду тока катушки ЭММ – 24, 110, 220, 320 В постоянного тока и 127, 220, 380 В переменного тока;
- по значению и роду тока главных контактов – 10, 15, 25, 60, 100, 150, 200, 300, 350, 600 А и др.;
- по наличию устройства для гашения электрической дуги – с принудительным гашением и без принудительного гашения;
- по назначению – линейные контакторы для замыкания и размыкания главных цепей электродвигателей и контакторы ускорения для шунтирования ступеней пускового резистора.
- в зависимости от условий работы в силовых цепях – контакторы для нормальных (говорят также легких) условий работы и контакторы для тяжелых условий работы. В нормальных условиях длительная работа контактора осуществляется при 240..600 включений в час, в тяжелых условиях – до 1200 включений в час и более. Например, в электроприводах подъемно-транспортных машин частота включений и переключений может достигать 1500 в час. При этом контактор должен выдерживать пусковые токи двигателя до $4I_{ном}$ у двигателей постоянного тока и до $7I_{ном}$ у двигателей переменного тока, также отключать токи до $10I_{ном}$, а в отдельных случаях до $20I_{ном}$ ($I_{ном}$ – номинальный ток двигателя) [3].

5.2.3. Основные технические данные контакторов

К основным техническим данным контакторов относятся [10]:

износостойкость – способность контактора (как и любого коммутационного контактного аппарата) обеспечить работу при большом числе включений и отключений;

механическая износостойкость – предельное число циклов включения-отключения цепей без тока, при котором не требуется ремонта и замены узлов и деталей контактора (составляет $(10...20) \cdot 10^6$ циклов);

коммутационная износостойкость – предельное число включений и отключений цепей с током, после чего требуется замена контактов (составляет 10^6 циклов и менее);

номинальное напряжение контактора – наибольшее напряжение коммутируемой цепи, для работы при котором предназначен контактор;

номинальный ток контактора – допустимый ток, который можно пропускать по его замкнутым главным контактам в течение 8 часов без коммутаций, с учетом того, что температура различных частей контактора не превысит допустимого значения;

предельный включаемый и отключаемый ток – максимальное значение кратковременного тока, на которое рассчитаны главные контакты контактора (используется и другая терминология, соответственно: *включающая способность* и *отключающая способность*);

раствор главных контактов (см. п. 2.2.2);

провал главных контактов (см. п. 2.2.2);

начальное нажатие главного контакта (см. п. 2.2.2);

конечное нажатие контакта (см. п. 2.2.2) и др.

5.2.4. Параметры срабатывания контактора

Электромагнитный контактор характеризуется следующими параметрами срабатывания [2]:

напряжение стягивания (срабатывания) – наименьшее напряжение на катушке, при котором происходит включение контактора без остановки или задержки подвижных контактных узлов (составляет примерно 80% номинального напряжения катушки);

напряжение удержания – наименьшее напряжение на катушке, при котором якорь контактора удерживается в полностью притянутом положении (около 70% номинального напряжения);

напряжение отпадания (отпускания) – наибольшее напряжение на катушке, при котором происходит полное отпадание якоря;

снижение напряжения «останов», $(1,0 \dots 0,4)U_{\text{номинальное}}$.

Для тиристорных пусковых устройств МРН-М, УНТ-2, УПР-1, УПР-2, ТПУЭ характерным является то, что в переходных режимах (запуск и торможение) коммутация электродвигателя к сети реализуется через силовые тиристоры. В стационарном режиме работы (после окончания пуска) подключение к сети обеспечивается электромагнитными контакторами (см. п. 5.2.8) без устройств дугогашения. Контактторы шунтируют тиристоры своими контактами. Схема подключения пускового устройства МРН-М приведена на рис. 5.16.

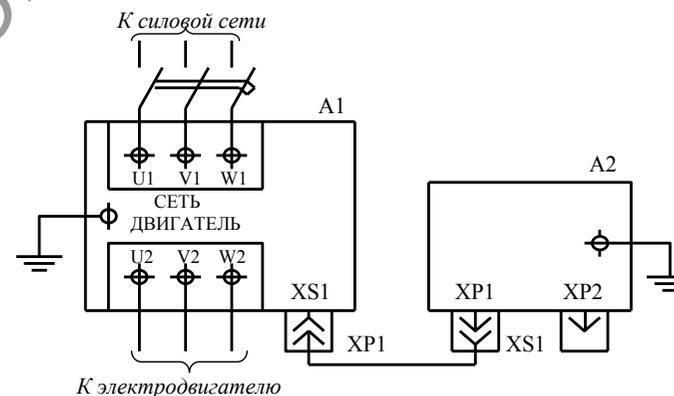


Рис. 5.16. Схема подключения пускателя МРН-М

В состав МРН-М входит тиристорный блок (А1) и микропроцессорный блок управления с пультом управления (А2). Дистанционная связь между блоками А1 и А2 реализована с помощью жгута проводников электрического тока, подключаемого через разъемы XS1, XP1. Прходная мощность тиристорного блока составляет 45...250 кВА. Система управления выполняет блокирование включения и аварийное отключение при неполнофазном питании, повышенном напряжении питающей сети; коротком замыкании в выходных цепях, перегрузке по току, обрыве фазы, перегреве двигателя, перегреве устройства, затынутом пуске, низком сопротивлении изоляции.

- бесконтактное включение и отключение асинхронного двигателя в номинальном режиме работы;
- плавный разгон электродвигателя с ограничением величины пускового тока на заданном уровне;
- плавную остановку электродвигателя с заданной длительностью переходного режима;
- режим динамического торможения;
- плавный разгон электродвигателя с ограничением величины пускового тока на заданном уровне с последующим шунтированием силовых элементов ПТТ контактами магнитного пускателя (электромагнитного контактора);
- аварийное отключение цепи нагрузки при неполнофазном режиме, токах короткого замыкания и перегрузках, превышающих их установленное значение.

На рис. 5.15 приведена функциональная схема неререверсивного пускателя мягкого пуска типа ПТТ.

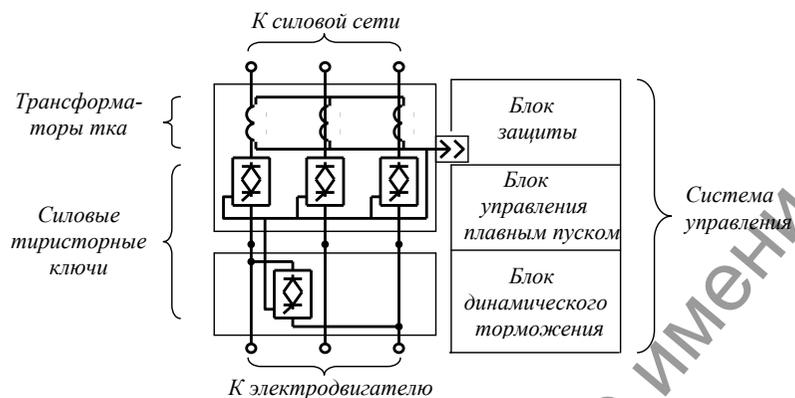


Рис. 5.15. Функциональная схема пускателя типа ПТТ

К регулируемым параметрам пускателя относятся:

- время плавного пуска, $1 \dots 60$ с;
- время плавного останова, $0 \dots 120$ с;
- первоначальное напряжение, $(0,3 \dots 0,9)U_{\text{номинальное}}$;
- предельная величина тока «пуск», $(1,5 \dots 5,0)I_{\text{номинальный}}$;

коэффициент возврата – отношение напряжения отпадания к напряжению втягивания;

собственное время втягивания – время от момента подачи питания на втягивающую катушку до момента полного притягивания якоря;

собственное время отпадания – время от момента прекращения питания втягивающей катушки при номинальном режиме работы до момента полного отпадания якоря.

При рассмотрении динамических свойств контакторов, применяемых в электроприводах, учитывают то, что собственное время втягивания и собственное время отпадания обычно достаточно малы по сравнению с продолжительностью переходных процессов в других элементах и цепях. Обычно считают, что контакты мгновенно замыкаются, когда входное напряжение u_y (управления) достигает значения напряжения срабатывания U_{cp} и мгновенно размыкаются, когда u_y , уменьшаясь, достигает значения напряжения отпускания U_{om} . Тогда контактор представляют безинерционным нелинейным звеном системы управления (см. п. 1.6.2) с нелинейностью №4 в табл. 1.2.

Если временем втягивания и временем отпускания пренебречь нельзя, то в таких случаях контактор можно рассматривать как последовательное соединение идеального запаздывающего звена с определенным запаздыванием (например, $\tau=0,5(\tau_{em} + \tau_{om})$) и безинерционного нелинейного звена.

