

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ВОДНЫХ
КОММУНИКАЦИЙ»

В. О. Тырва

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ
АППАРАТЫ**

Часть 2

**АППАРАТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НИЗКОГО
НАПРЯЖЕНИЯ**

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом
Санкт-Петербургского государственного университета водных
коммуникаций*

Санкт-Петербург
2010

УДК 621.31

ББК 31.264

Рецензенты:

доцент кафедры электропривода и электрооборудования береговых установок СПГУВК, кандидат технических наук

А. В. Саушев;

ведущий инженер электротехнического отдела ФГУП

Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения, Проектная фирма «Союзпроектверфь»

Е. В. Благинин

Тырва В. О.

Электрические и электронные аппараты. Часть 2. Аппараты электроприводов и распределительных устройств низкого напряжения: учеб. пособие. — СПб.: СПГУВК, 2010. — 191 с.

Представлено описание электрических и электронных аппаратов, применяемых в электроприводах и системах автоматики на водном транспорте. Приведены изобразительные модели, схемы и характеристики аппаратов.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

УДК 621.31

ББК 31.264

© Тырва В. О., 2010

© Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций, 2010

Предисловие

Учебное пособие подготовлено для студентов СПГУВК по специальности «Электропривол и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». В нем рассмотрены электрические и электронные аппараты, применяемые в электроприводах и других электромеханических системах объектов водного транспорта.

По признакам функционального назначения и взаимодействия с другими элементами системы аппараты разбиты на группы: контакторы, пускатели, реле, аппараты защиты, командоаппараты, электромагнитные тормозы и муфты, измерительные преобразователи и датчики.

Электрические и электронные аппараты каждой группы, именуемые электроаппаратами, рассматриваются с двух позиций. Каждый электроаппарат представляется элементом системы. Выделяются и характеризуются его связи с другими элементами системы. Учитываются особенности функционирования аппарата, обусловленные связями по входам и по выходам аппарата. Также, каждый аппарат представляется определенной совокупностью функциональных частей, обеспечивающих при своем взаимодействии требуемое функционирование аппарата. Такими функциональными частями являются коммутирующие контакты, электромагнитные механизмы, механические передачи, электронные ключи, формирователи импульсов управления, интегрированные функциональные элементы. Эти типовые части электроаппаратов рассмотрены в учебном пособии автора «Электрические и электронные аппараты – Элементы и узлы электроаппаратов» [1]. Там же приведены исходные понятия и определения, дана классификация электроаппаратов. Поэтому при изучении электроаппаратов в предлагаемом ниже изложении можно использовать упомянутое учебное пособие в качестве основного источника информации, необходимой для освоения представленного материала.

1. Представление аппарата элементом системы управления

1.1. Электроаппарат в системе управления

Электроаппараты предназначены для управления¹ передачей энергии (и информации²) в технической системе (см. [1] п.1). Они применяются в системах управления электроприводов для создания управляющих воздействий на электрические и кинематические цепи привода. Объектами управления для электроаппаратов в электроприводах и в различных электроустановках 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 при управлении передачей энергии, показаны на рис. 1.1.

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. 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.

¹ Управление можно представить как такую организацию того или иного процесса, которая обеспечивает достижение определенных целей – см. Основы автоматического управления. Под редакцией В.С. Пугачева. – М, Физматгиз, 1961.

² 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. там же.

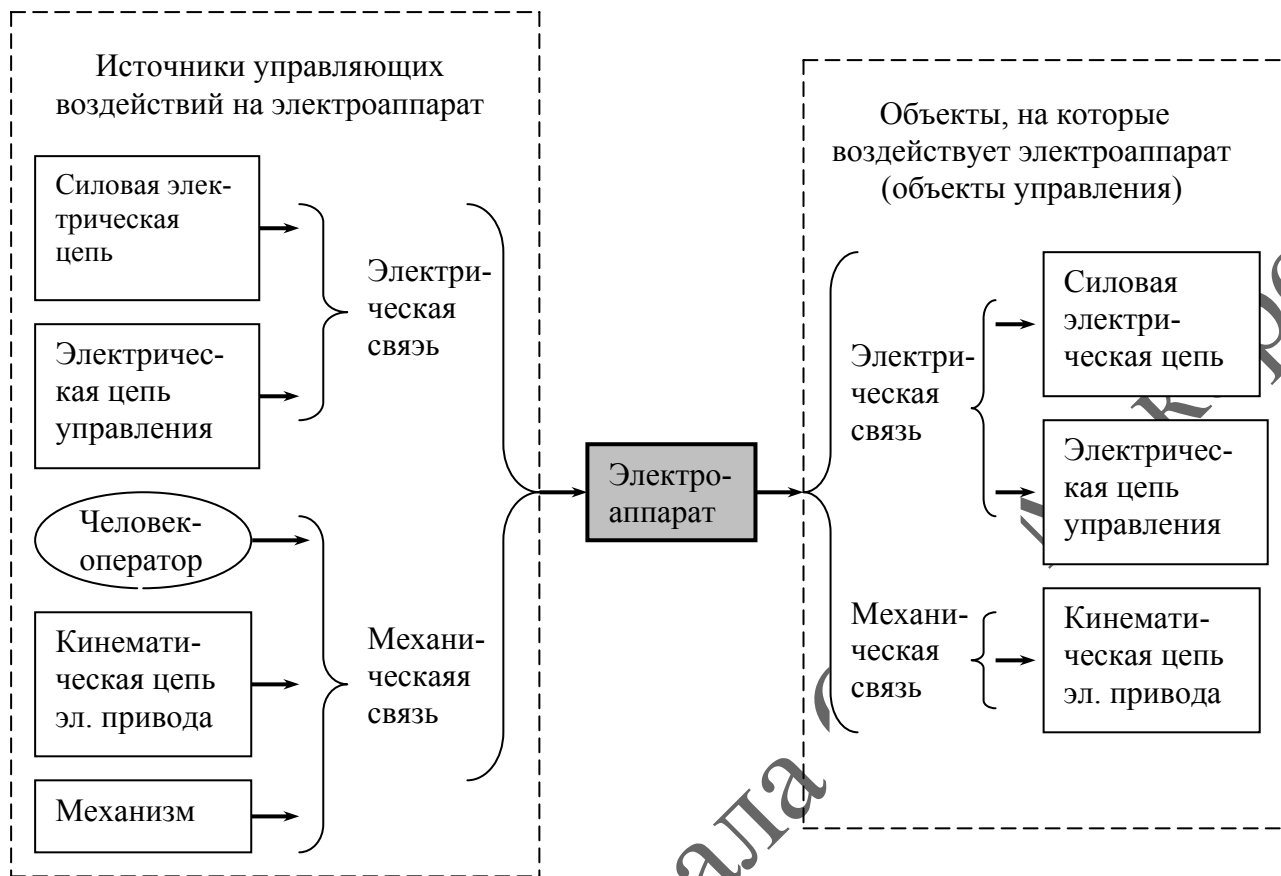


Рис. 1.1. Обобщенная схема связей электроаппарата в системе управления электропривода

Входные и выходные воздействия аппарата характеризуются физическими величинами, например, величиной электрического напряжения, силой тока, значением крутящего момента и др. Когда хотят выделить информационную сторону воздействия, слово «воздействие» заменяют словом «сигнал³». Информация передается сигналом с помощью *носителя информации* (сигналоносителя⁴) – электрического напряжения, тока, крутящего момента и т.п.

³ 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.

⁴ См. Шульц Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков: Справочник: Пер. с нем. – Энергоатомиздат, 1989.

Исходя из вышеизложенного, представим электроаппарат в качестве элемента системы управления с помощью структурной схемы (рис. 1.2а).

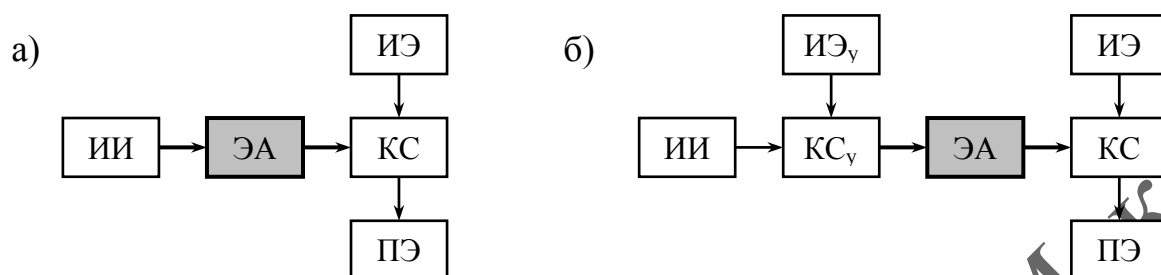


Рис. 1.2. Представление электроаппарата в качестве элемента системы управления передачей энергии

Электроаппарат (ЭА) через *канал связи*⁵ (КС) воздействует на приемник энергии (ПЭ). Необходимая энергия воздействия 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, по которой электрическая энергия передается от ИЭ к ПЭ.

Для систем автоматического управления приемник ПЭ (рис. 1.2) часто выделяют как объект управления. В таких случаях электроаппарат ЭА рассматривают совместно с каналом связи КС и воздействием от источника электрической энергии ИЭ, представляя его *усилителем* входного сигнала малой мощности (например, при непрямом регулировании). Выход усилителя является одновременно входом объекта управления, то есть приемника ПЭ.

Выходное воздействие на объект ЭА формирует по входному сигналу, поступающему от источника информации (ИИ). Этот сигнал в зависимости от типа источника ИИ может содержать информацию о задаче

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.

управления, о результате управления, о параметрах внешней среды и т.д. По отношению к ИИ аппарат ЭА является приемником информации.

В автоматизированных электроприводах и системах автоматики информацию о результатах управления и о параметрах внешней среды получают с помощью *измерительных преобразователей*⁶ (датчиков). В таких случаях совокупность элементов {ИИ, КС_у, ИЭ_у} на рис. 1.2б, когда в качестве КС_у используется электрическая цепь управления (ЭЦУ), а в качестве ИЭ_у – источник электрической энергии (ИЭЭ), представляет собой *электрический датчик*. В его составе ИИ исполняет роль *первичного измерительного преобразователя* электрической или неэлектрической величины в электрическую величину и является электроаппаратом по определению.

На электроаппарат, действующий в системе, возлагается решение определенных *задач управления*, к числу которых относятся:

подключение приемника энергии на питание от источника энергии и отключение приемника в эксплуатационных режимах работы системы;

отключение приемника от питания при возникновении ненормальных и аварийных режимов работы;

регулирование по определенному закону или поддержание на определенном уровне значения какого-либо параметра электрической или механической энергии в соответствующей цепи;

получение информации о результатах управления объектом в виде сигналов, удобных для использования в системе управления и др.

⁶ *Измерительный преобразователь* – 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 (см. Семенов С. П., Горейченко А. В., Богачев Э. Ю. Судовые электроизмерительные приборы и информационные системы. Учебник. – М.: Транспорт, 1982).

Измерительные преобразователи имеют разные наименования в разных научных дисциплинах. Термин *датчик* часто употребляется как синоним общего термина *преобразователь*. Преобразователи с неэлектрическим выходом применяются в качестве *чувствительных элементов* измерительных преобразователей (*электрических датчиков*) – см. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

Управление передачей энергии от источника энергии (например, от силовой сети) по электрической цепи до приемника энергии (например, до электродвигателя) может состояться только в том случае, если источник энергии (ИЭ на рис. 1.2) находится в рабочем состоянии, например, создает электродвижущую силу (ЭДС) в электрической цепи.

Представим действие источника электрической энергии с помощью внешней характеристики, как показано на рис. 1.3.

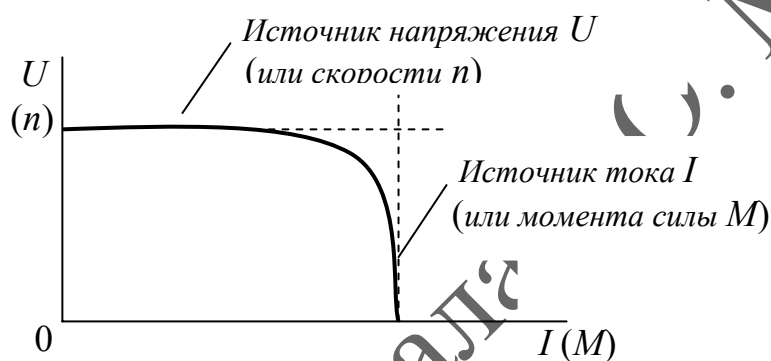


Рис. 1.3. Типовая внешняя характеристика источника энергии

На определенных участках внешней 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 (или момента силы M) можно выполнить по рис. 1.3 для источника механической энергии. Например, если в электроприводе источником механической энергии служит электродвигатель, то его *механическая характеристика* $n=f(M)$, т. е. зависимость скорости вращения n от момента M на валу может иметь два характерных участка, на одном из которых n не зависит от M , на другом M не зависит от n . На первом участке электродвигатель работает как источник скорости n , на втором – как источник силы, точнее, момента силы M . Механическая характеристика идеального источника напряжения или скорости показана

на рис. 1.3 горизонтальной пунктирной линией, а идеального источника тока или момента силы – вертикальной пунктирной линией.

1.2. Узлы с дистанционно управляемыми аппаратами, комплектные аппараты

Для того, чтобы человек-оператор (ЧО) мог управлять передачей энергии по силовой электрической (ЭЦС) и по кинематической (КЦС) цепям электропривода, находясь на удалении от них, применяется система дистанционного управления с несколькими электроаппаратами, например, которая представлена структурной схемой на рис. 1.4.