5.2.5. Особенности контакторов постоянного тока

У контакторов постоянного тока (серии КП, КПВ, КМВ, КПД) включающая (называют также намагничивающая или втягивающая) катушка электромагнитного механизма ЭММ (см. п. 3.3.1, п. 3.3.2, п. 3.4.6) и контактная система ККГ (рис. 5.1) рассчитаны на работу в цепях постоянного тока. Применяются ЭММ клапанного (поворотного) типа с вращением якоря на призме или на оси. Реже применяются и прямоходовые ЭММ. Втягивающая катушка обычно имеет цилиндрическую форму (небольшого диаметра и большой длины для улуч-

шения теплоотдачи). Зазор между якорем и полюсом сердечника небольшой (8...10 мм). Количество главных контактов (КК_Г), иначе говоря, полюсов – один или два. Раствор (см. п. 2.2.2) главных контактов составляет обычно 10...20 мм. Для увеличения раствора в клапанных системах подвижный контактный узел КК_Г располагается на большом рычаге механической передачи (МП). Контактные пружины создают значительное по величине контактное нажатие (см. п. 2.2.2). Используются дугогасительные устройства с магнитным дутьем (см. п. 2.5.2) при последовательном включении катушки магнитного дутья с соответствующим контактом КК_Г. Применяются дугогасительные камеры с узкими зигзагообразными щелями.

Тяговая характеристика ЭММ постоянного тока плохо согласуется с механической характеристикой (см. п. 3.3.4, п. 3.3.5). Напряжение отпускания контактора постоянного тока обычно составляет 0,15...0,25 номинального напряжения катушки $U_{ном}$. Поэтому коэффициент возврата (см. п. 3.3.3) имеет малое значение (0,2...0,3), что не позволяет использовать контактор постоянного тока для защиты двигателя от снижения напряжения.

Минимальное напряжение срабатывания (втягивания) у некоторых контакторов постоянного тока может достигать значения 0,65 $U_{ном}$. Такое низкое напряжение срабатывания приводит к тому, что при номинальном напряжении по обмотке катушки ЭММ протекает ток, приводящий к ее повышенному нагреву. В связи с этим обмотка может включаться под номинальное напряжение только кратковременно на время не более 15 с [10].

Наибольшее напряжение на катушке ЭММ не должно превышать величины 1,1 $U_{ном}$, так как при большем напряжении увеличивается износ контактов, из-за усиления ударов якоря о полюс сердечника, а температура обмотки катушки может превысить допустимое значение [10].

Собственное время срабатывания контакторов постоянного тока (на примере серии КПМ) составляет 0,12...0,3 с, отпадания – 0,08...0,2 с.

Когда нагрузка силовой цепи активно-индуктивная, индуктивность препятствует резким изменениям тока i_H в цепи и затягивает длительность протекания тока через тиристор. При сдвиге фаз между напряжением и током в силовой цепи, равном φ , возможность регулирования передачи мощности нагрузке сохраняется только, когда $\alpha > \varphi$. Если $\alpha < \varphi$, может произойти либо срыв процесса, когда тока в силовой цепи не будет (тиристоры перестанут открываться) при малой длительности τ_n импульсов токов i_{y1} , i_{y2} управления ($\omega\tau_n < \varphi - \alpha$), либо нагрузка окажется накоротко подключенной к сети (бестоковых пауз у i_H не будет), если длительность τ_n импульсов токов i_{y1} , i_{y2} управления тиристорами большая ($\omega\tau_n > \varphi - \alpha$). В таком случае тиристоры становятся неуправляемыми. Область $\alpha < \varphi$ не может быть использована для регулирования напряжения U_H .

При выполнении условия $\alpha > \varphi$ на нагрузке падает напряжение с действующим значением

$$U_H = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\lambda} (\sqrt{2} U \sin \theta)^2 d\theta},$$

где λ – угол, характеризующий длительность τ_{VS} протекания тока i_H через тиристор за один полупериод: $\lambda = \omega \tau_{VS}$.

В пускателе мягкого пуска СИФУ формирует импульсы управления тиристорами, сдвигая по сигналу u_a моменты времени подачи импульсов на управляющий электрод каждого тиристора на величину α/ω относительно момента времени естественного отпирания тиристора. Величина входного для СИФУ сигнала u_a (электрического напряжения) изменяется при пуске электродвигателя определенным образом, например, линейно во времени с помощью электронного устройства – *задатчика интенсивности*. СИФУ и задатчик интенсивности входят в состав системы импульсного управления (см. рис. 5.13) пускателя мягкого пуска.

5.4.7. Особенности пускателей «мягкого пуска»

Серийно выпускаемые пускатели тиристорные трехфазные мягкого пуска серии ПТТ позволяют реализовать следующие функции²⁷:

частота, t - время). Система импульсно-фазового управления (СИФУ) отслеживает моменты времени перехода напряжения через ноль и формирует импульсы токов i_{y1} , i_{y2} управления тиристорами, смещая импульсы относительно этих моментов (естественного отпирания тиристоров) на некоторый интервал, представляемый через *угол управления* α . Величина α задается сигналом u_α , подаваемым на вход СИФУ.

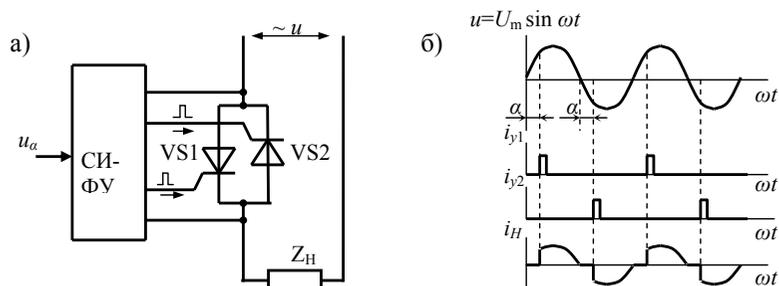


Рис. 5.14. Схема фазового управления тиристорами (а) и упрощенные диаграммы работы схемы с активной нагрузкой $Z_H=R_H$ (б)

Диаграммы, приведенные на рис. 5.14 б, отражают процессы регулирования тока i_H в нагрузке Z_H силовой цепи. Они соответствуют случаю, когда нагрузка силовой цепи активная: $Z_H=R_H$. Тиристор VS1 и тиристор VS2 открываются поочередно импульсами токов управления (i_{y1} , i_{y2}), поступающими на управляющие электроды тиристоров, когда на тиристоре падает прямое напряжение. По цепи и активной нагрузке протекает прерывистый ток i_H , и нагрузке R_H передается мощность

$$P_H = U_H^2 / R_H,$$

где U_H – падение напряжения на нагрузке R_H :

$$U_H = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} U \sin \theta)^2 d\theta} = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}},$$

U – действующее значение напряжения u силовой цепи (α – угол управления тиристором).

5.2.6. Особенности контакторов переменного тока

У контакторов переменного тока (серии КТ, КВД, КТД., КТП, КНТ) катушка электромагнитного механизма ЭММ (см. п. 3.3.2) и контактная система КК_Г (см. рис. 5.1) обычно рассчитаны на работу в цепях переменного тока. Катушка имеет небольшое количество витков и небольшое активное сопротивление. Основную часть полного сопротивления катушки составляет ее индуктивное сопротивление (см. п. 3.6.1). Оно зависит от величины воздушного зазора между якорем и сердечником электромагнитного механизма. Поэтому ток в катушке при разомкнутом якорю (пусковой ток) в 5...10 раз превышает ток при замкнутом якорю (рабочий ток). Большой пусковой ток ограничивает применение контакторов при большой частоте включений в цепи переменного тока. Поэтому у контакторов, работающих в тяжелых условиях, втягивающая катушка иногда выполняется с питанием от цепи постоянного тока. Обычно применяют специальную катушку с форсировочным резистором, который шунтирован замыкающим вспомогательным контактом контактора или контактом другого аппарата.

Применяются ЭММ клапанного (поворотного) типа с сердечником Е- и П-образной формы и якорем, вращающимся на оси. Применяются также прямоходовые ЭММ с Ш- и Т-образными сердечниками и сердечниками соленоидного типа (см. п. 3.6.7). Магнитопроводы ЭММ выполняются шихтованными, т. е. набираются из отдельных изолированных друг от друга пластин толщиной 0,35; 0,5 или 1 мм. Полос сердечника с короткозамкнутым витком для устранения вибрации якоря (см. п. 3.6.2, п. 3.6.3).

Нагревание втягивающей катушки обусловлено потерями в ее обмотке и потерями в стали магнитопровода. Поэтому катушку выполняют короткой, а поверхность теплоотдачи увеличивают за счет увеличения диаметра катушки. Катушки ЭММ большинства контакторов переменного тока допускают до 600 включений в час при продолжительности включения ПВ=40%.