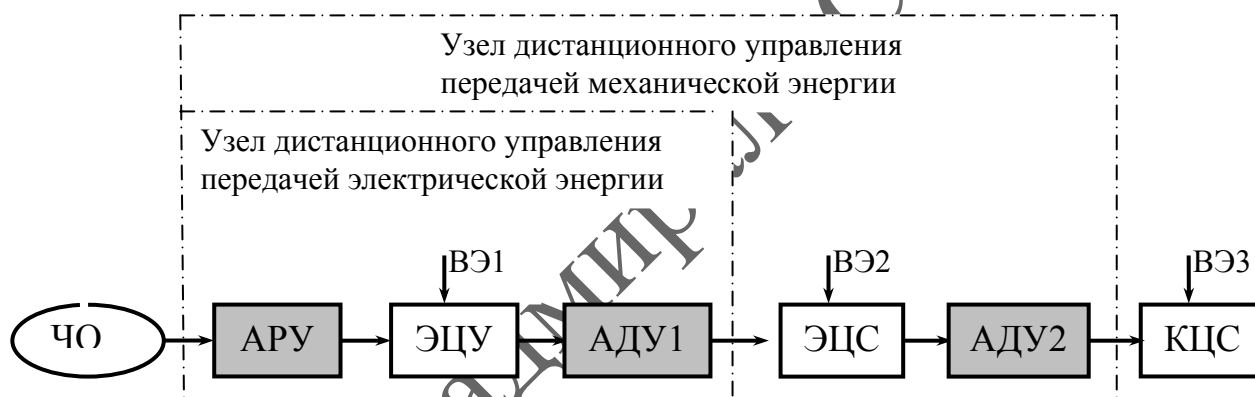


Рис. 1.4. Схема системы дистанционного управления передачей энергии

В состав простой системы дистанционного управления (рис. 1.4) входит аппарат ручного управления (АРУ) и дистанционно управляемые аппараты (АДУ1, АДУ2). Сигнал с АРУ в АДУ1 обычно передается по слаботочной электрической цепи – цепи управления (ЭЦУ). Энергия, необходимая для передачи сигнала по ЭЦУ, вводится в цепь от источника электрической энергии. Соответствующее воздействие на цепь источником энергии, не является управляющим воздействием и отмечено на рис. 1.3 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 приемником электрической энергии и информации является аппарат АДУ2. Энергии в цепь ЭЦС передается воздействием (ВЭ2) от источника электрической энергии силовой цепи. По входному сигналу из ЭЦС аппарат АДУ2 формирует на своем выходе механическое воздействие на кинематическую цепь (КЦС). Источник энергии кинематической цепи создает воздействие (ВЭ3).

В системе дистанционного управления на рис. 1.4 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 аппаратов АРУ, АДУ1, АДУ2, обеспечивает дистанционное управление передачей энергии по кинематической цепи.

Аппараты АРУ и АДУ1 конструктивно могут быть размещены на одной плате и иметь общую оболочку. Тогда они в совокупности рассматриваются как один электроаппарат, который называют *комплектным аппаратом*. В электроприводе комплектным аппаратом является *пускатель*. Он предназначен для пуска, остановки и в некоторых случаях реверсирования электродвигателя. Структурная схема простого пускателя показана сплошными линиями на рис. 1.4.

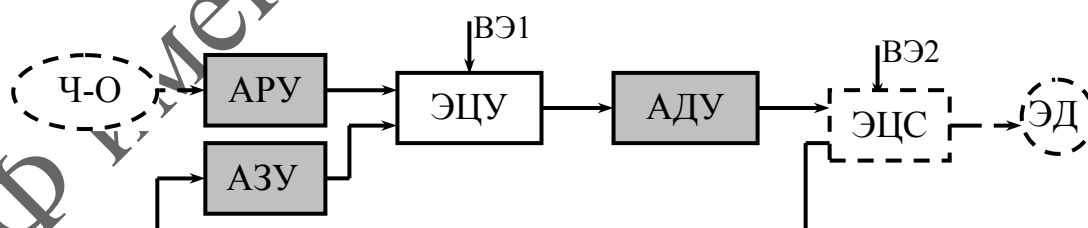


Рис. 1.5. Схема узла дистанционного управления и защиты

В составе пускателя обычно предусматривают аппарат (АЗУ), который выполняет функцию автоматической защиты электродвигателя (ЭД) привода от токов перегрузки, вызывающих повышенный нагрев двигателя.

АЗУ через ЭЦУ подает аппарату АДУ сигнал на отключение питания двигателя ЭД по цепи ЭЦС.

1.3. Особенности преобразования входных воздействий аппаратами

Входное воздействие x и выходное воздействие y (сигналы) электроаппарата характеризуются физическими величинами (*переменными* – силой, скоростью, электрическим напряжением и др.), изменяющимися во времени. Они представляются в виде функций времени $x(t)$, $y(t)$. Преобразование входного сигнала в выходное воздействие $x(t) \rightarrow y(t)$ характеризуется оператором G_t : $y(t) = G_t[x(t)]$ (см. [1] п. 1.1). По характеру преобразования входного сигнала в выходное воздействие аппарат может рассматриваться как *линейный* или как *нелинейный* элемент системы управления.

Аппарат, характеризуемый оператором G_t , считают линейным элементом системы, если для него выполняется принцип суперпозиции⁷

$$y(t) = G_t[x(t)] = G_t[c_1 x_1(t) + c_2 x_2(t)] = c_1 G_t[x_1(t)] + c_2 G_t[x_2(t)],$$

где $x(t)$ – входной сигнал, представляемый в виде линейной комбинации двух входных сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$; c_1, c_2 – любые действительные числа; $y(t)$ – сигнал на выходе. Для такого аппарата статическая характеристика $y=f(x)$ – *характеристика управления* представляет собой линейную функцию, например, $y=k \cdot x$ (k – размерный коэффициент).

Аппарат является нелинейным элементом системы, если принцип суперпозиции для его оператора G_t не выполняется. Его характеристика управления в этом случае нелинейная.

Реальные электроаппараты, строго говоря, в большинстве случаев нелинейные, и лишь в известных пределах их можно считать линейными. Так, например, закон Ома определяет линейную зависимость падения напряжения на сопротивлении от силы тока. Однако в действительности со-

⁷ См., например, Основы автоматического управления. Под редакцией В.С. Пугачева. – М, Физматгиз, 1964.

противление 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 нелинейностями*. Они при малом диапазоне изменения входного сигнала могут быть заменены линейными зависимостями.

Аппараты с *существенными нелинейностями* имеют характеристики управления, в которых зависимость выходной переменной от входной переменной представлена, например, в виде кусочно-постоянной функции. Преобразование любого входного сигнала такими нелинейными аппаратами всегда нелинейное. Существенные нелинейности имеют аппараты с коммутирующими контактами и электронными ключами на своих выходах. У некоторых аппаратов (например, с электромагнитными механизмами) выходная переменная y зависит не только от значения входной переменной x , но и от направления ее изменения, т. е. от знака скорости dx/dt .

По классификации элементов систем управления в зависимости от количества входов и выходов электроаппараты могут рассматриваться как одномерные или как многомерные устройства. Одномерный электроаппарат имеет только один вход и только один выход. Многомерный аппарат имеет, по крайней мере, два входа или два выхода. Количество входов и выходов у многомерного аппарата может быть значительно больше двух. При выделении входов и выходов учитываются каналы связи аппарата с другими элементами системы, в которой он функционирует.

Рассмотренные в последующих разделах электроаппараты в большинстве являются нелинейными и многомерными элементами систем управления. К линейным элементам систем можно при определенных ус-

ловиях отнести аппараты непрерывного действия⁸, которые рассмотрены в разделах 7 и 8.

1.4. Основные требования, предъявляемые к аппаратам

Требования, предъявляемые к электроаппаратам (ЭА), чрезвычайно разнообразны и зависят от назначения, условий применения и эксплуатации аппарата.

Кроме специфических требований, относящихся к данному ЭА, все электроаппараты должны удовлетворять некоторым общим требованиям [4]:

- температура нагрева токоведущих частей ЭА, работающего в номинальном режиме, не должна превышать установленного допустимого значения;
- при возникновении ненормальных режимов (например, токов перегрузки или короткого замыкания) ЭА должен выдерживать термические и электродинамические воздействия тока без деформации деталей и нарушения свойств изоляции, препятствующих эксплуатации ЭА;
- ЭА должен надежно работать при колебаниях напряжения в сети в заданных пределах относительно номинального значения (от $0,85U_{\text{ном}}$ до $1,1U_{\text{ном}}$);
- изоляция частей ЭА должна обеспечивать надежную работу аппарата при максимально допустимых напряжениях;
- контакты электромеханических аппаратов должны включать и отключать все токи рабочих режимов, а также токи аварийных режимов, которые могут возникать в электрических цепях; в аппаратах с полупроводниковыми элементами должны быть предусмотрены соответствующие защиты от сверхтоков и перенапряжений в аварийных режимах;

⁸ Аппарат в составе технической системы считается аппаратом непрерывного действия, если его входные и выходные переменные представлены в непрерывной форме.

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

1.5. Общие условия выбора электроаппарата для системы управления

При выборе электроаппарата нужно:

- иметь необходимые сведения о той системе (электроустановке), в которой должен функционировать аппарат, в том числе и об элементах системы (см. п. 1.1), с которыми он должен взаимодействовать при выполнении своей функции управления передачей энергии и информации, в том числе:

- об источниках энергии и информации (например, человек-оператор, силовая электрическая сеть, электродвигатель и т. п.);

- о приемниках энергии и информации (например, электродвигатель, другой электроаппарат, электронное устройство системы управления, рабочий орган производственного механизма и т. п.);

- о каналах передачи энергии и информации (электрические цепи, кинематические цепи);

- определить и учесть требования, предъявляемые к аппарату, и цель, в соответствии с которой он должен функционировать (например, включить и отключить электродвигатель или другой аппарат в эксплуатационных режимах работы, отключить объект от электропитания при возникновении короткого замыкания или перегрузки, получить информацию о каком-либо параметре электрической или кинематической цепи и т. п.);

- располагать сведениями о производимых промышленностью аппаратах, особенностях их функционирования, характеристиках и областях применения; ограничить номенклатуру аппаратов, удовлетворяющих исходным требованиям; провести технико-экономический анализ для принятия решения о выборе конкретного аппарата;

- учесть:
 - коммутируемые аппаратом токи, напряжения и мощности;
 - напряжения и токи цепей управления;
 - напряжение катушки аппарата;
 - число коммутируемых цепей;
 - параметры и характер нагрузки – активная, индуктивная, емкостная, низкого или высокого напряжения и др.;
 - режим работы аппарата – кратковременный, длительный, повторно-кратковременный;
 - удобство сопряжения и электромагнитную совместимость с другими аппаратами и устройствами;
 - динамические показатели (например, собственное время включения, собственное время отключения, постоянная времени и др.);
 - погрешности преобразования входных сигналов управления в сигналы на выходе (для измерительных преобразователей и датчиков);
 - стойкость к электрическим, механическим и термическим перегрузкам;
 - условия работы аппарата – температура, влажность, давление, наличие вибрации и др.;
 - способы крепления аппарата;
 - экономические и массогабаритные показатели;
 - климатическое исполнение и категория размещения;
 - степени защиты IP;
 - требования техники безопасности и др.

Аппарат выбирают по номинальному напряжению так, чтобы выполнялось условие

$$U_{уст. ном} \leq U_{ап. ном} ,$$

где $U_{уст. ном}$ – номинальное напряжение электроустановки;

$U_{ан.ном}$ – номинальное напряжение аппарата (указывается на его щитке).

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

Аппарат выбирают по номинальному току из условия

$$I_{н. макс} \leq I_{ан. ном} ,$$

где $I_{н. макс}$ – максимальный длительный ток нагрузки цепи;

$I_{ан.ном}$ – номинальный ток аппарата, т.е. ток, который аппарат может выдержать длительное время, если температура окружающей среды не превышает расчетную температуру.

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

Аппарат может работать и при температуре окружающей среды большей чем расчетная температура $t^{\circ}_{расч}$, но при этом наибольший допускаемый ток на аппарат $I_{раб}$ должен быть меньше номинального тока. Обычно $I_{раб}$ при температуре среды $t^{\circ}_{среды} > t^{\circ}_{расч}$ определяют по приближенной формуле

$$I_{раб} = I_{ан. ном} [(t^{\circ}_{доп} - t^{\circ}_{среды}) / (t^{\circ}_{доп} - t^{\circ}_{расч})]^{1/2} ,$$

где $t^{\circ}_{доп}$ – длительно допускаемая температура нагрева наиболее чувствительных к изменению температуры частей или узлов аппарата (например, контактов у выключателей).

Если режим работы аппарата повторно-кратковременный, то в расчетах и при выборе аппарата учитывается относительная продолжительность включения (ПВ).

Аппарат выбирают по конструктивному исполнению так, чтобы он мог надежно работать в специфических условиях электроустановки, а также, чтобы был простым в эксплуатации и дешевым.

Выбранные аппараты проверяют по предельной коммутационной способности, термической и электродинамической стойкости на способность противостоять перегрузкам.

Предельной коммутационной способностью электрического аппарата называют максимальный ток короткого замыкания, который он способен отключить несколько раз, оставаясь исправным.

Термическая стойкость (устойчивость) характеризуется допустимым количеством тепла, которое может быть выделено в аппарате за время действия тока короткого замыкания. Под термической устойчивостью аппарата понимают его способность, не перегреваясь, противостоять токам короткого замыкания, проходящим через аппарат. Она обычно характеризуется током постоянной величины I_t , который за время t , равное одной, пяти или десяти секундам (время t указывается заводом-изготовителем аппарата), нагревает аппарат так, что температура любой его части не превзойдет допустимую температуру.

Электродинамическая стойкость (устойчивость) характеризуется амплитудой ударного тока короткого замыкания, который способен пропустить аппарат без своего повреждения. Под электродинамической устойчивостью аппарата понимают способность токопроводов, изоляции, контактной системы и других частей аппарата нормально работать после прохождения по нему сквозного максимального тока короткого замыкания.

Аппарат 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

$$I_{к.з.}^2 \cdot t_{к.з.} \geq I_t^2 \cdot t,$$

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.

Аппарат проверяют на электродинамическую устойчивость по условию

$$I_{к.з.}^* \geq I_{д.у.},$$

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.

Специфические условия выбора электроаппаратов определенного назначения приведены далее в соответствующих разделах.

2. Контакторы

2.1. Общие сведения

Контактором называется электрический аппарат с самовозвратом для многократного дистанционного включения и отключения силовой электрической нагрузки переменного и постоянного токов, а также редких отключений токов перегрузки [2]. С помощью контактора реализуется связь между электрической цепью управления (ЭЦУ) и силовой электрической цепью (ЭЦС). В схеме рис. 1.4 в качестве АДУ1 обычно используется контактор.

Контактор – электромагнитный аппарат, в состав которого (рис. 2.1) входят электромагнитный механизм (ЭММ), механические передачи (МП), система главных контактов (КК_Г), дугогасительная система и вспомогательные контакты (КК_В).

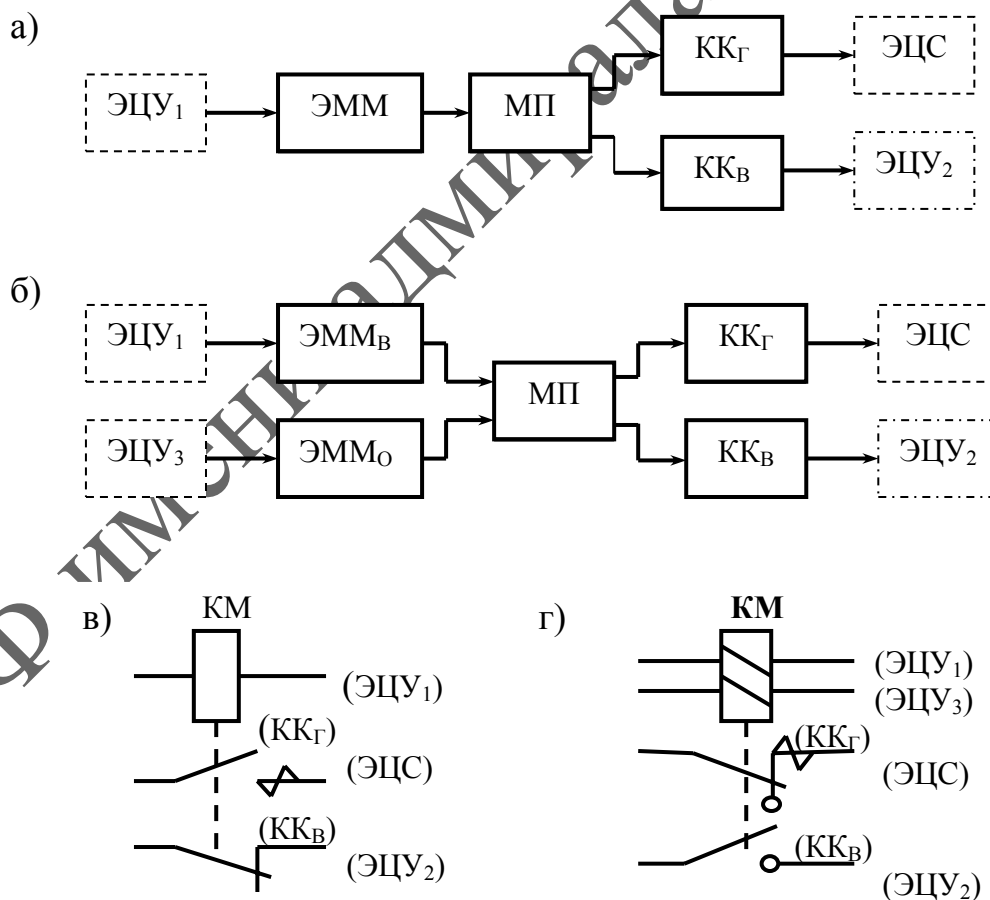


Рис. 2.1. Структурная схема электромагнитного контактора с самовозвратом (а), контактора с памятью (б) и примеры их обозначений на электрических схемах (в, г)

Электромагнитный механизм ЭММ обеспечивает дистанционное управление контактором по электрической цепи ЭЦУ₁ (рис. 2.1а). При подаче питания на катушку электромагнитного механизма его якорь замыкается и через механическую передачу МП изменяет положение коммутирующих контактов КК_Г и КК_В. Для контакторов с самовозвратом применяется МП с возвратной пружиной (см. [1] п. 3.2, п. 3.3). После отключения катушки от питания возвратная пружина переводит якорь в разомкнутое положение.

В контакторах без самовозврата применяется МП с защелкой (рис. 2.1б). В контакторе предусматриваются два ЭММ – один ЭММ_В включающий, другой ЭММ_О отключающий (действующий на защелку). Такой контактор с двумя входами управления (ЭММ_В и ЭММ_О) обладает памятью. Он функционально подобен RS-триггеру (см. [1] п. 6.9).

На рис. 2.1в и рис. 2.1г приведены примеры изображений частей контакторов на принципиальных электрических схемах (использован способ совмещенного изображения). Для сопоставления со структурными схемами в скобках указаны сокращенные наименования элементов структурных схем. Прямоугольник (КМ) обозначает электромагнитный привод (катушку ЭММ). У контактора с самовозвратом (рис. 2.1в) показан только один главный контакт КК_Г и один вспомогательный контакт КК_В (контактов может быть несколько). Контакт КК_Г (замыкающий с дугогашением) является коммутационным элементом силовой цепи ЭЦС. Вспомогательный контакт КК_В (размыкающий без дугогашения) присоединяется к электрической цепи управления (блокировки, сигнализации) ЭЦУ_В. У контактора с памятью (рис. 2.1г) электромагнитный привод (обозначение КМ) имеет две катушки – одна на включающем ЭММ_В, другая на отключающем ЭММ_О. Изображения контактов показывают, что самовозврата контактов нет.

Втягивающая катушка ЭММ должна обеспечивать надежную работу контактора при снижении напряжения до $0,85U_{ном}$. По нагреву катушка должна допускать повышение напряжения до $1,05 U_{ном}$. Кроме катушек напряжения (шунтовых) могут использоваться токовые (серийные) катушки.

Главные контакты (КК_Г) контакторов выполняют пальцевого или мостикового типа. В контакторах с поворотным якорем наибольшее распространение получили линейные перекатывающиеся контакты. В контакторах с прямоходовыми электромагнитами применяются мостиковые контакты. Механическая износоустойчивость коммутирующих контактов до $50 \cdot 10^6$ циклов замыканий для контакторов тяжелого режима работы. Основными показателями, характеризующими работу контактной системы, являются: раствор и провал контактов, начальное нажатие и конечное нажатие (см. [2] п. 2.2).

Дугогасительная система обеспечивает гашение электрической дуги, возникающей при размыкании главных контактов. Способы гашения дуги и конструкции дугогасительных систем определяются родом тока главной цепи и режимом работы контактора.

Вспомогательные контакты (блокконтакты КК_В) служат для производства переключений в цепях управления, блокировки и сигнализации (ЭЦУ). 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.

В зависимости от условий работы в силовых цепях (ЭЦС) контакторы подразделяют на 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 $4I_{\text{ном}}$ у двигателей постоянного тока и до $7I_{\text{ном}}$ у двигателей переменного тока, также отключать токи до $10I_{\text{ном}}$, а в отдельных случаях до $20I_{\text{ном}}$ ($I_{\text{ном}}$ – номинальный ток двигателя) [4].

Наибольшее применение получили контакторы с самовозвратом. Они характеризуются следующими параметрами срабатывания [3]:

- *напряжение втягивания* (срабатывания) – наименьшее напряжение, при котором происходит включение контактора без остановки или задержки подвижных контактных узлов (составляет примерно 80% номинального напряжения катушки);
- *напряжение удержания* – наименьшее напряжение, при котором якорь контактора удерживается в полностью притянутом положении (около 70% номинального напряжения);
- *напряжение отпадания* (отпускания) – наибольшее напряжение, при котором происходит полное отпадание якоря;
- *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 начала прекращения питания втягивающей (или удерживающей) катушки при номинальном режиме работы до момента полного отпадания якоря;
- *собственное время замыкания* для контактора с замыкающими контактами – это время от момента замыкания цепи втягивающей катушки до момента первого касания замыкающего контакта;

- *собственное время размыкания* для контактора с замыкающими контактами – это время с момента размыкания цепи втягивающей катушки до момента появления напряжения между контактными деталями, обусловленного их расхождением.

Действие контактора представлено с помощью временных диаграмм (в линейном приближении) на рис. 2.2.

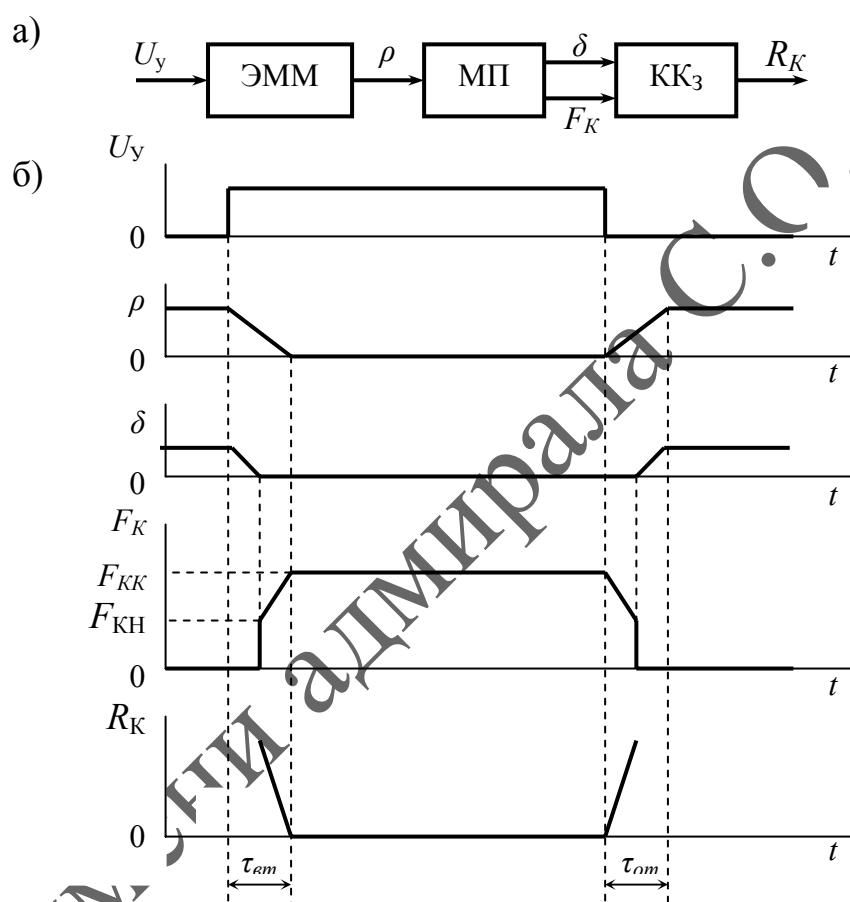


Рис. 2.2. Контактор с замыкающим контактом КК₃ (а) и временные диаграммы, отражающие его работу в линейном приближении (б)

Принятые обозначения:

U_y – напряжение, подаваемое на катушку ЭММ контактора;

ρ – величина зазора между якорем и полюсом сердечника ЭММ;

δ – величина зазора между контактными деталями замыкающего контакта КК₃ контактора;

F_K – величина контактного нажатия (F_{KH} – начальное нажатие, F_{KK} – конечное нажатие);

R_K – сопротивление, вносимое контактом в коммутируемую цепь. Интервалы времени τ_{em} (втягивания) и τ_{om} (отпадания) характеризуют быстродействие контактора. Электрическая дуга на контакте вызывает снижение быстродействия – коммутационный процесс затягивается во времени.

Предполагается, что замыкающий контакт KK_3 замыкается без отскоков и коммутируемая им цепь не оказывает влияние на коммутационный процесс.

При рассмотрении динамических свойств контакторов, применяемых в электроприводах, учитывают то, что время втягивания τ_{em} (иначе срабатывания или включения) и время отпадания τ_{ot} (иначе отпускания или отключения) 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} . Контактор представляют безинерционным нелинейным звеном.

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.

2.2. Классификация, основные технические данные и категории применения 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 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);
- по положению главных контактов – с замыкающими и размыкающими главными контактами или с различными сочетаниями этих контактов;
- по номинальному напряжению и роду тока втягивающей катушки (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.

Основными техническими данными контакторов являются [1, 8]:

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 $(10 \dots 20) \cdot 10^6$ циклов);

коммутационная износостойкость – предельное число включений и отключений цепей с током, после которого 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: *номинальная включающая способность и номинальная отключающая способность*)

раствор главных контактов – (см. [1] п. 2.2);

провал главных контактов – (см. [1] п. 6.7);

начальное нажатие главного контакта – (см. [1] п. 6.7);

конечное нажатие контакта – (см. [1] п. 6.7);

пусковая мощность, потребляемая обмоткой включающей катушки;

номинальная мощность обмотки включающей катушки;

собственное время включения (срабатывания);

собственное время отключения (отпадания) и др.

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 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;

Применение по переменному току. Категории:

AC-1 – активная или малоиндуктивная нагрузка ($\cos\varphi \geq 0,95$);

AC-2 – пуск электродвигателей с фазным ротором, торможение противовключением;

AC-3 – пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором, отключение вращающихся двигателей при номинальной нагрузке;

AC-4 – пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором, отключение неподвижных или медленно вращающихся электродвигателей, торможение противовключением.

Выбор контакторов производят с учетом следующих показателей:

- характер и величина напряжений главной цепи и цепи управления (включающих катушек);
- коммутационная способность контактов и их количество;
- допустимая частота включений;
- режим работы и др.

2.3. Особенности контакторов постоянного тока и контакторов переменного тока

Контакторы постоянного тока (серии КП, КПВ, КМВ, КПД).

Включающая (называют также намагничивающая или втягивающая) катушка ЭММ (см. [1] разд. 4) и контактная система $КК_{Г}$ 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 улучшения теплоотдачи). Зазор между якорем и полюсом сердечника небольшой (8...10 мм). Количество главных контактов ($КК_{Г}$), иначе говоря, полюсов – один или два. Раствор 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 ($F_{К}$). Используются дугогасительные устройства с магнитным дутьем при последовательном включении катушки магнитного дутья с соответствующим контактом $КК_{Г}$. Применяются дугогасительные камеры с узкими зигзагообразными щелями (см. [1] разд. 2).

Тяговая характеристика ЭММ постоянного тока плохо согласуется с механической характеристикой (см. [1] п. 4.4, п. 4.6). Напряжение отпущения контактора постоянного тока обычно составляет 0,15...0,25 $U_{ном}$. Поэтому коэффициент возврата 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 [9].

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 [9].

Собственное время срабатывания контакторов постоянного тока (на примере серии КПМ) составляет $0,12 \dots 0,3$ с, отпадания – $0,08 \dots 0,2$ с.

В составе автоматизированного электропривода (и других систем автоматики) контактор может рассматриваться как усилитель электрического сигнала с нелинейной характеристикой управления. Соответствующий пример приведен на рис. 2.3а.

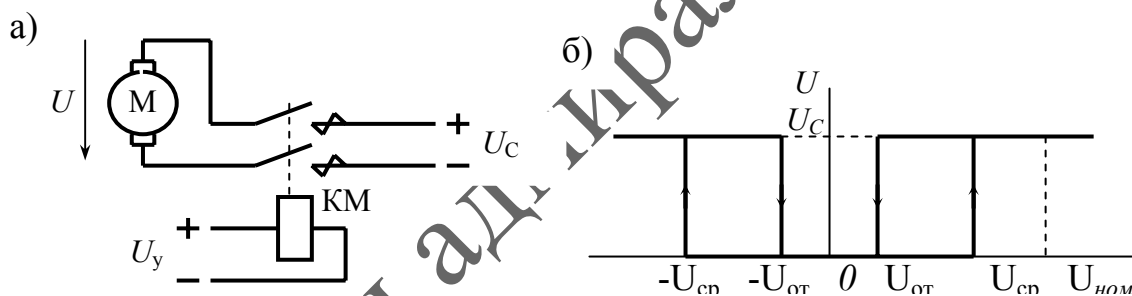


Рис. 2.3. Пример применения двухполюсного контактора постоянного тока для прямого пуска двигателя (а) и характеристика управления контактора в режиме усиления электрического сигнала (б)

Входным сигналом контактора КМ является напряжение U_y (напряжение управления), а выходным сигналом – напряжение U на щетках двигателя М. В таком случае контактор нужно обязательно рассматривать совместно с силовой цепью, в которой создано напряжение U_c источником электрической энергии.