Из-за более легких условий гашения электрической дуги переменного тока раствор главных контактов небольшой, а контактное нажатие увеличено

по сравнению с контакторами постоянного тока. Наряду с магнитным дутьем применяются дугогасительные решетки (см. п. 2.5.2, п. 2.5.6). Для повышения эффективности гашения дуги и уменьшения износа контактов используются дополнительно дугогасительные камеры с продольной или зигзагообразной щелью. У большинства контактных систем предусматривается двукратный разрыв дуги на полюс. Для этого используются мостиковые контакты (см. п. 2.2) при поворотных ЭММ и при прямоходовых ЭММ. Пальцевые контакты нашли преимущественное применение в контакторах тяжелого режима работы (см. п. 2.5.3).

Тяговая характеристика ЭММ (см. п. 3.6.4) контактора переменного тока ближе подходит (в среднем на полный зазор) к механической характеристике (суммарной противодействующей силе). В связи с этим напряжение отпускания составляет 0,5...0,7 номинального напряжения катушки ЭММ, т.е. выше, чем у контакторов постоянного тока. Коэффициент возврата также выше (0,6...0,7), поэтому контактор переменного тока может быть использован для защиты электродвигателей от снижения напряжения в сети (в ЭЦУ на рис. 5.1).

Если контактор переменного тока рассматривать как усилитель входного сигнала (по аналогии с тем, как это сделано для контактора постоянного тока), его характеристику управления будет представлять график нелинейности №4 в табл. 1.2.

ЭММ контакторов переменного тока обеспечивают их надежную работу при колебаниях напряжения на катушке в диапазоне $(0,85...1,1)U_{ном}$. Срабатывание и отпускание ЭММ происходит быстрее, чем у ЭММ постоянного тока. Собственное время срабатывания составляет 0,03...0,09 с, а время отпускания 0,02...0,05 с. Количество главных контактов от одного до пяти. Наиболее распространены контакторы трехполюсного исполнения. Количество вспомогательных контактов до четырех.

В качестве пускателей применяют коммутаторы трехфазных цепей (см. п. 5.4.4) типа КПТ. Например, в коммутаторе КПТ201.1 предусматриваются два способа включения и отключения нагрузки: от внутренних схем управления (ручной режим), от внешнего источника постоянного тока (автоматический режим). Напряжение управления в автоматическом режиме составляет не более 6 В. Падение напряжения на ключе в открытом состоянии не превышает 1,8 В при токе 50 А. Коммутатор имеет блок защиты со следующими видами защит: нулевая, тепловая, от обрыва любой фазы, от короткого замыкания нагрузки любой фазы, от любого кратковременного короткого замыкания нагрузок между собой и на землю, от перекоса фаз. Все защиты работают на отключение коммутатора.

5.4.6. Тиристорные пускатели с фазовым управлением

Фазовое управление тиристорными ключами, работающими на переменном токе, применяют в *пускателях мягкого пуска* (soft-starter). «Мягкий» пускатель может быть реализован в соответствии с функциональной схемой, приведенной на рис. 5.13. Система импульсного управления в этом случае должна обладать возможностью смещать импульсы тока управления каждым тиристором относительно моментов времени естественного отпириания тиристора. Смещение импульсов приводит к изменению действующего значения напряжения, подводимого к двигателю. Таким образом, появляется возможность регулирования величины энергии, передаваемой двигателю по электрической цепи за период переменного напряжения, создаваемого источником электрической энергии.

Работу тиристорного ключа при фазовом управлении рассмотрим на примере однофазного *регулятора мощности*, схема которого представлена на рис. 5.14а.

Тиристорный ключ {VS1, VS2} включен в электрическую цепь с нагрузкой Z_H . К цепи приложено переменное напряжение $u=U_m \sin \omega t$, показанное на верхнем графике рис. 5.14 б в зависимости от фазового угла ωt (ω – угловая

тиристор переходит в непроводящее состояние, и ток соответствующей фазы протекает через параллельный диод. По истечении одной трети периода включается следующий тиристор и т. д. Этим обеспечивается непрерывная подача энергии асинхронному двигателю М. Импульсы тока управления тиристорами вырабатываются формирователями импульсов управления (см. п. 4.7.3) *системы импульсного управления* пускателя. В пускателе отсутствуют контактные устройства, имеются только кнопки управления SB1 «Пуск» и SB2 «Стоп».

Система импульсного управления получает питание от отдельного трансформатора TV через диоды модуля A1 выпрямителя. При нажатии кнопки SB1 «Пуск» включаются формирователи импульсов управления, и по линиям связи 1, 2, 3, 4, 5, 6 импульсы управления поступают на тиристоры. Для формирования импульсов управления могут применяться различные устройства: электромагнитные, или маломощные тиристорные, или транзисторные устройства.

Защита двигателя обеспечивается при помощи *схемы защиты* от недопустимых токов. В каждой фазе пускателя включены трансформаторы тока ТА1, ТА2, ТА3. Токи трех фаз суммируются и преобразуются в напряжение на резисторе R4. Если напряжение, снимаемое с движка резистора R4, превышает установленное значение, система импульсного управления перестает вырабатывать импульсы управления тиристорами и двигатель М отключается от питания. При нажатии кнопки SB2 «Стоп» также прекращается подача импульсов управления к тиристорам.

Тиристорные пускатели с широтно-импульсным управлением тиристорными ключами выпускаются серийно и используются для тех же целей, что и магнитные пускателями. Например, пускатели [1]:

ПТ-16380-У5 – для включения и отключения асинхронного двигателя;

ПТ-40380Р-У5 – для включения, отключения и реверсирования асинхронного двигателя;

ПТК-100-380, БПК-1000 – для коммутации и защиты от перегрузки, короткого замыкания и обрыва фазы.

5.2.7. Категории применения контакторов

В стандартных *категориях применения* контакторов (в соответствии с МЭК 947-4) определены величины тока в цепи, которую контактор должен быть способен замкнуть или разомкнуть. Эти величины зависят от:

- типа включаемой нагрузки: асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором или асинхронный двигатель с фазным ротором;
- условий, при которых происходит замыкание или размыкание цепи: остановленный двигатель, запускаемый или работающий двигатель, реверсирование, торможение противотоком.

Применение по переменному току.

Категории:

АС-1 – активная или малоиндуктивная нагрузка ($\cos\varphi \geq 0,95$);

АС-2 – пуск электродвигателей с фазным ротором, торможение противовключением;

АС-3 – пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором, отключение вращающихся двигателей при номинальной нагрузке;

АС-4 – пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором, отключение неподвижных или медленно вращающихся электродвигателей, торможение противовключением.

Применение по постоянному току.

Категории:

DC-1 – активная или малоиндуктивная нагрузка (постоянная времени затухания L/R не больше 1 мс);

DC-2 – пуск электродвигателей постоянного тока с параллельным возбуждением и их отключение при номинальной частоте вращения;

DC-3 – пуск электродвигателей с параллельным возбуждением и их отключение при неподвижном состоянии или медленном вращении ротора;

DC-4 – пуск электродвигателей с последовательным возбуждением и их отключение при номинальной частоте вращения;

DC-5 – пуск электродвигателей с последовательным возбуждением, отключение неподвижных или медленно вращающихся двигателей, торможение противотоком.

5.2.8. Применение контакторов для пуска и останова электродвигателя

В составе автоматизированного электропривода (и других систем автоматики) контактор может рассматриваться как усилитель электрического сигнала с нелинейной характеристикой управления (см. п. 1.5.1, п. 1.6.2). В таком случае контактор нужно обязательно рассматривать совместно с силовой цепью (ЭЦС на рис. 5.1), в которой создано напряжение U_C источником электрической энергии (см. п. 1.1.2, п. 1.1.3, п. 1.2.2, 1.5.1). Применяется последовательная схема подключения контактора к ЭЦС с источником напряжения (см. п. 1.5.2). Замыканием главных контактов (КК_Г) контактор подключает электродвигатель под напряжение U_C источника электрической энергии (силовой сети). Соответствующий пример с контактором и электродвигателем постоянного тока приведен на рис. 5.2а.

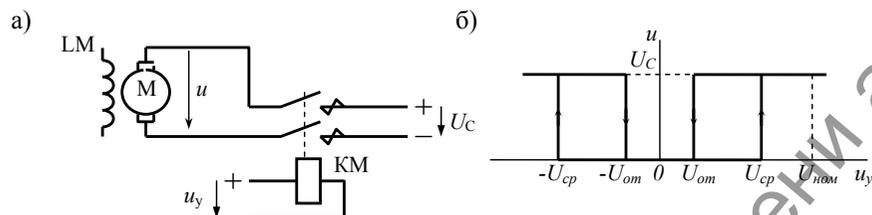


Рис. 5.2. Пример применения двухполюсного контактора постоянного тока для прямого пуска двигателя (а) и характеристика управления контактора в режиме усиления электрического сигнала (б)

Входным управляющим сигналом для контактора КМ является напряжение u_y (напряжение управления), подаваемое по электрической цепи управления (ЭЦУ), а выходным воздействием на электродвигатель М – напряжение u на щетках двигателя.