Характеристика управления контактора как нелинейного усилителя показана на рис. 2.3б. Через U_{cp} , $U_{от}$ и $U_{ном}$ обозначены соответственно на-

пряжение срабатывания, напряжение отпускания и номинальное напряжение катушки контактора.

Контакты переменного тока (серии КТ, КВД, КТД, КТП, КНТ).

Включающая катушка ЭММ (см. [1] разд. 4) и контактная система КК_Г обычно рассчитаны на работу в цепях переменного тока. Катушка низкоомная с малым количеством витков. Основную часть сопротивления катушки составляет ее индуктивное сопротивление, зависящее от величины воздушного зазора между якорем и сердечником. Поэтому ток в катушке при разомкнутом якоре (пусковой ток) в 5...10 раз превышает ток при замкнутом якоре (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 размыкающим 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. 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. [1] п. 4.5).

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 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. 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 при поворотных ЭММ и при прямоходовых ЭММ. Пальцевые контакты нашли преимущественное применение в контакторах тяжелого режима работы.

Тяговая характеристика ЭММ контактора переменного тока ближе подходит (в среднем на полный зазор) к механической характеристике (суммарной противодействующей силе). В связи с этим напряжение отпускания составляет $0,5 \dots 0,7 U_{ном}$, т.е. выше, чем у контакторов постоянного тока. Коэффициент возврата также выше ($0,6 \dots 0,7$), поэтому контактор переменного тока может быть использован для защиты электродвигателей от снижения напряжения в сети.

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, приведенный на рис. 2.3б.

ЭММ контакторов переменного тока обеспечивают их надежную работу при колебаниях напряжения на катушке в диапазоне $0,85 \dots 1,1 U_{ном}$. Срабатывание и отпускание ЭММ происходит быстрее, чем у ЭММ постоянного тока. Собственное время срабатывания составляет $0,03 \dots 0,09$ с, а время отпускания $0,02 \dots 0,05$ с. Количество главных контактов от одного до пяти. Наиболее распространены контакторы трехполюсного исполнения. Количество вспомогательных контактов до четырех.

Промышленность выпускает контакторы постоянного и переменного тока серий МК, КМ, КМЗ, РПК, КН.

Пример применения контакторов для пуска асинхронного двигателя с фазным ротором приведен на рис. 2.4а.

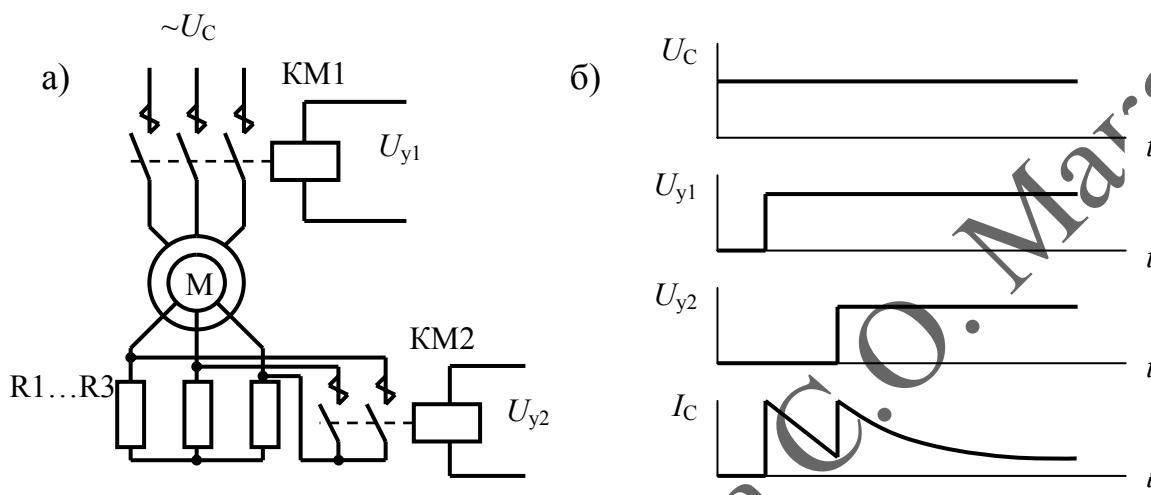


Рис. 2.4. Пример применения контакторов для пуска электродвигателя (а) и временные диаграммы, характеризующие процесс пуска двигателя (б)

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} . Двухполюсный *контактор ускорения* КМ2 срабатывает по сигналу U_{y2} , подаваемому на его катушку по цепи управления через определенное время после включения КМ1. Замкнувшимися 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 тока I_C в цепи статорной обмотки двигателя, т. е. пускового тока. Временные диаграммы, характеризующие работу схемы, приведены на рис. 2.4б.

Линейный контактор КМ1 переменного тока может рассматриваться как усилитель электрического сигнала U_{y1} в канале управления электродвигателем М по аналогии с тем, как это представлено для контактора по-

стоянного тока по рис. 2.3а. Характеристика управления контактора переменного тока аналогична характеристики, представленной на рис. 2.3б в правом квадранте. Параметры $U_{ср}$, $U_{от}$, $U_{ном}$ – действующие значения напряжения.

2.4. Разновидности электромагнитных контакторов

Контакторы с жидкометаллическими контактами (ЖМК) являются перспективными аппаратами коммутации силовых цепей. Один из вариантов реализации контактора с ЖМК приведен на рис. 2.5.

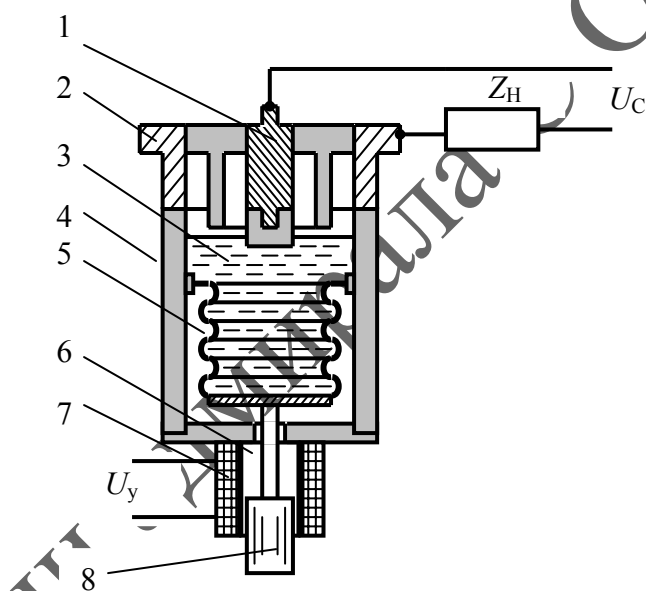


Рис. 2.5. Изобразительная модель контактора с жидкометаллическими контактами

Аппарат включается при подаче напряжения U_y на обмотку катушки 7 электромагнитного привода с якорем 8 и толкателем 6. Якорь втягивается в катушку под действием электромагнитной силы тяги и, перемещая толкатель вверх, сжимает сильфон 5. В результате повышается уровень жидкого металла 3, сосредоточенного в сильфоне и изоляционной кожухе 4, и контактные детали 2 и 1 оказываются погруженными в жидкий металл. Тем самым замыкается электрическая цепь с нагрузкой Z_H . Падение на-

пряжения сети U_C перераспределяется с контакта на нагрузку Z_H . Теперь нагрузка получает питание по замкнутой контактом цепи.

При отключении катушки от питания U_y электромагнитная сила тяги перестанет действовать, и сильфон 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 Z_H окажется разомкнутой, и падение напряжения U_C сосредоточится на контактных деталях аппарата. Теперь нагрузка Z_H отключена от питания, т. к. сопротивление контакта $R_K \rightarrow \infty$.

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. 2.5 дугогасительное устройство не показано). В магнитном поле дуга вращается, чем обеспечивается ее успешное гашение.

Такой контактор с ЖМК коммутирует токи до 3,1 кА при напряжении 100 В, обеспечивая время гашения дуги до 0,01 с и время включения 0,02 с [6]. В качестве жидкого металла используются ртуть, галлий и его сплавы, а также сплавы щелочных металлов с температурой плавления от минус 68°C и ниже⁹.

Достоинства контакторов с ЖМК:

- 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;

⁹ См. Клевцов А. В. Средства оптимизации потребления электроэнергии. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005.

- 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.

Вакуумные контакторы 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. Контакты, как принято считать в этом случае, находятся в вакууме [6]. 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 дуга.

Вакуум обладает высокой способностью восстанавливать электрическую прочность вазора 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 деонизации 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.

Силовые герметизированные контакторы (герсиконы) разработаны на основе модернизации герконов. На рис. 2.6 иллюстрируется один из принципов построения герсикона.

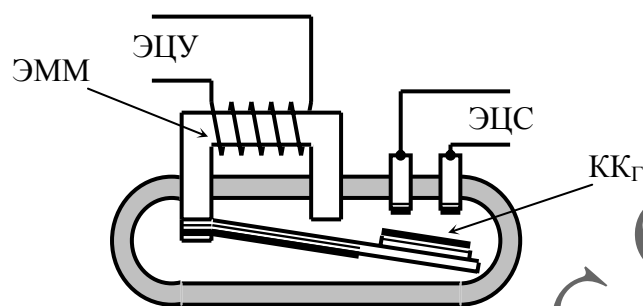


Рис. 2.6. Изобразительная модель герсикона

В герметичный стеклянный баллон впаян П-образный магнитопровод электромагнитного механизма, 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. [1] разд. 4), и контактный мостик, перемещаясь вместе с якорем, переключает встроенные в баллон неподвижные контактные детали коммутирующего контакта ККГ, замыкая тем самым электрическую цепь ЭЦС. При отключении катушки от напряжения в цепи ЭЦУ электромагнитная сила перестает действовать на якорь, и он упругими силами отрывается от правого полюса магнитопровода. Контакт ККГ размыкается, разрывая цепь ЭЦС.

Промышленный образец герсикона 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 [6].

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. [1] п. 2.7). 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 [6].

Гибридные контакторы (их называют также бездуговыми контакторами [2]) выполнены на основе электромагнитных контакторов. Их особенность заключается в том, что каждый главный контакт снабжен полупроводниковой приставкой, подключенной параллельно контакту. При-

ставка предназначена для проведения через себя тока во время размыкания контакта. При этом электрическая дуга 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 по силовой цепи.

Упрощенная функциональная схема узла с гибридным контактором переменного тока представлена на рис. 2.7.

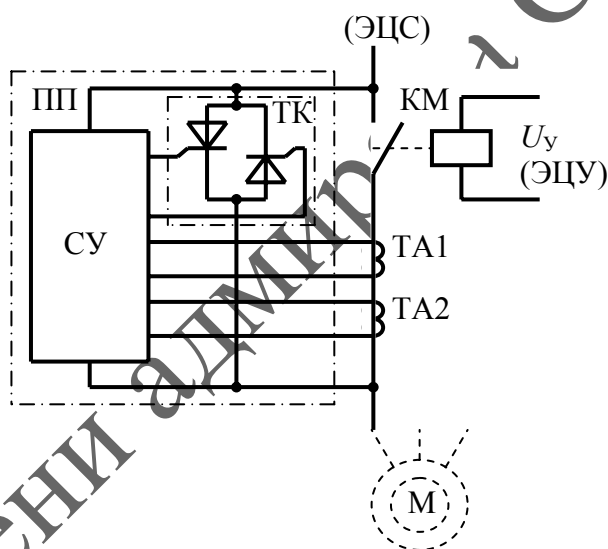


Рис. 2.7. Функциональная схема узла с гибридным контактором переменного тока

В состав гибридного контактора кроме электромагнитного контактора КМ входит полупроводниковая приставка (ПП) и два трансформатора тока (ТА1 и ТА2), подключенные к силовой электрической цепи (ЭЦС) питания двигателя (для двигателя М показана только одна фаза коммутируемой трехфазной сети). В рассматриваемом случае в ПП применен тиристорный ключ (ТК), состоящий из двух силовых однооперационных ти-

ристоров. 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 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), вносимого в ЭЦС замкнутым контактом КМ.

При отключении контактора КМ ($U_y = 0$) его контакт размыкается и между контактными деталями появляется электрическая дуга (см. [1] п. 2.5...2.8). Когда напряжение на дуге превысит пороговое для тиристора значение, ток управления 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 горит при частоте тока 50 Гц не более 0,01 с.

Кроме формирования токов управления системе СУ могут быть приданы и другие функции (см. [1] п. 6.7).

Если ЭЦС постоянного тока, то в гибридном контакторе постоянного тока достаточно использовать один силовой тиристор в составе ПП. Для запираания тиристора после гашения дуги обычно используется конденсатор. СУ подключает предварительно заряженный конденсатор к

анодной цепи тиристора, и конденсатор, разряжаясь через тиристор, уменьшает в нем прямой ток настолько, что тиристор закрывается и переходит в непроводящее состояние.

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. Разработаны гибридные контакторы постоянного тока (серия КП81). Они обеспечивают электрическую износостойкость более 5 млн. циклов при частоте 2000 включений в час, рассчитаны на номинальные токи 160...630 А при напряжении 220 в.

К числу *бездуговых контакторов* относят гибридные контакторы типа БКБ, КБК, МК2-20Е, МК2-30Е, МК3-30Е на номинальные токи 63...250 А при напряжении 380 и 660 В. *Контактор с ограниченным дугообразованием* КТ-6043БР рассчитан на номинальный ток 400 А при напряжении 1140 В [2].

2.5. Бесконтактные коммутаторы силовых цепей

Бесконтактные коммутаторы силовых цепей функционально подобны электромагнитным контакторам с главными контактами замыкающего типа. Роль главных контактов у бесконтактных коммутаторов выполняют электронные ключи, обычно тиристорные (см. [1], п. 6.4). Тиристорные коммутаторы называют также тиристорными контакторами [2].

Тиристорный коммутатор цепи постоянного тока в упрощенном варианте представлен электрической схемой на рис.2.8а.

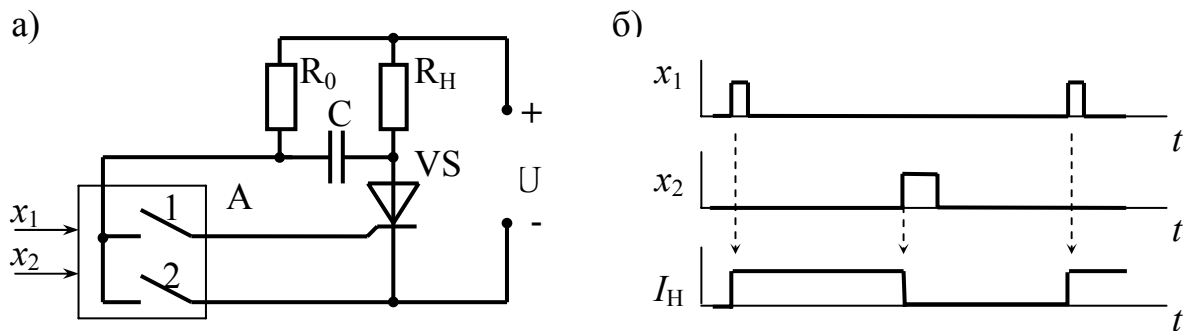


Рис. 2.8. Тиристорный коммутатор цепи постоянного тока:
 а) упрощенная электрическая схема, б) временные диаграммы работы

Подключение на питание (U) нагрузки R_H постоянного тока (приемника электрической энергии) и отключение от питания (осуществляется тиристором VS по сигналам-командам x_1 и x_2 , подаваемым на входы блока A управляемых ключей. Реакция блока A на x_1 выражается в замыкании ключа 1, реакция на x_2 – в замыкании ключа 2. Ключи 1 и 2 могут быть электромеханическими или электронными в зависимости от технической реализации коммутатора. Например, в коммутаторе малой мощности роль ключей могут исполнять кнопки управления. Резистор R_0 служит для ограничения величины тока управления тиристором. Также через R_0 заряжается конденсатор C , который используется для принудительного запираания тиристора при отключении нагрузки.

В отключенном состоянии коммутатора тиристор VS закрыт. На тиристоре падает напряжение U , тока в нагрузке R_H нет (она отключена) и конденсатор C не заряжен.

Включение тиристора производится импульсным сигналом x_1 , то есть кратковременным замыканием ключа 1 в блоке A . При этом ток управления пройдет по резистору R_0 , замкнутому ключу 1 и управляющему электроду тиристора, вызвав переход тиристор в проводящее состояние. Теперь на нагрузке R_H будет падать напряжение U и по ней потечет ток I_H , конденсатор C начнет заряжаться через R_0 до напряжения U , при-

чем на его левой обкладке будет положительный потенциал. Процесс включения нагрузки отражен в левой части диаграмм на рис. 2.8б.

Отключение нагрузки производится импульсом x_2 , по которому замыкается ключ 2 на время, достаточное для разряда конденсатора C через замкнутый ключ 2 и тиристор VS (рис. 2.8а, рис. 2.8б). Ток разряда конденсатора, направленный в тиристоре навстречу току I_H , снижает результирующий ток в тиристоре до значений, при которых тиристор закрывается, переходя в непроводящее состояние. Коммутатор возвращается в исходное отключенное состояние.

По аналогичному принципу с отключающим конденсатором выполняются коммутаторы на базе оптотиристоров, позволяющих гальванически развязать цепь управления от силовой цепи нагрузки. Применение двухоперационных (запираемых) тиристоров вместо обычных (однооперационных) упрощает силовую часть схемы коммутатора, так как отпадает необходимость в применении отключающего конденсатора.

Тиристорный коммутатор цепи переменного тока в упрощенном варианте представлен электрической схемой на рис.2.9а.

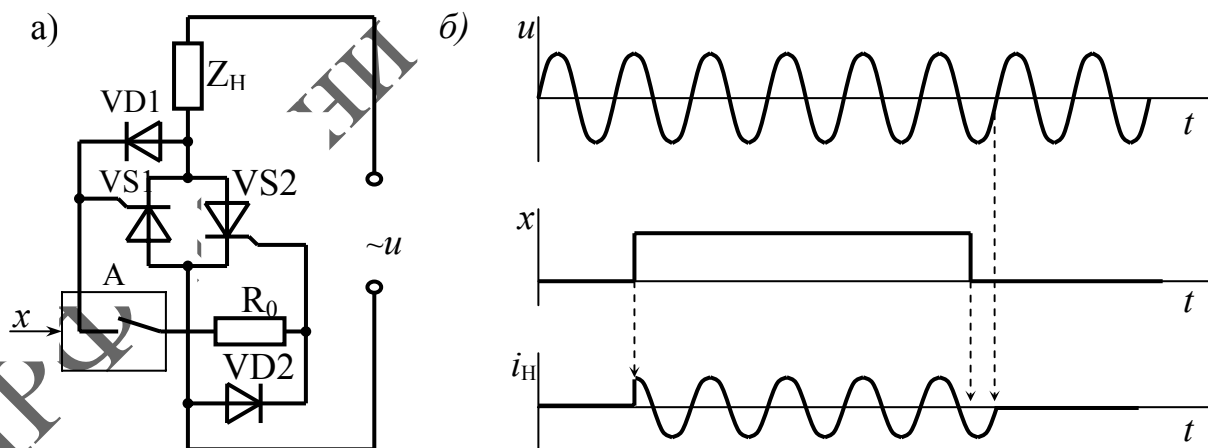


Рис. 2.9. Тиристорный коммутатор цепи переменного тока:

а) упрощенная электрическая схема, б) временные диаграммы работы

Приемник электрической энергии – нагрузка Z_H подключается на питание от источника переменного напряжения u электронным ключом, ко-

торый имеет в своем составе два тиристора VS1 и VS2. Тиристоры включены встечно-параллельно, чтобы по нагрузке мог протекать переменный ток i_H . Перевод каждого тиристора в открытое (проводящее) состояние производится с помощью управляемого ключа (электромеханического или электронного), входящего в состав блока управления А. Ключ блока А замыкается по сигналу управления x и остается замкнутым, пока сигнал x действует на входе блока А. Для рассматриваемого коммутатора (аналога электромагнитного контактора) ключ блока А сохраняет замкнутое состояние на интервале времени, значительно превышающем период колебания напряжения u (см. рис. 2.9б).

Тиристорный ключ работает следующим образом.

Каждый тиристор попеременно находится под прямым и под обратным напряжением в соответствующие полупериоды переменного напряжения u .

Когда ключ блока А разомкнут, токи управления тиристорами не вырабатываются и тиристоры сохраняют непроводящее состояние. Нагрузка Z_H отключена от питания.

Если ключ блока А замкнут, то в начале полупериода напряжения u откроется тиристор, на котором падает прямое напряжение. Если это тиристор VS1, то он откроется током управления, текущим по цепи «диод VD2 – ограничивающий резистор R_0 – ключ блока А – управляющий электрод VS1 – анод VS1». Тиристор VS1 останется открытым до конца полупериода напряжения u , а затем закроется, так как переменный ток нагрузки уменьшится до нуля. На следующем полупериоде напряжения u 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 напряжения u , а затем закроется. Таким образом, тиристоры VS1 и VS2 будут попеременно открываться и закрываться.

ся в начале каждого полупериода переменного напряжения u , и по нагрузке Z_H будет протекать переменный ток i_H , когда замкнут ключ блока А (см. рис. 2.9б).

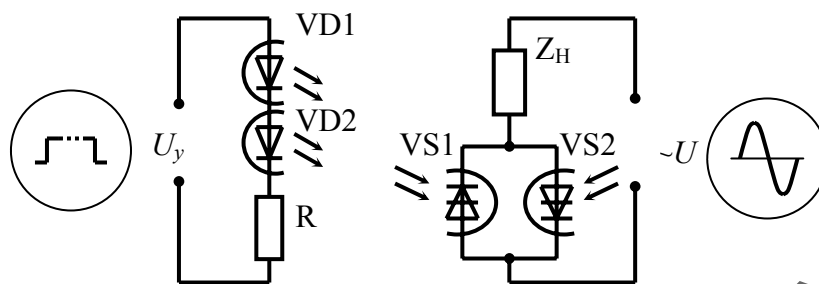


Рис. 2.10. Коммутация оптронами VD1-VS1 и VD2-VS2 цепи нагрузки Z_H переменного тока

Чтобы обеспечить гальваническую развязку цепи управления и силовой цепи вместо обычных тиристоров применяют тиристорные оптопары (рис. 2.10).

Силовые оптотиристоры способны пропускать ток до 1500 А при напряжении до 4 кВ.

В качестве электронных ключей на переменном токе кроме одноперационных тиристоров применяют также симисторы.

Для коммутации силовых трехфазных цепей промышленность выпускает *тиристорные контакторы* типов ТКЕО и ТКЕП на номинальные токи до 250 А при напряжении 380 В [2].

2.6. Тиристорные коммутаторы трехфазных цепей асинхронных двигателей

Тиристорные коммутаторы трехфазных цепей (ТКТЦ) асинхронных двигателей (АД) в зависимости от способа их подключения можно разделить на две группы: 1) ТКТЦ, подключаемые в расщелку линий (А, В, С) питания статорных обмоток (рис. 2.11а) и 2) ТКТЦ, подключаемые в расщелку нулевой точки статорных цепей (рис. 2.11б).

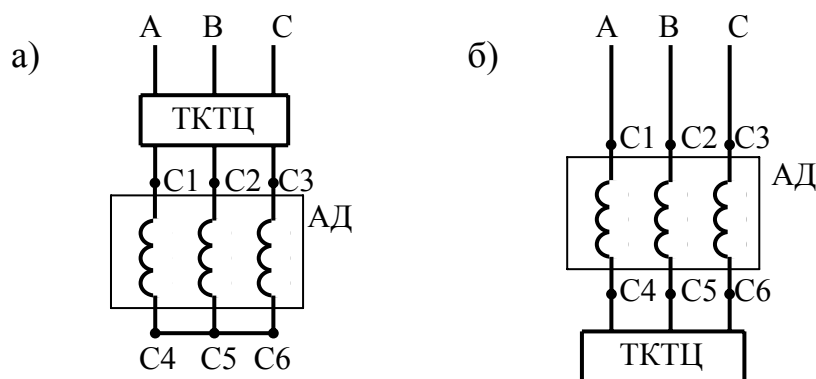


Рис. 2.11. Схемы подключения тиристорного коммутатора трехфазной цепи (ТКТЦ) асинхронного двигателя (АД)

В схеме на рис. 2.11а ТКТЦ подключает статорные обмотки С1-С4, С2-С5, С3-С6 двигателя АД к соответствующим линиям питания А, В, С и отключает от них с помощью тиристорных ключей. Могут использоваться ключи с двухсторонней проводимостью на основе однооперационных тиристоров, включенных по схеме рис. 2.9 в каждую фазу питающей сети. Могут применяться оптопары по схеме как на рис. 2.10, или симисторы, или двухоперационные (запираемые) тиристоры. В качестве ключей могут быть применены также силовые модули на основе транзисторов различных типов (см. [1] п. 6.3).

Для коммутации цепей с токами до 100 А, когда требуется снизить затраты на применяемую бесконтактную технику, применяют ТКТЦ, подключаемые в рассечку нулевой точки статорных цепей электродвигателя (рис. 2.11б) (при таком подключении проще устройства защиты ключей). На рис. 2.12 представлены схемы силовых частей (А) коммутаторов типа КПП с ТКТЦ, подключенными в рассечку нулевой точки.

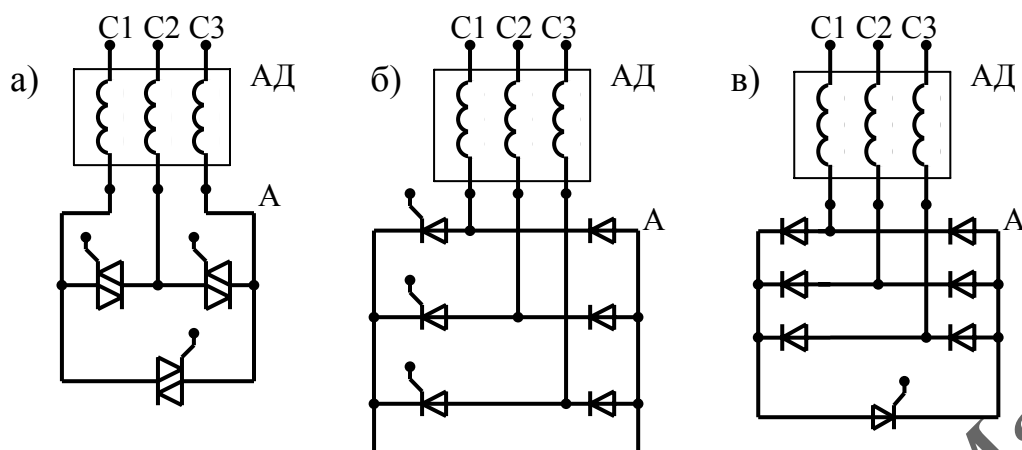


Рис. 2.12. Схемы силовых частей коммутаторов типа КПТ

При использовании схемы, показанной на рис. 2.12в, необходимо применять дополнительные меры для запираания тиристора, так как он коммутирует практически постоянный ток.

Система управления ключами коммутатора КПТ отслеживает фазовый угол нагрузки и вырабатывает импульсы управления силовыми ключами в момент перехода напряжения сети через ноль. Она предусматривает автономное управление каждым ключом и одновременное управление ключами, что позволяет коммутировать трехфазные, двухфазные и однофазные нагрузки. Предусматриваются два способа включения и отключения коммутатора: от внутренних схем управления (ручной режим), от внешнего источника постоянного тока (автоматический режим). Коммутатор (КПТ201.1) 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.

Падение напряжения на ключе коммутатора КПТ в открытом состоянии не более 1,8 В. Предельный ток – 50 А (для КПТ201.1). Ток управ-

ления – не более 250 мА, длительность импульса – 10 мс. Напряжение управления – не более 6 В¹⁰.

Среднее значение тока через симистор (тиристор) и значение максимального прямого и обратного напряжений определяют из условий:

для схемы рис. 2.12а

$$I_{срТ} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_g \int_0^{2\pi/3} \sin \omega t \cdot d \omega t \approx 0,675 I_g ,$$

$$U_{Пр.маx} = U_{Об.маx} = \sqrt{2} U_L ;$$

для схемы рис. 2.12б

$$I_{срТ} = I_g / \sqrt{6} \approx 0,41 I_g ,$$

$$U_{Пр.маx} = U_{Об.маx} = \sqrt{2} U_L ;$$

для схемы рис. 2.12в

$$I_{срТ} = 1,22 I_g ,$$

$$U_{Пр.маx} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_L ,$$

где I_g – действующее значение тока нагрузки; U_L – действующее значение линейного напряжения.

¹⁰ См. Клевцов А. В. Средства оптимизации потребления электроэнергии. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005 (Серия «Библиотека инженера»).

3. Пускатели

3.1. Общие сведения

Пускателями называют комплектные электромеханические аппараты или статические аппараты с электронными ключами, предназначенные для пуска, остановки и реверсирования асинхронных двигателей. Большинство пускателей осуществляют тепловую защиту электродвигателя от перегрузки, автоматически отключая его от питания, если ток в силовой цепи и температура двигателя возросли выше допустимого значения. Для получения информации о перегрузке двигателя используются датчики¹¹ тока и температуры. Структурная схема узла электропривода с пускателем показана на рис. 3.1.