Характеристика управления (см. п. 1.6.3) контактора (как усилителя сигнала u_y) показана на рис. 5.2б. Через U_{cp} , U_{om} и $U_{ном}$ обозначены соответственно

этого в нем предусматривают обычно пять однофазных исполнительных устройств (ИУ) с тиристорными ключами, реализованными по схеме рис. 5.8.

Применяется широтно-импульсное управление каждым тиристорным ключом, при котором открытый ключ пропускает обе полуволны тока в нагрузку.

Как правило, в тиристорных пускателях предусматривают несколько видов защит электродвигателя. На рис. 5.13 приведена функциональная схема тиристорного пускателя с защитой двигателя от перегрузки и от токов короткого замыкания.

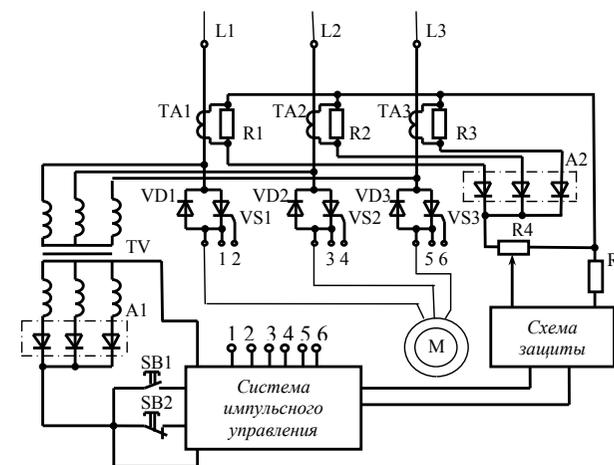


Рис. 5.13. Функциональная схема тиристорного пускателя

Коммутация линий L1, L2, L3 трехфазной цепи питания электродвигателя М производится ключами {VD1, VS1}, {VD2, VS2}, {VD3, VS3} тиристорного пускателя. В рассматриваемом примере пускателя каждый ключ состоит из диода VD и тиристора VS, включенных встречно-параллельно (см. п. 4.4.4). Тиристор открывается последовательно в моменты времени, когда подается импульс тока на открывание тиристора при прохождении напряжения на нем через ноль в сторону увеличения напряжения в прямое для тиристора направление (см. п. 4.4.2). После того как напряжение достигнет нулевого значения,

ИУ на рис. 5.12б представляет собой управляемый выпрямитель. Он переводится в режим короткого замыкания, когда на управляющие электроды тиристоров подаются токи управления. Благодаря естественной коммутации на переменном токе тиристоры периодически закрываются и сохраняют закрытое, т. е. непроводящее состояние, если токи управления не подаются на управляющие электроды тиристоров.

В ИУ на рис. 5.12 в применены симисторы (см. п. 4.4.4). Они подключены под линейные напряжения трехфазной электрической цепи. Симисторы переводятся в проводящее состояние токами управления, подаваемыми на управляющие электроды симисторов. Когда токи управления не подаются, симисторы сохраняют непроводящее состояние.

В приведенных на рис. 5.11 схемах включение (пуск) АД происходит, когда обмотки АД «собираются» по схеме «звезда» с помощью тиристоров, переведенных в проводящее состояние сигналом управления. При отсутствии сигнала управления тиристоры сохраняют непроводящее состояние, концы обмоток АД электрически не соединены между собой, АД не работает.

5.4.5. Тиристорные пускатели с широтно-импульсным управлением

Тиристорные пускатели с широтно-импульсным управлением являются аппаратами бесконтактной коммутации. Их можно рассматривать как функциональные аналоги магнитных пускателей асинхронных двигателей (см. п. 5.2.9). В зависимости от возможности изменять направление вращения электродвигателя тиристорные пускатели могут быть «неревверсивными» и «реверсивными».

Нереверсивный пускатель не способен изменять направление вращения электродвигателя. В простом варианте исполнения он реализован по силовой схеме тиристорного коммутатора трехфазной цепи (ТКТЦ), приведенной на рис. 5.11.

Реверсивный тиристорный пускатель позволяет изменять порядок чередования фаз трехфазного напряжения, подводимого к электродвигателю. Для

напряжение срабатывания, напряжение отпускания (см. п. 5.2.2) и номинальное напряжение катушки контактора.

Управление контактором осуществляется путем скачкообразного изменения напряжения u_y от 0 до $U_{ном}$ при включении контактора КМ (и электродвигателя М) и скачкообразного изменения u_y от $U_{ном}$ до 0 при отключении контактора (и электродвигателя М). Полярность приложенного к катушке контактора напряжения u_y не влияет на работу контактора, т. к. в контакторе используется нейтральный электромагнитный механизм (см. п. 3.3.6, п. 3.4.6).

Пример применения линейного контактора КМ1 и контактора ускорения КМ2 для пуска асинхронного двигателя с фазным ротором приведен на рис. 5.3а.

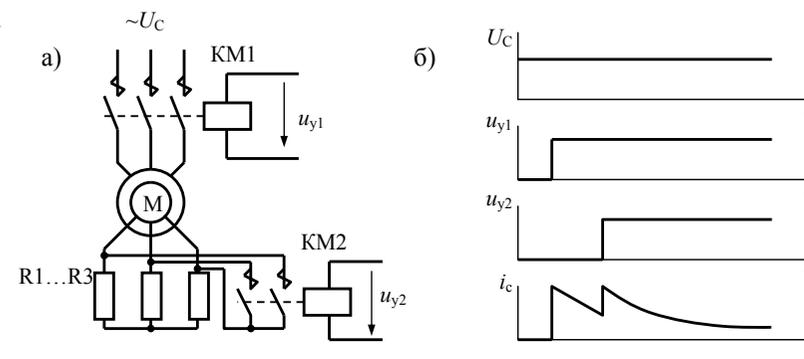


Рис. 5.3. Пример применения контакторов КМ1 и КМ2 для пуска электродвигателя М (а) и временные диаграммы, характеризующие процесс пуска двигателя (б)

Трехполюсный линейный контактор КМ1 своими главными контактами подключает двигатель М на питание от силовой сети с напряжением U_c , когда на катушку контактора КМ1 по цепи управления подается напряжение $u_{y1}=U_{ном1}$. Двухполюсный контактор ускорения КМ2 срабатывает по сигналу $u_{y2}=U_{ном2}$, который подается на его катушку по другой цепи управления через определенное время после включения КМ1. Главными контактами КМ2 отключает резисторы R1, R2, R3 и соединяет в узел концы фазной обмотки. Последовательное срабатывание контакторов КМ1 затем КМ2 приводит к изменению

величины сопротивлений в цепи ротора во время пуска двигателя и ограничению броска пускового тока i_c в цепи статорной обмотки двигателя. Временные диаграммы, характеризующие работу схемы при пуске двигателя М, приведены на рис. 5.3б.

Электродвигатель М перестанет работать и остановится после отключения контактора КМ1 т. е. при $u_{y1}=0$.

Линейный контактор КМ1 переменного тока в схеме на рис. 5.3а может рассматриваться как усилитель электрического сигнала U_{y1} по аналогии с тем, как это представлено для контактора постоянного тока (рис. 5.2а). Характеристика управления контактора КМ1 переменного тока в этом случае аналогична характеристике, показанной на рис. 5.2б в правом квадранте (U_{cp} , U_{om} , $U_{ном}$ – действующие значения напряжения).

В приведенных примерах (рис. 5.2, рис. 5.3) аппараты КМ, КМ1, КМ2 изменяют у силовых цепей коэффициент передачи энергии k_p (см. п. 1.5.3), придавая ему значение либо 0, либо 1. При этом потери электрической энергии в силовых цепях, вызываемые управлением передачей электрической энергии по ним с помощью аппаратов, сведены к минимуму (показано в п. 1.5.3). Характеристики управления всех контакторов могут быть представлены по табл. 1.2 (см. п. 1.6.2) нелинейностями №3 для контактора КМ постоянного тока (рис. 5.2) и №4 для контакторов КМ1, КМ2 переменного тока (рис. 5.3). При этом следует принять входной сигнал $x=u_y$ для КМ, $x=u_{y1}$ для КМ1, $x=u_{y2}$ для КМ2.