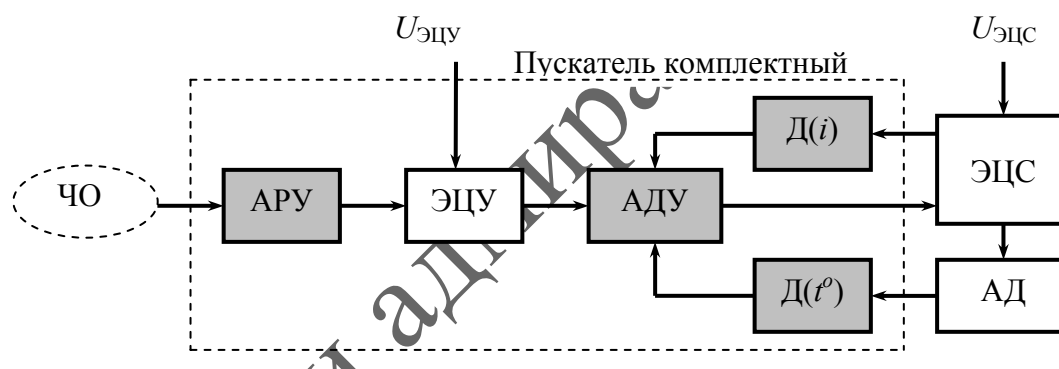


Рис. 3.1. Узел дистанционного управления электродвигателем с применением пускателя

В минимальной комплектации пускатель представляет собой коммутирующий аппарат дистанционного управления (АДУ), в качестве которого может применяться контактор (см. п. 2.1) или бесконтактный коммутатор силовых цепей (см. п. 2.5).

Пускатель на основе контактора называют *магнитным пускателем*. Пуск и остановка асинхронного двигателя (АД) производится главными контактами контактора путем коммутации силовой электрической цепи

¹¹ Датчик – устройство, преобразующее физическую величину в сигналы для обработки техническими средствами (Перишков В. И., Савинков В. М. Толковый словарь по информатике. – М.: Финансы и статистика, 1991).

(ЭЦС), находящейся под напряжением $U_{ЭЦС}$. Как правило, в состав магнитного пускателя включают *электротепловое реле*, которое исполняет роль позиционного датчика тока ($D(i)$), формирующего сигнал на отключение контактора, если ток в цепи ЭЦС некоторое время будет превышать установленное значение (уставку реле).

В эксплуатационном режиме работы электропривода команды на пуск и остановку АД поступают от человека-оператора (ЧО) через аппарат ручного управления (АРУ). Обычно АРУ – это кнопочный пост (см. п. 6.2) с *кнопками управления* «Пуск» и «Стоп». Кнопочный пост может входить в комплект магнитного пускателя. В *реверсивных магнитных пускателях* предусматриваются два контактора и кнопочный пост управления из трех кнопок. Реверсивный пускатель кроме пуска и остановки двигателя позволяет изменять направление его вращения. Команды от АРУ к контакторам передаются электрическими сигналами по электрической цепи управления (ЭЦУ), находящейся под напряжением $U_{ЭЦУ}$.

Магнитным пускателем осуществляется прямой пуск асинхронного электродвигателя путем непосредственного подключения к питающей сети. Такой пуск вызывает интенсивное потребление тока и ударные нагрузки в обмотках двигателя, что значительно ограничивает его ресурс. Кроме этого прямой пуск сопровождается ударами по подшипниковым узлам и приводному механизму, резкими ударными нагрузками в механических передачах с зазорами. При прямом пуске асинхронных электродвигателей мощностью от 45 до 400 кВт допускается только продолжительный режим работы (режим S1 по ГОСТ183-74). Кроме этого, прямой пуск имеет ограничения по величине инерционной массы, приведенной к валу двигателя (ГОСТ8327-89).

Пускатель на основе тиристорного коммутатора (см. п. 2.5) называют *тиристорным пускателем*. Современные тиристорные пускатели имеют больший набор выполняемых функций в сравнении с магнитными

пускателями. Этому способствует то, что силовые электронные (тиристорные) ключи обладают несравненно большим быстродействием, чем контактная аппаратура (см. [1] п. 6.6). Вместо контактных датчиков тока (электротепловых реле) в тиристорных пускателях используются бесконтактные датчики тока ($D(i)$) и температуры ($D(t^\circ)$) двигателя. Некоторые пускатели, обеспечивающие режимы плавного пуска и торможения двигателя, получили название «мягких» пускателей. Создание мягких пускателей, заменяющих магнитные пускатели, обусловлено стремлением «смягчить» пуск асинхронного двигателя при ограничении пусковых токов.

Мягкий пускатель (например, серии ПТТ) позволяет осуществить плавный разгон электродвигателя с ограничением величины пускового тока на заданном уровне. Пускателем реализуется аварийное отключение цепи нагрузки при неполнофазном режиме¹², токах короткого замыкания и перегрузках, превышающих установленные значения. Обработка сигналов осуществляется микропроцессорным блоком управления (например, на базе однокристалльной ЭВМ К1816ВЕ031 в пускателях серии ПТТ).

В гибридных пусковых устройствах конструктивно и функционально совмещается контактная и бесконтактная аппаратура. Характерным для таких пусковых устройств является то, что в переходных режимах (запуск и торможение) коммутация электродвигателя к сети осуществляется иловыми тиристорами. В стационарном режиме работы (после окончания пуска) подключение к сети обеспечивается контакторами без устройств дугогашения. Главные контакты контакторов шунтируют тиристоры. В таком комплектном аппарате оптимизированы конструкция и массогабаритные показатели силового блока.

¹² В процессе эксплуатации двигателя может оборваться одна из фаз трехфазного питающего напряжения, например из-за перегорания предохранителя. К двигателю при этом подводится питание только по двум фазам, ток в статорной обмотке резко возрастает, что приводит к перегреву и выходу двигателя из строя.

3.2. Магнитные пускатели

Магнитные пускатели (серии ПМА, ПМЕ, ПМЛ, ПАЕ и др.) предназначены для пуска, остановки, реверсирования и тепловой защиты главным образом асинхронных двигателей. Как правило, в пускатель помимо контактора (или двух контакторов) встроены тепловые реле для защиты двигателя от токовых перегрузок и «потери фазы» (неполнофазного режима). Пускатели выполняются реверсивными и нереверсивными, с тепловой защитой и без нее, открытого, защищенного или пылебрызгонепроницаемого исполнения. Некоторые магнитные пускатели имеют обложку – стальной кожух. Управление пускателем осуществляется с помощью кнопок управления.

На рис. 3.2 приведена схема подключения реверсивного магнитного пускателя, укомплектованного электротепловыми реле.

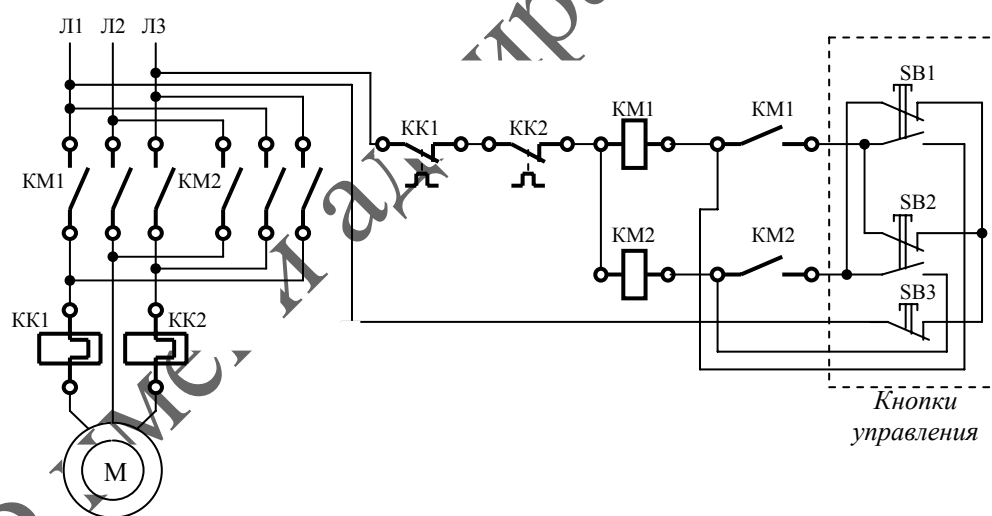


Рис. 3.2. Схема подключения реверсивного магнитного пускателя

Функциональные части пускателя, подключаемые к электрическим цепям, выделены на рис. 3.2 утолщенными линиями: КМ1, КМ2 – элементы контакторов; КК1, КК2 – элементы электротепловых реле. Кнопки управления SB1 «Вперед», SB2 «Назад», SB3 «Стоп» при дистанционном управлении объединяются в отдельный кнопочный пост и располагаются

отдельно, например, на пульте управления. В других случаях они закрепляются на кожухе пускателя.

Будем обозначать замыкающий контакт буквами ЗК, размыкающий контакт – буквами РК.

При пуске «Вперед» нажатием кнопки SB1 ее контакты изменят свое положение, и по цепи Л1- РК SB3 – РК SB2 – ЗК SB1 – катушка KM1 – РК КК2 – РК КК1 – Л3 потечет ток. Включится контактор KM1 и изменит положение своих контактов. Двигатель М теперь подключен к линиям Л1, Л2, Л3 главными контактами KM1. Вспомогательный ЗК KM1, замкнувшись, поставит на «самоподхват» контактор KM1, обеспечив питание катушки KM1 по цепи Л1- РК SB3 – РК SB2 – ЗК KM1 – катушка KM1 – РК КК2 – РК КК1 – Л3. Поэтому после отпускания кнопки SB1 питание катушки KM1 сохранится и контактор KM1 останется во включенном состоянии. Отключение контактора KM1 (и двигателя) 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 KM2 – РК КК2 – РК КК1 – Л3 потечет ток включения контактора KM2. Контактор KM2, включившись, изменит положение своих контактов и поставит себя на «самоподхват» вспомогательным контактом ЗК KM2. Двигатель теперь будет получать питание по линиям Л1, Л2, Л3 с измененной последовательностью чередования фаз главными контактами KM2, что соответствует режиму «Назад». При одновременном нажатии на кнопки SB1 и SB2 катушки контакторов KM1 и KM2 будут обесточены.

Выпускают 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 за-

щиты трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором от перегрузок недопустимой продолжительности 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 клемников). Пускатели могут быть дополнены приставками, которые увеличивают функциональные возможности пускателя:

- 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).

3.3. Тиристорные пускатели

В простом варианте с применением широтного управления тиристорные пускатели реализованы по силовой схеме, приведенной на рис. 2.11а, с тиристорным коммутатором трехфазной цепи (ТКТЦ) и системой управления тиристорами по каждой фазе как на рис. 2.9. Нереверсивный пускатель имеет в силовой трехфазной цепи три блока тиристоров (сило-

вых тиристорных ключей) по одному блоку в каждой фазе. Два тиристора в каждом блоке включены встречно-параллельно. В реверсивном тиристорном пускателе предусматривают обычно пять блоков тиристоров (один из блоков включается как в режиме «Вперед», так и в режиме «Назад»). Примером служит тиристорный пускатель серии ПТ, характеризуемый следующими основными параметрами: номинальное напряжение 380 В, номинальный ток 40 А, пусковой ток 360 А при продолжительности пуска 0,4 с, износостойкость 10^7 циклов, ресурс работы не менее 10 тыс. часов.

Для управления асинхронными двигателями большой мощности служит тиристорная станция управления серии ПТУ. Станции этой серии выпускают на номинальные токи 400 А при напряжении до 440 В, частота коммутаций цепи до 2400 в час. Электрическая износостойкость составляет $24 \cdot 10^6$ циклов. Станция обеспечивает режим динамического торможения двигателя.

Назначение некоторых тиристорных пускателей [2]:

ПТ-16-380-У5, ПТ-16-380Р-У5 – служат для включения и отключения асинхронных двигателей (номинальный ток 16 А при номинальном напряжении 380 В);

ПТ-40-380-У5, ПТ-40-380Р-У5 – для включения, отключения и реверса асинхронных двигателей (номинальный ток 40 А при номинальном напряжении 380 В);

ПТК-100-380, БПК-1000 – для коммутации и защиты от перегрузок, коротких замыканий, обрыва фаз (номинальный ток 100 А при номинальном напряжении 380 В);

ПТУ-63-380 – для коммутации и защиты от коротких замыканий и перегрузок (номинальный ток 63 А при номинальном напряжении 380 В).

В пускателях мягкого пуска (soft-starter) применяют фазовое управление тиристорами. Импульсы тока управления тиристорами формируют-

ся специальной системой импульсно-фазового управления (СИФУ на рис. 3.3а). Она смещает импульсы тока управления относительно моментов естественного отпираания тиристоров. Величина смещения импульсов характеризуется углом управления α (рис. 3.3б).

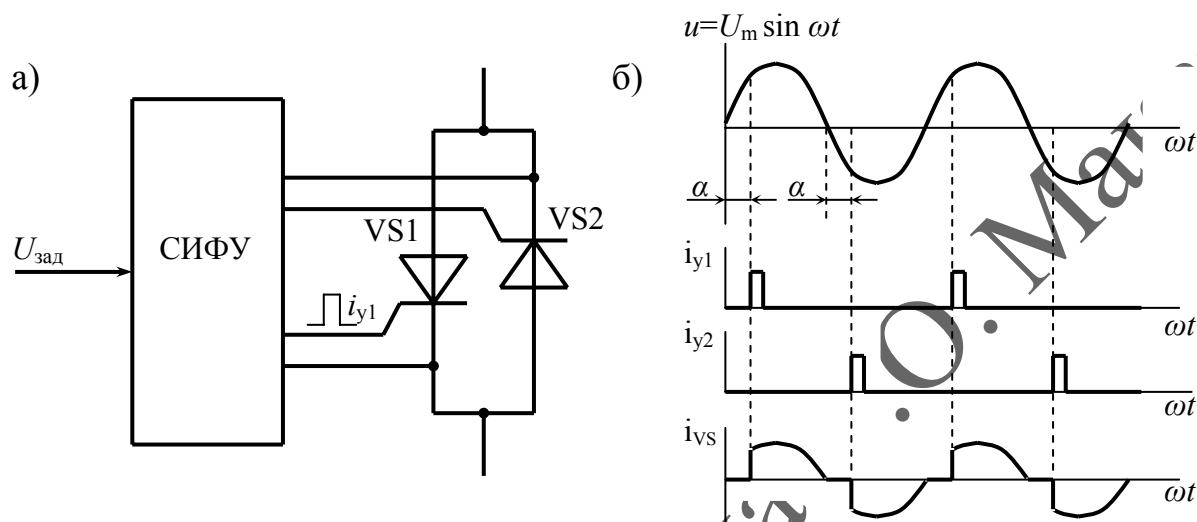


Рис. 3.3. Схема импульсно-фазового управления тиристорами (а) и упрощенные диаграммы работы схемы (б)

Диаграммы, приведенные на рис. 3.3б, отражают процессы регулирования тока i_{VS} в силовой цепи, находящейся под напряжением $u = U_m \sin \omega t$. Они соответствуют случаю, когда нагрузка силовой цепи активная. Тиристор VS1 и тиристор VS2 открываются поочередно импульсами i_{y1} и i_{y2} тока управления, поступающими на управляющий электрод тиристора, когда тиристор оказывается под прямым напряжением. По цепи и активной нагрузке протекает прерывистый ток i_{VS} , и нагрузке R_H передается мощность

$$P_H = U_H^2 / R_H, \quad (3.1)$$

где U_H – падение напряжения на нагрузке R_H :

$$U_H = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} U \sin \theta)^2 d\theta} = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}, \quad (3.2)$$

U – действующее значение напряжения (u) в силовой цепи (α – угол управления тиристором).

Когда нагрузка силовой цепи активно-индуктивная, индуктивность препятствует резким изменениям тока i_{VS} 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 из сети нагрузке сохраняется только, когда $\alpha > \varphi$. В случае $\alpha < \varphi$ может произойти либо срыв процесса, когда тока в силовой цепи не будет (тиристоры перестанут открываться) при малой длительности $\tau_{и}$ импульсов i_{y1}, i_{y2} управления ($\omega \tau_{и} < \varphi - \alpha$), либо нагрузка окажется на коротко подключенной к сети (бестоковых пауз у i_{VS} не будет), если длительность импульсов i_{y1}, i_{y2} управления тиристорами большая ($\omega \tau_{и} > \varphi - \alpha$). В таком случае тиристоры становятся неуправляемыми. Область $\alpha < \varphi$ не может быть использована для регулирования напряжения U_H .

При выполнении условия $\alpha > \varphi$ на нагрузку падает напряжение с действующим значением

$$U_H = \sqrt{\frac{1 - \cos \lambda}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha + \lambda} (\sqrt{2} U \sin \theta)^2 d\theta}, \quad (3.3)$$

где λ – угол, характеризующий длительность t_{VS} протекания тока i_{VS} через тиристор за один полупериод ($\lambda = \omega t_{VS}$).

В пускателе мягкого пуска СИФУ формирует импульсы управления тиристорами, изменяя α в сторону уменьшения от величины π до φ по сигналу $U_{зад}$ (рис. 3.3) при плавном пуске двигателя. Величина задающего напряжения $U_{зад}$ изменяется необходимым образом, например, линейно во времени с помощью электронного устройства, называемого *здатчиком интенсивности*. Такое устройство вместе с СИФУ входит в состав системы управления пускателя мягкого пуска.

Серийно выпускаемые пускатели тиристорные трехфазные серии ПТТ пускатели позволяют реализовать следующие функции:

- 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 (контактора);
- аварийное отключение цепи нагрузки при неполнофазном режиме, токах короткого замыкания и перегрузках, превышающих их установленное значение.

На рис. 3.4 приведена функциональная схема нереверсивного пускателя мягкого пуска типа ПТТ¹³ (в составе силовой части предусмотрены тиристорные ключи и трансформаторы тока).

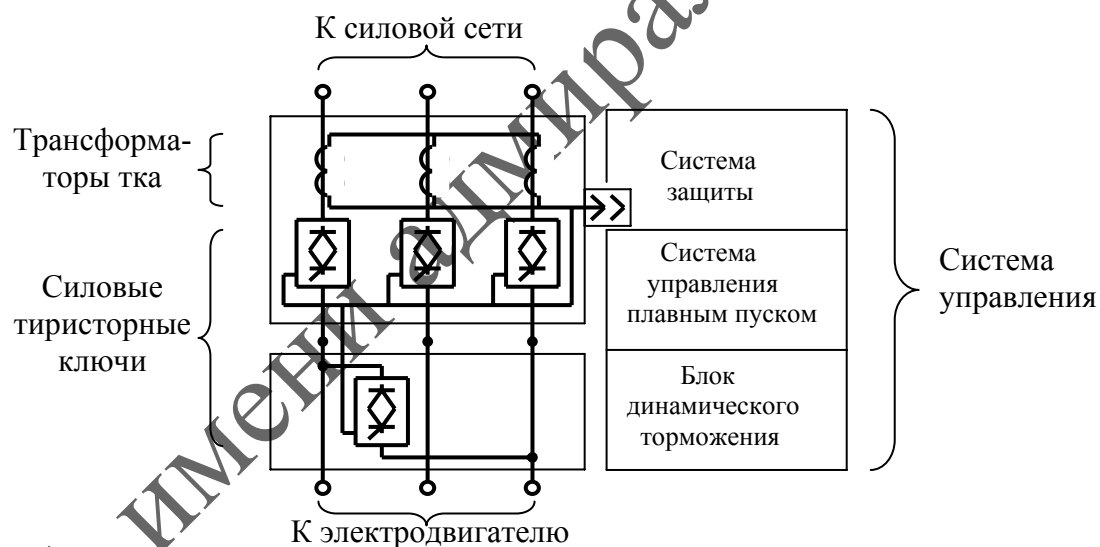


Рис. 3.4. Функциональная схема пускателя типа ПТТ

К регулируемым параметрам относятся:

время плавного пуска, 1...60 с;

время плавного останова, 0...120 с;

первоначальное напряжение, $(0,3...0,9)U_{ном}$;

¹³ См. Клевцов А. В. Средства оптимизации потребления электроэнергии. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005.

предельная величина тока «пуск», $(1,5 \dots 5,0)I_{НОМ}$;

снижение напряжения «останов», $(1,0 \dots 0,4)U_{НОМ}$.

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 контакторами без устройств дугогашения. Контактры шунтируют тиристоры своими контактами. Схема подключения пускового устройства МРН-М приведена на рис. 3.5.

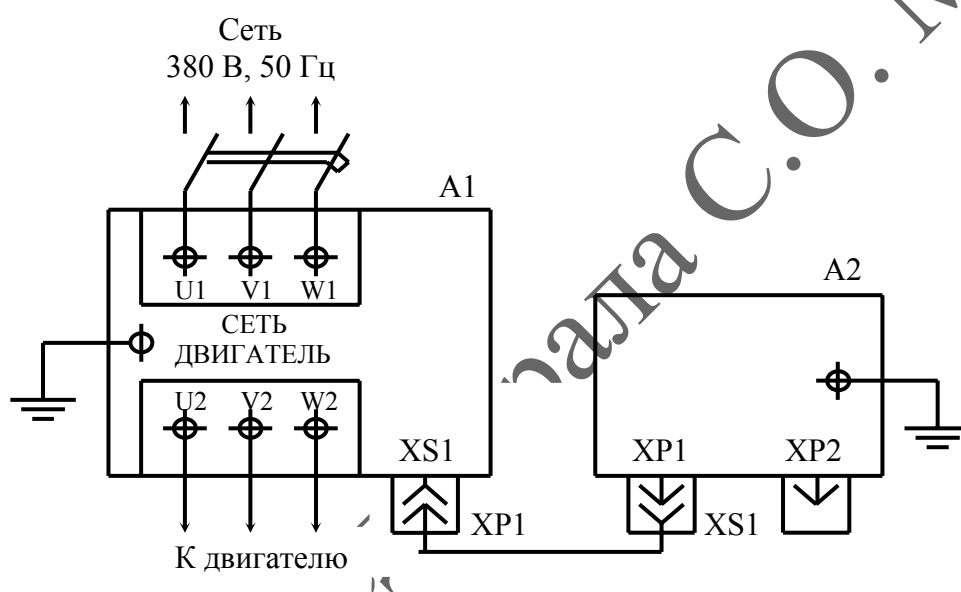


Рис. 3.5. Схема подключения пускателя МРН-М

В состав МРН-М входит тиристорный блок (A1) и микропроцессорный блок управления с пультом управления (A2). Дистанционная связь между блоками A1 и A2 реализована с помощью жгута проводников электрического тока, подключаемого через разъемы XS1, XP1. Проходная 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, затянутом пуске, низком сопротивлении изоляции.

4. Реле

4.1. Общие сведения

Реле – это электромагнитные, электромеханические или электронные устройства, которые предназначены для коммутации электрических цепей в схемах автоматизированного управления технологическими установками, электрическими сетями и системами [2]. Под реле понимают такой электрический аппарат, в котором при плавном изменении управляющего (входного) параметра до определенной наперед заданной величины происходит скачкообразное изменение управляемого (выходного) параметра. Оно состоит из трех основных функциональных элементов: воспринимающего, промежуточного и исполнительного. Реле относится к аппаратам прерывистого управления, так как рабочее состояние его определяется двумя крайними положениями исполнительного элемента *включено* и *выключено* [9].

Для конкретизации определения реле будем исходить из следующих положений:

объектом управления реле является электрическая цепь или несколько цепей;

реле воздействует на электрическую цепь путем коммутации цепи, что может быть осуществлено резким изменением электрического сопротивления цепи, но не обязательно электрическим контактом, а, например, электрическим ключом, а на переменном токе и управляемым дросселем (см. [1] п. 5);

выходная переменная реле (обозначим ее буквой y , полагая, что $y \geq 0$), характеризующая сопротивление, вносимое реле в цепь, может изменяться в диапазоне от y_{min} до y_{max} , причем $y_{max} \gg y_{min}$, $y_{min} \rightarrow 0$, а, следовательно, отношение y_{min} / y_{max} есть малая, близкая или равная нулю величина;

изменение выходной переменной y от y_{min} до y_{max} и в обратную сторону происходит скачкообразно как реакция на входной сигнал реле, определяемый *входной переменной* $x(t)$, значение которой зависит от времени t ;

реле *срабатывает*, изменяя выходную переменную y когда при положительной производной $dx(t)/dt > 0$ значение $x(t) > 0$ достигает величины x_{cp} , называемой *параметром срабатывания*;

реле *отпускает* (после срабатывания), когда при отрицательной производной $dx(t)/dt < 0$ значение $x(t) > 0$ достигает величины x_{om} , называемой *параметром отпускания*.

Таким образом, представим реле электроаппаратом, который воздействует на электрическую цепь быстрым (практически мгновенным) изменением выходной переменной y от малого значения y_{min} до большого значения y_{max} или в обратном направлении. Воздействие на электрическую цепь приводит к коммутации электрической цепи и осуществляется по сигналу на входе реле, когда входная переменная x , возрастая, переходит через определенное значение x_{cp} , или, убывая, через значение x_{om} . Входная переменная x есть физическая (не обязательно электрическая) величина. В общем случае она может принимать и положительные, и отрицательные значения. Характеристика управления реле, то есть зависимость выходной переменной y от входной переменной x , существенно нелинейная.

Некоторые типовые нелинейности и характеристики управления реле приведены в табл. 4.1. Выходную переменную реле y удобно представить в относительном виде $d = 1 - y/y_{max}$ с привязкой к замыкающему контакту на выходе реле. При этом следует положить $D = 1$ ($d = 1$, когда замыкающий контакт замкнут).

Значение параметра срабатывания $x_{cp} = B$ (или отпускания $x_{om} = A$), на которое настроено реле, называют *уставкой* по входному параметру. Отношение $x_{om}/x_{cp} = A/B = k_B$ называют *коэффициентом возврата*.

Для нелинейности вида 1 имеем: $x_{cp} = x_{om} = 0$ и $k_B = 1$.

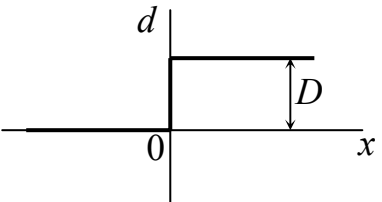
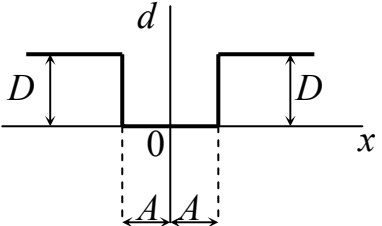
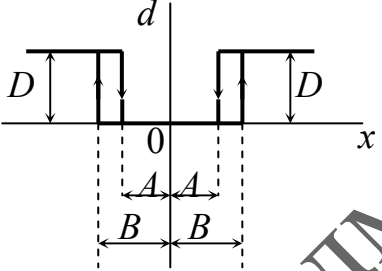
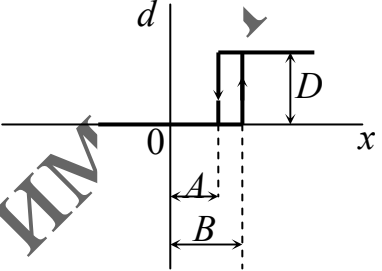
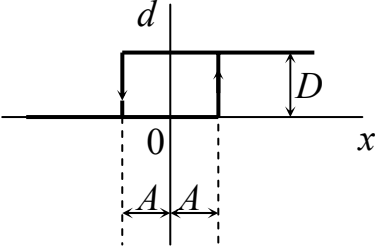
Для нелинейности вида 2: $|x_{cp}| = |x_{om}|$ ($B = A$) и $k_B = 1$.

Для нелинейности вида 3 и вида 4: $|x_{cp}| = B$, $|x_{om}| = A$ и $0 < k_B < 1$.

Для нелинейности вида 5: $x_{cp} = B = A$, $x_{om} = -A$ и $k_B = -1$.

Таблица 4.1.

Типовые характеристики управления с существенной нелинейностью

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

Реле, которые коммутируют цепи контактами, называют *контактными реле* – это электромеханические реле. Статические реле (без подвижных элементов), называемые *бесконтактными реле*, коммутируют цепи с помощью электронных ключей, управляемых дросселей (магнитных усилителей) или других коммутационных (исполнительных) устройств, по существу заменяющих контакты. Таким образом, «исполнительным элементом» реле может быть коммутирующий контакт, электронный ключ или иное устройство, позволяющее производить включение и отключение электрической цепи.

«Воспринимающим элементом» реле в зависимости от физической природы входного сигнала и применяемого в реле исполнительного устройства может быть: механический или электромеханический преобразователь у контактного реле (см. [1] п. 3.4), параметрический или генераторный измерительный преобразователь (см. п. 8.1) у бесконтактного реле.

«Промежуточным элементом» в контактных реле является механическая передача (см. [1] п. 3.1-3.3). В бесконтактных реле это может быть регулятор, формирователь импульсов управления и др. (см. [1] п. 6.7, 6.8).

В зависимости от конструкции и назначения реле источником управляющего воздействия $x(t)$ на него могут быть силовые электрические цепи, электрические цепи управления, кинематические цепи электропривода, измерительные преобразователи температуры, давления и других физических величин. В зависимости от того, о какой физической величине передается информация на вход реле, различают реле тока, реле напряжения, реле скорости, реле температуры, реле давления и др.