5.2.9. Магнитные пускатели

Электромагнитный контактор, предназначенный для пуска и останова асинхронного электродвигателя небольшой мощности, называют *магнитным пускателем*. Примерами служат магнитные пускатели типов ПМЕ, ПМА, ПА и др., допускающие частоту включений до 1200 в час. В большинстве исполнений магнитные пускатели представляют собой комплектные аппараты, в состав которых кроме одного (у нереверсивного пускателя) или двух (у реверсивного пускателя) контакторов могут входить тепловые реле для защиты электродви-

однофазные исполнительные устройства А1, А2, А3 коммутатора, обеспечивают питание (и работу) двигателя М, когда на обмотку катушки электромагнитного аппарата К (реле или контактора) подано напряжение u_y . При отсутствии напряжения ($u_y=0$) двигатель М отключен от питания тиристорными ключами блоков А1, А2, А3.

Для коммутации цепей с токами до 100 А, когда требуется снизить затраты на применяемую бесконтактную технику, применяют ТКЦЦ, подключаемые в расщелку нулевой точки статорных цепей электродвигателя в соответствии с рис. 5.9б (при таком подключении проще устройства защиты ключей – см. п. 4.5.2, п. 4.5.3). На рис. 5.12 представлены функциональные схемы подключения исполнительных устройств ТКЦЦ в расщелку нулевой точки.

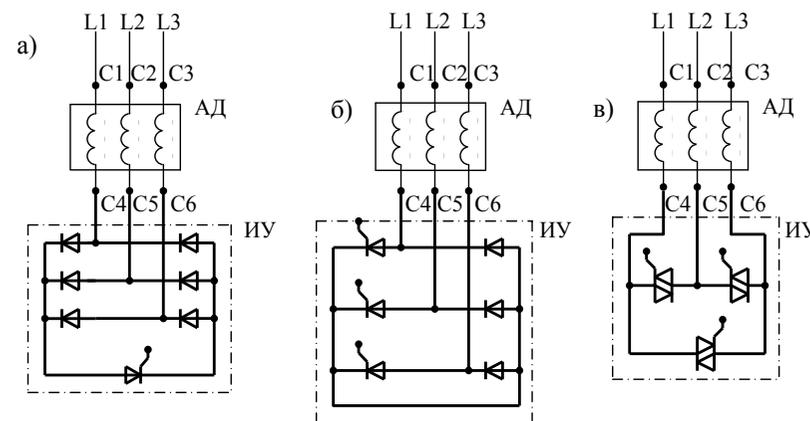


Рис. 5.12. Схемы подключения исполнительного устройства (ИУ) коммутатора в расщелку нулевой точки статорных цепей асинхронного двигателя (АД)

В ИУ на рис. 5.12а применен неуправляемый выпрямитель на диодах. Управление включением и отключением электродвигателя АД производится с помощью тиристора. Когда тиристор открыт, выпрямитель работает в режиме короткого замыкания. При использовании такого ИУ необходимо применять дополнительные меры для запираания тиристора, так как по нему протекает практически постоянный ток.

1) коммутаторы, подключаемые в расщелку линий (L1, L2, L3) питания статорных обмоток электродвигателя (рис. 5.10а);

2) коммутаторы, подключаемые в расщелку нулевой точки статорных цепей (рис. 5.10б).

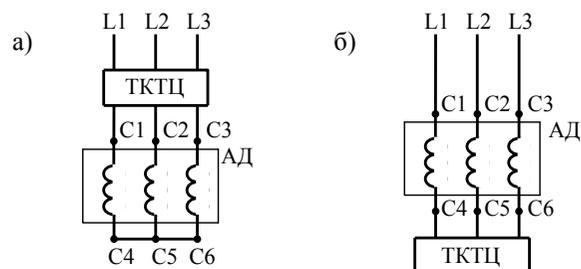


Рис. 5.10. Схемы подключения тиристорного коммутатора трехфазной цепи (ТКТЦ) асинхронного двигателя (АД)

В схеме на рис. 5.10а ТКТЦ подключает статорные обмотки C1-C4, C2-C5, C3-C6 двигателя к соответствующим линиям питания L1, L2, L3 и отключает от них с помощью исполнительного устройства ИУ (см. п. 4.1.2) с тремя тиристорными ключами на однооперационных тиристорах (см. п. 4.4.2). ТКТЦ в этом случае представляет собой комплект из трех коммутаторов переменного тока, каждый из которых реализован по схеме, показанной на рис. 5.8. Исполнительное устройство ТКТЦ может быть реализовано по схеме, представленной на рис. 5.11.

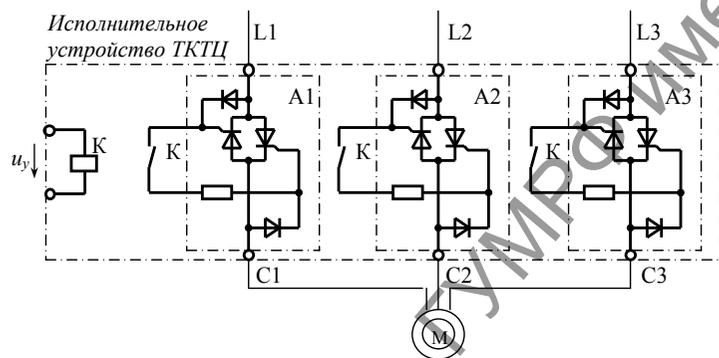


Рис. 5.11. Функциональная схема исполнительного устройства тиристорного коммутатора трехфазной цепи

гателя от перегрузки и «потери фазы», кнопки управления, сигнальные лампы. Магнитный пускатель заключается, как правило, в стальной кожух. Управление им осуществляется с помощью кнопок управления *Пуск*, *Стоп*, *Вперед*, *Назад*.

Магнитным пускателем осуществляется прямой пуск асинхронного электродвигателя путем непосредственного подключения к питающей сети.

На рис. 5.4 приведена электрическая схема реверсивного магнитного пускателя, укомплектованного двумя контакторами, электротепловыми реле (см. п. 7.3.1) и кнопками управления (см. п. 1.3.1, п. 1.3.2)).

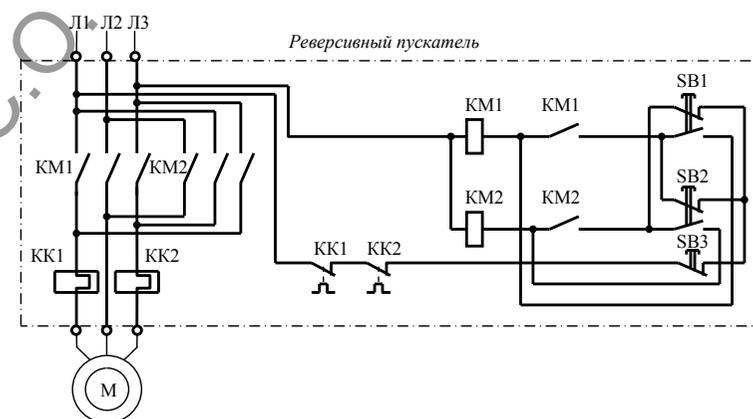


Рис. 5.4. Электрическая схема реверсивного магнитного пускателя с механическим блокированием

На схеме: KM1, KM2 – элементы контакторов; KK1, KK2 – элементы электротепловых реле. Кнопки управления SB1 «Вперед», SB2 «Назад», SB3 «Стоп» закреплены на кожухе пускателя. В ином исполнении пускателя кнопки могут быть объединены в *кнопочный пост* (см. п. 8.2.1), могут располагаться отдельно, например, на пульте управления при дистанционном управлении пускателем.

Обозначим замыкающий контакт буквами ЗК, размыкающий контакт – буквами РК.

При пуске «Вперед» нажатием кнопки SB1 ее контакты изменяют свое положение, и по цепи L1- РК SB3 – РК SB2 – ЗК SB1 – катушка KM1 – РК KK2 –

РК КК1 – Л3 потечет ток. Включится контактор КМ1 и изменит положение своих контактов. Двигатель М теперь подключен главными контактами КМ1 к линиям Л1, Л2, Л3 трехфазной сети. Вспомогательный ЗК КМ1, замкнувшись, поставит на «самоподхват» контактор КМ1, обеспечив питание катушки КМ1 по цепи Л1- РК SB3 – РК SB2 – ЗК КМ1 – катушка КМ1 – РК КК2 – РК КК1 – Л3. Поэтому после отпускания кнопки SB1 питание катушки КМ1 сохранится и контактор КМ1 останется во включенном состоянии. Отключение контактора КМ1 (и двигателя М) произойдет, если разомкнется хотя бы один из контактов РК SB3, РК SB2, РК КК2 или РК КК1. При размыкании РК SB3, РК КК2 или РК КК1 схема вернется в исходное состояние. При размыкании РК SB2 нажатием на кнопку SB2 замкнется ЗК SB2 и по цепи Л1- РК SB3 – РК SB1 – ЗК SB2 – катушка КМ2 – РК КК2 – РК КК1 – Л3 потечет ток включения контактора КМ2. Контактор КМ2, включившись, изменит положение своих контактов и поставит себя на «самоподхват» вспомогательным контактом ЗК КМ2. Двигатель теперь будет получать питание по линиям Л1, Л2, Л3 с измененной последовательностью чередования фаз, что соответствует режиму «Назад». При одновременном нажатии на кнопки SB1 и SB2 катушки контакторов КМ1 и КМ2 будут обесточены. Механическое блокирование контактами кнопок SB1 и SB2 исключает возможность одновременного включения контакторов КМ1 и КМ2.

Промышленность выпускает магнитные пускатели различной комплектности в оболочке (степени защиты IP40, IP54) и без оболочки (IP00, IP20). Например, магнитные пускатели серии ПМЛ изготавливают в семи вариантах комплектации на номинальные токи 10, 16, 25, 40, 63, 80, 125, 160 А. Для защиты трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором от перегрузок и от токов, возникающих при выпадании одной из фаз, используются электротепловые реле серии РТЛ. Реле РТЛ могут крепиться непосредственно к пускателям или устанавливаться индивидуально с помощью специальных устройств (клемников). Пускатели ПМЛ могут быть дополнены приставками, которые увеличивают функциональные возможности пускателя:

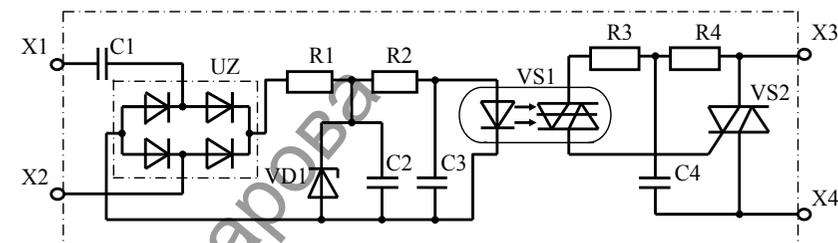


Рис. 5-9. Электрическая схема твердотельного контактора

Оптосимистором VS1 управляет сравнительно небольшой постоянный ток. Входное напряжение гасится до необходимого уровня конденсатором C1, выпрямляется диодным мостом UZ, сглаживается конденсатором C2 и ограничивается стабилитроном VD1. Это постоянное напряжение вызывает включение оптосимистора VS1 (например, типа МОС) и симистора VS2 (например, типа ВТА, который может крепиться на радиатор без изолирующих прокладок). Снабберная цепь R4-C4 обеспечивает безопасную работу симистора VS2 (см. п. 4.5.3).

Твердотельные контакторы, которым придают дополнительные диагностические и/или коммуникационные возможности, называют *интеллектуальными контакторами*. Диагностика может включать в себя контроль неисправности тиристоров, отсутствия нагрузки, контроль перегрева и возникновения других проблем. Интеллектуальные контакторы внедряются в необслуживаемые автоматические станции, в автономные системы управления электродвигателями и нагревателями.

5.4.4. Тиристорные коммутаторы трехфазных цепей асинхронных двигателей

Тиристорный коммутатор трехфазной цепи (ТКТЦ) асинхронного двигателя (АД) предназначен для включения в работу и отключения АД путем бесконтактной коммутации трехфазной цепи тиристорными ключами.

Коммутаторы трехфазных цепей в зависимости от способа подключения ТКТЦ можно разделить на две группы:

5.4.3. Твердотельные контакторы

Твердотельные контакторы (Solid state contactors – SSC) – это класс современных модульных полупроводниковых приборов, выполненных по гибридной технологии. Они содержат в своем составе силовые ключи на симисторных, тиристорных либо транзисторных структурах (см. п. 4.4.1, п. 4.4.4, п. 4.3.1, п.4.3.2). Предназначены для бесконтактной коммутации силовых электрических цепей. Используются для замены традиционных электромагнитных контакторов и магнитных пускателей. Применяются в системах управления работой электродвигателей, трансформаторов, электромагнитов и других объектов.

В твердотельных контакторах (ТТК) обычно используются бескорпусные тиристоры, созданные по гибридной технологии (DCB) с прямым нанесением меди на керамическую основу. Это улучшает теплоотдачу за счет большой площади поверхности прибора и плотного контакта с радиатором. ТТК может иметь приспособление для монтажа на DIN-рейку. Благодаря этим особенностям и компактным размерам, твердотельные контакторы можно быстро и удобно монтировать в электрошкафу, устанавливая их вплотную друг к другу на DIN-рейке.

В системах автоматики ТТК могут применяться совместно с программируемыми логическими контроллерами и персональными компьютерами, генерирующими сигнал «включить-отключить» в виде напряжения постоянного или переменного тока.

Одна из наиболее простых электрических схем ТТК приведена на рис. 5.9. В качестве примера выбран ТТК, коммутирующий цепь переменного тока симисторным ключом.

ТТК подключают к силовой электрической цепи переменного тока с помощью зажимов X3, X4. Управление контактором производится входным переменным напряжением, которое подводится к зажимам X1, X2. При срабатывании контактора открывается маломощный оптосимистор VS1 и силовой симистор VS2 (см. п. 4.4.1).

- при необходимости увеличения количества вспомогательных контактов на пускатель можно устанавливать 2-х, 4-х или 8-контактную приставку серии ПКЛ, ПКБ с различным набором замыкающих и размыкающих контактов (приставка механически соединяется с пускателем и фиксируется при помощи защелки);

- пневматическая приставка выдержки времени серии ПВЛ обеспечивает возможность, наряду с контактами мгновенного действия, иметь контакты с задержкой времени от 0,1 до 180 секунд (предназначена для создания выдержки времени при включении или отключении пускателя);

- для ограничения коммутационных перенапряжений, возникающих на катушке управления при отключении пускателя, на пускателе (со степенью защиты IP00 и IP20) может быть установлена приставка ОПН (она ограничивает перенапряжение до 2-х кратного амплитудного значения напряжения цепи; пускатели с ОПН пригодны для работы в системах управления с применением микропроцессорной техники).

5.3. Разновидности электромагнитных контакторов

5.3.1. Контактторы с жидкометаллическими контактами

Контакторы с жидкометаллическими контактами называют *жидкометаллическими контакторами*²⁴ (ЖМК). Один из вариантов реализации ЖМК приведен на рис. 5.5.

Аппарат включается при подаче по электрической цепи управления (ЭЦУ) напряжения u_y на обмотку катушки 7 электромагнитного привода (см. п. 3.1.3, п. 3.3.1) с якорем 8 и толкателем 6. Якорь втягивается в катушку под действием электромагнитной силы тяги (см. п. 3.3.4) и, перемещая толкатель вверх, сжимает сильфон 5. В результате повышается уровень жидкого металла 3, находящегося в сильфоне и изоляционном кожухе 4. Контактные детали 2 и 1 коммутирующего контакта оказываются погруженными в жидкий металл (проводник электрического тока). Тем самым замыкается силовая электрическая

цепь (ЭЦС) с нагрузкой Z_H , и приложенное напряжение U_C падает на нагрузке Z_H . Нагрузка получает питание по замкнутой контактом цепи.

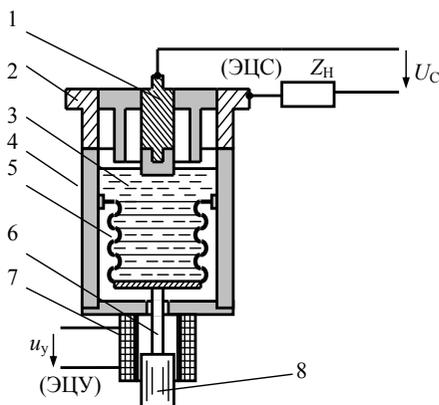


Рис. 5.5. Изобразительная модель контактора с жидкометаллическими контактами

При отключении катушки 7 от питания ($u_y=0$) электромагнитная сила тяги перестанет действовать на якорь 8, и сильфон 5 за счет упругих сил расправится к первоначальному состоянию, снизив уровень жидкого металла в аппарате. Когда уровень опустится ниже контактных деталей 1 и 2, цепь с нагрузкой Z_H окажется разомкнутой. Нагрузка Z_H отключена от питания.

Для гашения электрической дуги, возникающей при размыкании контакта, когда уровень жидкого металла становится ниже контактных деталей 1 и 2, применяется специальное магнитное дутье, создающее магнитный поток в радиальном направлении внутри аппарата (на рис. 5.4 дугогасительное устройство не показано). В магнитном поле дуга вращается, чем обеспечивается ее успешное гашение.

ЖМК коммутирует цепи с токами до 3,1 кА при напряжении 100 В, обеспечивая время гашения дуги до 0,01 с и время включения 0,02 с [5]. В качестве жидкого металла используются ртуть, галлий и его сплавы, а также сплавы щелочных металлов с температурой плавления от минус 68⁰С и ниже.

Достоинства контакторов с ЖМК:

VS2, когда ключ S замкнут по сигналу x на интервале времени значительно превышающем период переменного напряжения коммутируемой цепи.

Тиристорный ключ {VS1, VS2} работает следующим образом.

Каждый тиристор попеременно находится под прямым и под обратным напряжением в соответствующие полупериоды переменного напряжения силовой цепи.

Когда S разомкнут, токи управления тиристорами не вырабатываются и тиристоры сохраняют непроводящее состояние. Силовая цепь разомкнута ключом {VS1, VS2}.

Если S замкнут, то в начале полупериода переменного напряжения, падающего на ключе {VS1, VS2}, откроется тиристор, на котором падает прямое напряжение. Если это тиристор VS1, то он откроется током управления, текущим по цепи «диод VD2 – ограничивающий резистор R – ключ S – управляющий электрод VS1 – анод VS1». Тиристор VS1 останется открытым до конца полупериода переменного напряжения, а затем закроется, так как переменный ток нагрузки уменьшится до нуля. На следующем полупериоде переменного напряжения на тиристоре VS2 будет падать прямое напряжение, и он откроется током управления по цепи «диод VD1 – ключ блока А – ограничивающий резистор R – управляющий электрод VS2 – анод VS2». Тиристор VS2 сохранит открытое состояние до конца полупериода переменного напряжения, а затем закроется. Таким образом, тиристоры VS1 и VS2 будут попеременно открываться и закрываться в начале каждого полупериода переменного напряжения в силовой цепи, пока замкнут ключ S устройства управления УУ (см. рис. 1.6б в п. 1.3.3).

Рассмотренный коммутатор переменного тока (рис. 5.8) положен в основу изготавливаемых промышленностью аппаратов, называемых *тиристорными контакторами с естественной коммутацией*²⁶, например, ТКЕО-250/380, ТКЕП-100/380.

5.4.2. Тиристорный коммутатор цепи переменного тока

В тиристорном коммутаторе переменного тока используется тиристорный ключ, состоящий из двух тиристоров (см. п. 4), включенных встречно-параллельно в силовую электрическую цепь. Коммутатор представлен электрической схемой дистанционно управляемого аппарата (АДУ), на рис. 1.6а в п. 1.3.3. Он выполняет подключение нагрузки R_H на питание от источника электрической энергии (ИЭЭ) и отключение нагрузки по сигналу управления (x), осуществляя бесконтактную коммутацию электрической цепи переменного тока. Функциональная схема коммутатора представлена на рис. 5.8.

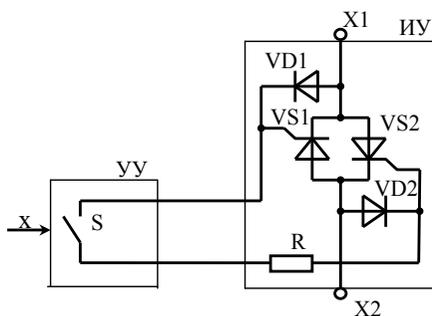


Рис. 5.8. Функциональная схема коммутатора переменного тока

Выделим в коммутаторе две основные части – исполнительное устройство ИУ и устройство управления УУ (см. п. 4.1.1).

Исполнительное устройство ИУ коммутатора подключают к коммутируемой им силовой электрической цепи при помощи зажимов X_1 , X_2 (см. п. 4.1.2). Как правило, используется последовательная схема подключения (см. п. 1.5.2).

В устройстве управления УУ (см. п. 4.1.3) выделен ключ S , который замыкает цепь управления исполнительным устройством ИУ по сигналу x от внешнего источника управляющего воздействия, например, от человека-оператора или/и, например, от аппарата защиты (см. п.1.4.2). Устройство управления реализуется *широтно-импульсное управление* тиристорами VS_1 и

- снижение потребления электроэнергии при коммутации силовых цепей;
- отсутствие вибрации и свариваемости контактов;
- независимость контактного сопротивления от контактного нажатия;
- независимость состояния контактной поверхности от количества срабатываний;
- возможность регенерации контактного материала в процессе коммутации;
- возможность циркуляции жидкого металла с целью интенсификации охлаждения контактного узла.

Одним из основных недостатков ЖМК является зависимость их работоспособности от положения в пространстве. От этого недостатка свободны композиционные ЖМК, контактный материал которых состоит из пористого каркаса, пропитанного легкоплавким металлом или сплавом.

5.3.2. Вакуумные контакторы

*Вакуумные контакторы*²⁴ имеют контактные системы с герметизированными камерами, в которых находятся главные контакты. Давление газа в камере может быть снижено до $10^{-6} \dots 10^{-8}$ Па. Электрическая дуга, возникающая при размыкании контакта, отделена от внешней среды стенками камеры. Ток *вакуумной дуги* протекает за счет эмитированных с катода (т. е. с соответствующей контактной детали) электронов. Совместно с парами металла свободные электроны образуют газоразрядную среду, в которой горит электрическая дуга.

Вакуум обладает высокой способностью восстанавливать электрическую прочность зазора между контактными деталями. Поэтому при переменном токе (50 Гц) продолжительность горения вакуумной дуги не превышает 0,01 с (дуга гаснет при первом переходе тока через нулевое значение).

Вследствие интенсивной деионизации и быстрого роста сопротивления дугового канала гашение дуги в вакууме сопровождается резким изменением силы тока i в цепи, что вызывает перенапряжение $U_{max}=L(di/dt)$ на контактных поверхностях контакта (здесь L – индуктивность цепи).

Вакуумные контакторы серии КДВ на 660 В и 1140 В рассчитаны на номинальные токи 63, 160, 400 А. Их включающая способность определяется силой тока до 8800 А, отключающая способность – до 4800 А.

5.3.3. Силовые герметизированные контакторы

Силовые герметизированные контакторы – герсиконы разработаны на основе модернизации герконов (см. п.3.8). На рис. 5.6 иллюстрируется один из принципов построения герсикона.

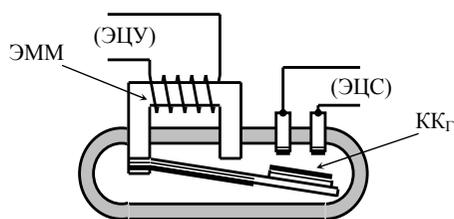


Рис. 5.6. Изобразительная модель герсикона

В герметичный стеклянный баллон впаян П-образный магнитопровод электромагнитного механизма ЭММ (см. п. 3.3.1, п. 3.3.2), обмотка катушки которого входит в состав электрической цепи управления (ЭЦУ). Якорь ЭММ в виде пластины выполнен из упругого ферромагнитного материала и закреплен на левом полюсе магнитопровода. При свободном состоянии якоря между ним и правым полюсом магнитопровода есть зазор. На правом конце якоря расположена токопроводящая контактная деталь, изолированная от пластины якоря (контактный мостик). Когда на катушку ЭММ подается напряжение по цепи ЭЦУ, якорь под действием возникшей электромагнитной силы притягивается к правому полюсу ЭММ (см. п. 3.3.2), и контактный мостик, перемещаясь вместе с якорем, переключает встроенные в баллон неподвижные контактные детали коммутирующего контакта ККГ, замыкая тем самым силовую электрическую цепь (ЭЦС). При отключении катушки ЭММ от напряжения электромагнитная

– резистор R, ограничивающий силу тока управления тиристором, – замкнутый контакт SB1 – управляющий электрод тиристора VS1 – «-» источника напряжения U. Теперь по силовой цепи «+» источника напряжения U – нагрузка R_н – тиристор VS1 – «-» источника напряжения U потечет ток i_n . Нагрузка R_н включена, ей передается электрическая энергия от источника U, напряжение U падает на R_н. Конденсатор C зарядится до напряжения U током, протекающим по резистору R. Полученное состояние схемы сохранится до тех пор, пока не будет подана команда на отключение нагрузки с помощью кнопки управления SB2.

При кратковременном нажатии на кнопку управления SB2 откроется тиристор VS2 током, протекающим по цепи: «+» источника напряжения U – резистор R – замкнутый контакт SB2 – управляющий электрод VS2 – «-» источника напряжения U. Конденсатор C разрядится по цепи: левая обкладка C – тиристор VS2 – тиристор VS1 – правая обкладка C. Результирующий ток через тиристор VS1 снизится до нулевого значения, тиристор VS1 закроется и останется в непроводящем состоянии. Тиристор VS2 также закроется, перейдя в непроводящее состояние. Нагрузка R_н теперь отключена от питания, $i_n=0$, энергия нагрузке R_н не передается от источника U.

Работа коммутатора представлена с помощью временных диаграмм на рис. 5.7б.

Кнопки управления SB1 и SB2 могут иметь дистанционную электрическую связь с силовой частью коммутатора по электрической цепи управления.

В качестве нагрузки силовой цепи коммутатора может быть использован электродвигатель постоянного тока. В таком случае коммутатор можно рассматривать как *неревверсивный тиристорный пускатель*, осуществляющий пуск и останов электродвигателя постоянного тока. В некоторых пускателях формирование сигналов управления тиристорами VS1 и VS2 выполняется с применением специальной *системы импульсного управления* (см. п. 4.1.3) вместо кнопок SB1 и SB2 как на рис. 5.7а.

типа КП81. Они рассчитаны на номинальные токи 160...630 А при напряжении 220 В, имеют электрическую износостойкость более 5 млн. циклов при частоте до 2000 включений в час.

К числу *бездуговых контакторов* относят гибридные контакторы серий БКБ, КБК, МК2-20Е, МК2-30Е, МК3-30Е на номинальные токи 63...250 А при напряжении 380 и 660 В.

5.4. Бесконтактные коммутаторы и пускатели

5.4.1. Тиристорный коммутатор цепи постоянного тока

Тиристорный коммутатор²⁵ производит коммутацию электрической цепи с помощью тиристора (см. п. 4). Тиристорный коммутатор функционально подобен электромагнитному контактору с замыкающим главным контактом. Для цепи с нагрузкой постоянного тока тиристорный коммутатор представлен упрощенной электрической схемой на рис.5.7а.

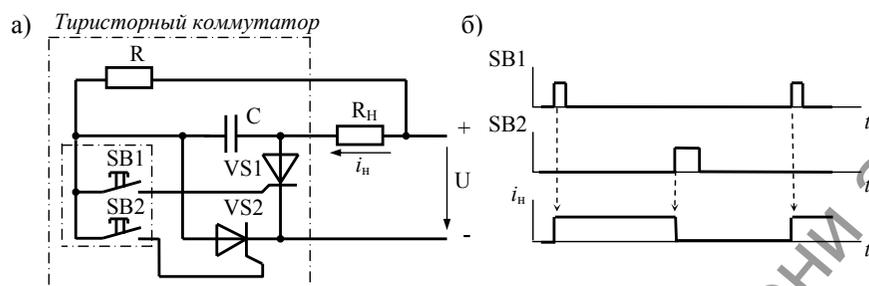


Рис. 5.7. Тиристорный коммутатор цепи постоянного тока: а) упрощенная электрическая схема, б) временные диаграммы работы

В исходном состоянии коммутатора тиристор VS1 закрыт, на нем падает напряжение U , тока в нагрузке R_n нет (она отключена), конденсатор C не заряжен. Включение нагрузки R_n на питание от источника напряжения U постоянного тока и отключение от питания осуществляется тиристором VS1 по сигналам-командам, подаваемым с помощью кнопок управления SB1 и SB2.

При кратковременном нажатии на кнопку SB1 (см. п. 1.3.1, рис. 1.4) тиристор VS1 откроется током, протекающим по цепи: «+» источника напряжения U

сила перестает действовать на якорь, и он упругими силами отрывается от правого полюса магнитопровода. Контакт КК_Г размыкается, разрывая цепь ЭЦС.

Промышленный образец терсикона КМГ-12 для тока 6,3 А и напряжения 440 В приводится в действие магнитодвижущей силой срабатывания 350 А при мощности обмотки катушки 1,8 Вт. Время срабатывания 1...10 мс. Переходное сопротивление 0,007 Ом. Износостойкость 10^7 срабатываний. Частота коммутаций до 1200 в час [5].

5.3.4. Синхронные контакторы

Синхронные контакторы обладают способностью размыкать контакты незадолго до перехода переменного тока через нулевое значение. В этом случае ствол возникшей электрической дуги не успевает существенно разогреться и аккумулировать в своем объеме значительный запас теплоты. Эта теплота быстро рассеивается вблизи перехода тока через нулевое значение, а электрическая прочность в зазоре контакта приобретает более высокие значения, чем падение напряжения (см. п. 2.4.4). Создаются условия, при которых дуга гасится, не успев разогреться. Цепь разрывается контактом практически без дуги.

Существует несколько принципов синхронизации момента размыкания контакта с моментом перехода тока через нулевое значение. Например, если участок электрической цепи активно-индуктивный, то напряжение опережает по фазе ток, протекающий по этому участку. Следовательно, напряжение на этом участке будет несколько раньше достигать нулевого значения, чем ток. Напряжение контролируется специальным нуль-органом. Он срабатывает, когда напряжение достигает нулевого значения и подает сигнал на отключение аппарата (до перехода тока через нулевое значение). Чтобы исключить влияние инерционности всей подвижной системы аппарата на точность синхронизации, разработаны синхронизирующие устройства, встраиваемые непосредственно в контакты аппарата [5].

5.3.5. Гибридные контакторы

Гибридные контакторы называют также бездуговыми контакторами [1]. Они выполнены на основе электромагнитных контакторов. Их особенность заключается в том, что каждый главный контакт снабжен *полупроводниковой приставкой*, подключенной параллельно контакту. Приставка предназначена для проведения через себя тока во время размыкания контакта. При этом электрическая дуга (см. п. 2.4.4) имеет место на контакте в течение короткого промежутка времени, пока ток с контакта переходит в полупроводниковую приставку. Обычно тиристор используется в полупроводниковой приставке для шунтирования контакта на время его размыкания. В гибридных контакторах переменного тока используются на один контакт два тиристора, включенных встречно-параллельно для того, чтобы ток мог протекать по цепи в обоих направлениях.

Упрощенная функциональная схема узла коммутации одной фазы силовой цепи (ЭЦС) питания электродвигателя М с гибридным контактором переменного тока представлена на рис. 5.6.

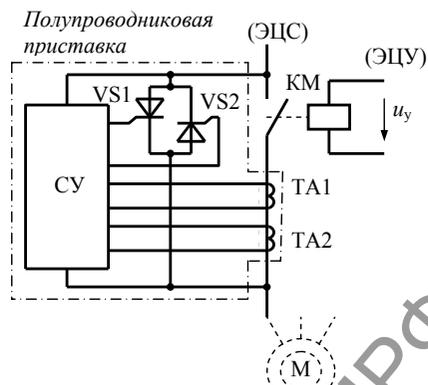


Рис 5.6. Функциональная схема узла коммутации с гибридным контактором переменного тока

В состав гибридного контактора кроме электромагнитного контактора КМ входит полупроводниковая приставка ПП с двумя трансформаторами тока

ТА1 и ТА2 (для двигателя М показана только одна фаза коммутируемой трехфазной цепи питания электродвигателя). В рассматриваемом случае в ПП использован тиристорный ключ, состоящий из двух силовых однооперационных тиристоров. Управление каждым тиристором осуществляет система управления (СУ) по сигналу, принимаемому от соответствующего трансформатора тока. Формируемые системой СУ токи управления поступают на управляющие электроды тиристоров.

При включенном КМ (напряжение u_y приложено к катушке КМ по цепи управления ЭЦУ) ток силовой цепи проводит главный контакт КМ, а тиристоры закрыты, так как анодное напряжение на них (между анодом и катодом) меньше порогового значения (примерно 1 В) из-за малого сопротивления (R_K), создаваемого в ЭЦС замкнутым контактом КМ.

При отключении контактора КМ ($u_y = 0$) его контакт размыкается, и между контактными деталями появляется электрическая дуга (см. п. 2.4.1, п. 2.4.2). Когда напряжение на дуге превысит пороговое для тиристора значение, ток управления, создаваемый системой управления СУ, откроет тиристор, находящийся в данный момент под прямым напряжением. Открывшийся тиристор будет проводить через себя ток ЭЦС до конца полупериода переменного тока. Затем тиристор перейдет в непроводящее состояние. Поскольку при открытом тиристоре ток с контакта КМ перешел в тиристор, дуга на контакте быстро гаснет. Теперь трансформаторы ТА1, ТА2 не вырабатывают в своих вторичных обмотках сигналы для СУ, и СУ больше не формирует токи управления тиристорами. Поэтому тиристоры будут сохранять непроводящее состояние. Таким образом, ток в цепи ЭЦС отключается в течение полупериода, и электрическая дуга может гореть при частоте тока 50 Гц не более 0,01 с.

На переменном токе применяют гибридные контакторы серий КТ и КТП, рассчитанные на номинальные токи от 160 до 630 А при напряжении 380 или 660 В и допустимой частотой включений не более 2000 в час.

Гибридные контакторы применяют также для коммутации цепей постоянного тока. Например, разработаны гибридные контакторы постоянного тока