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.

Некоторые реле, например, промежуточные реле, работают от исполнительных органов других реле и предназначаются для усиления сигнала, размножения сигнала и т. п. [4]. Управляющее воздействие на входе промежуточного реле изменяется скачкообразно другим реле или иным электроаппаратом (контактным или бесконтактным). В подобных и в некоторых других случаях реле может рассматриваться как логическое устройство релейно-контакторной системы управления электропривода.

4.2. Электромагнитные реле тока и напряжения

«Воспринимающим элементом» электромагнитного реле служит электромагнитный механизм (ЭММ), преобразующий входной электрический сигнал в перемещение якоря (см. [1] п.4). «Исполнительный элемент» – коммутирующий контакт (см. [1] п.2), на который воздействует якорь ЭММ с помощью механической передачи (см. [1] п.3), замыкая или размыкая контакт.

Электромагнитное реле (РЭМ) является элементом канала связи электрических цепей. Оно может быть представлено структурной схемой, как показано на рис. 4.1.

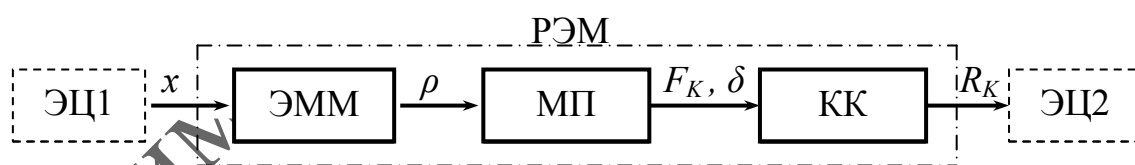


Рис. 4.1. Структурная схема электромагнитного реле (РЭМ):

Действие составных частей и в целом *нейтрального реле* аналогично действию магнитного контактора с самовозвратом (см. п. 2.1). Работа нейтрального реле не зависит от направления тока в обмотке катушки электромагнитного механизма (ЭММ). Контактная система может содержать от одного до 12 коммутирующих контактов (КК), рассчитанных на длительные постоянные или переменные токи до 16 А.. В механической пере-

даче (МП) предусматривается возвратная пружина. Поэтому нейтральное реле – аппарат с самовозвратом. Характеристика управления может быть представлена по табл. 4.1 нелинейностью 2 (при $k_B = 1$) или нелинейностью 3.

Особенности магнитопроводов ЭММ нейтральных реле постоянного тока и реле переменного тока такие же, как у контакторов постоянного тока и контакторов переменного тока соответственно (см. п. 2.3).

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). Входной переменной $x(t)=i(t)$ реле тока РТ является ток i , протекающий по контролируемой электрической цепи ЭЦ1. Выходная переменная $d(t)=R_K(t)$ – сопротивление R_K , вносимое реле в электрическую цепь ЭЦ2 своим коммутирующим контактом.

Реле напряжения применяют для контроля уровня напряжения ($x(t)=U(t)$) в электрической цепи и передачи информации о контролируемой величине в другую цепь с помощью коммутирующего контакта.

Реле тока и реле напряжения имеют одинаковую структуру (рис. 4.1), но функциональные части реле имеют конструктивные отличия. Существенно отличие в исполнении электромагнитной (втягивающей) катушки электромагнитного механизма реле. У реле тока обмотка катушки выполнена толстым проводом и имеет небольшое количество витков, что обеспечивает малое сопротивление протекающему по ней току. Сопротивление обмотки катушки реле напряжения большое. Оно создается большим количеством витков тонкого провода. Обмотку обычно включают на полное напряжение сети.

В *поляризованном реле* (это реле постоянного тока) установлен поляризованный электромагнитный механизм (см. [1] п.4.9). При одном направлении тока в катушке якорь притягивается к соответствующему полюсу сердечника ЭММ и при этом срабатывают контакты одной группы, при

другом направлении тока якорь перемещается к другому полюсу и срабатывают контакты другой группы. Характеристика управления поляризованного реле без самовозврата может быть представлена нелинейностью 5 по табл. 4.1.

Электромагнитные реле характеризуются следующими основными параметрами.

Напряжение (ток) срабатывания реле (x_{cp}) – наименьшее значение напряжения на клеммах катушки ЭММ или наименьшее значение тока в ней, при которых якорь надежно притягивается к сердечнику, а контакты переходят из разомкнутого состояния в замкнутое, и наоборот. В паспорте реле указано номинальное напряжение, на которое рассчитано включение ЭММ, несколько превышающее напряжение срабатывания. Этим обеспечивается надежность срабатывания реле.

Напряжение (ток) отпускания реле ($x_{от}$) – наибольшее напряжение на клеммах катушки ЭММ или наибольший ток в ней, при которых тяговое усилие, действующее на якорь ЭММ, уменьшается до значения, необходимого для надежного отпадания якоря от сердечника, а контакты переходят из замкнутого состояния в разомкнутое, и наоборот.

Коэффициент возврата реле – отношение напряжения (тока) отпускания к напряжению (току) срабатывания.

Время срабатывания реле (τ_{cp}) – промежуток времени с момента подачи напряжения срабатывания на катушку реле до момента переключения его контактов.

Время отпускания реле ($\tau_{от}$) – 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.

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 $I_{cp}=(1,1\dots7)I_{ном.р}$ относительно номинального тока катушки реле $I_{ном.р}$. Коэффициент возврата $k_B=0,2\dots0,4$. Реле выполняются с самовозвратом и с ручным возвратом. В последнем случае используют механическую передачу с защелкой (см. [1] п. 4.2).

Реле минимального напряжения настраивают на напряжение отпущения ($x_{от}=U_{от}$). Например, реле минимального напряжения серии РЭМ в зависимости от исполнения рассчитаны на 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 не окажется ниже минимального допустимого значения. Поэтому уставка реле минимального напряжения несколько ниже этого значения. Когда напряжение упадет до значения уставки реле на отпущение, оно отключится и тем самым вызовет отключение нагрузки (двигателя).

Реле максимального напряжения срабатывает и отключает контролируемое устройство, если напряжение в цепи 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 вызовет этим отключение нагрузки (двигателя в электроприводе).

Коммутирующие контакты максимальных и минимальных реле в электроприводе обычно включают в цепи катушек контакторов, с помощью которых отключают электродвигатели от питания.

Промежуточные реле, например типов РП-41, РП-42, ЭП-41, 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.

Герконовые реле в своей конструкции совмещают магнитопровод 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, заполняют его инертным газом и герметизируют. Если такой герметизированный контакт (геркон) поместить внутрь катушки (рис. 4.2а) и по обмотке w катушки пропустить ток I_y , то возникший магнитный поток, проходя по пластинам контакта, вызовет появление электромагнитной силы и смыкание контактных пластин. После того, как обмотка будет обесточена ($I_y=0$), контакт разомкнется, благодаря упругости контактных пластин.

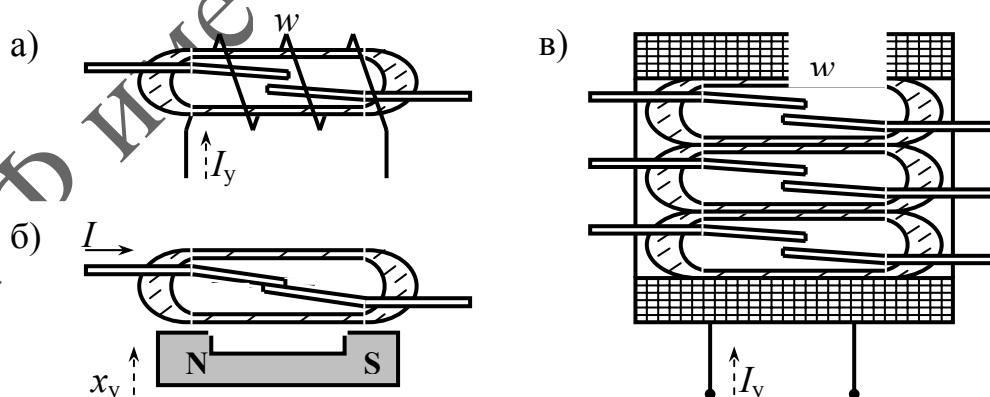


Рис. 4.2. Изобразительные модели простейших герконовых реле

Аналогичным образом реагирует геркон на магнитное поле, созданное постоянным магнитом N-S (рис. 4.2б). 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).

Пример герконового реле с тремя коммутирующими контактами приведен на рис. 4.2в. Герконы охвачены общей для них включающей катушкой. Количество герконов в одном реле может достигать 12 и более.

Конструкция герконового реле, показанная на рис. 4.2, имеет разомкнутую магнитную цепь. По этой причине большая доля магнитодвижущей силы $I_y w$ (МДС) катушки расходуется на проведение магнитного потока по воздуху. Кроме того, такая конструкция подвержена воздействию внешних магнитных полей. Для устранения этого недостатка магнитная система герконового реле (рис. 4.2а и рис. 4.2б) заключается в кожух (экран) из магнитомягкого материала. При этом увеличивается магнитная проводимость и уменьшается МДС срабатывания.

Разработаны конструкции герконовых реле с памятью.

Помимо герконовых реле с замыкающими контактами существуют герконовые реле с размыкающими контактами (в конструкцию добавлен постоянный магнит). Существуют также поляризованные герконовые реле.

По сравнению с обычными электромагнитными реле 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, $I_{\text{ном}}=6,3$ 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, изготавливают 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.

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). Для получения времени срабатывания или отпускания больше 250 мс применяют специальные реле, называемые *реле времени*.

По времени срабатывания τ_{cp} или времени отпускания τ_{om} реле подразделяют на быстродействующие ($\tau_{cp} < 50$ мс) и нормальные ($\tau_{cp} = 50 \dots 250$ мс). Для получения времени срабатывания или отпускания больше 250 мс применяют специальные реле, называемые *реле времени*.

4.3. Контактные реле времени

Реле времени предназначено для коммутации цепи управления с определенной выдержкой времени (задержкой) после поступления на вход реле сигнала управления из другой цепи. Канал связи электрических цепей (ЭЦ1, ЭЦ2) с реле времени (РВ) показан на рис. 4.3.

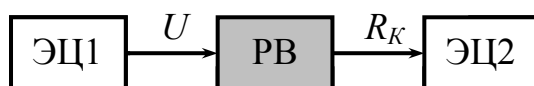


Рис. 4.3. Канал связи электрических цепей ЭЦ1, ЭЦ2 с реле времени РВ

Входным сигналом $x(t)=U(t)$ реле времени РВ является электрическое напряжение U , подаваемое из цепи ЭЦ1. Скачкообразное изменение напряжения U на входе реле служит началом отсчета времени выдержки. Как правило, нижний уровень входного сигнала $U=0$. Верхний уровень определяется напряжением U_1 источника питания цепи ЭЦ1.

Выходная переменная контактного реле $d(t)=R_K(t)$ – сопротивление R_K , вносимое реле в электрическую цепь ЭЦ2 коммутирующим контактом.

Интервал времени от момента подачи управляющего сигнала на вход реле до момента срабатывания реле называют *выдержкой времени реле при срабатывании* (включении), а интервал времени от момента снятия управляющего сигнала до момента времени отпускания реле – *выдержкой времени реле при отпуске* (отключении).

В зависимости от устройства различают контактные реле времени с анкерным механизмом (их называют еще электромеханическими реле времени), электромагнитные реле времени, моторные реле времени и полупроводниковые комбинированные реле времени. Основное различие между ними заключается в технической реализации *замедлителя* – устройства, создающего выдержку времени, то есть замедление передачи сигнала из цепи ЭЦ1 в цепь ЭЦ2.

В электроприводе реле времени применяют главным образом для программного управления электродвигателем.

Электропневматическое реле времени (типа ЭВ-100, ЭВ-200) имеет замедлитель в составе механической передачи МП – так называемый анкерный (часовой) механизм (АМ) (рис. 4.4а). Он увеличивает время движения подвижного контактного узла в контактной системе реле (см. [1] п. 4.7 и п. 4.8), создавая выдержку времени от 0,1 до 20 с при срабатывании реле.

В реле применяют электромагнитный механизм (ЭММ) постоянного или переменного тока. Настройка реле на требуемую выдержку времени осуществляется с помощью смещения и последующего фиксирования контактной детали коммутирующего контакта (КК).

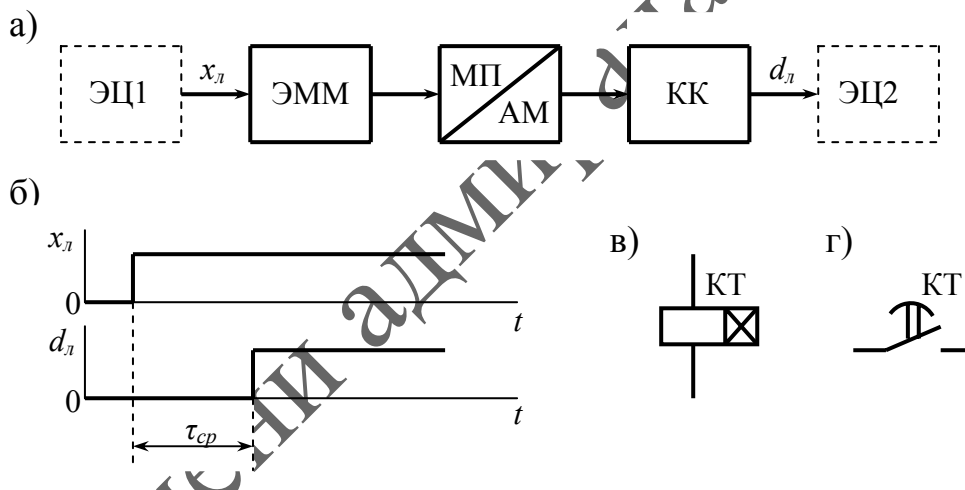


Рис. 4.4. Структурная схема (а), временные диаграммы работы (б), обозначения на электрической схеме катушки (в) и контактов (г) электромагнитного реле времени

Действие реле показано с помощью временных диаграмм на рис. 4.4б. Используются логические переменные:

x_n = « к катушке реле (рис. 4.4в) приложено напряжение U »,

d_n = « коммутирующий контакт (рис. 4.4г) замкнут ».

Задержка срабатывания реле обозначена через τ_{cp} .

Электромагнитное реле времени (типа РЭМ-200, РЭМ-20, РЭВ-800 и др.) имеет электромагнитный замедлитель в составе электромагнитного механизма (ЭММ) постоянного тока. Замедлитель выполнен в виде короткозамкнутого медного кольца (демпферная гильза ДГ – см. [1] п. 4.8). Реле создает выдержку времени до 10 с при отпускании.

Структурная схема электромагнитного реле времени приведена на рис 4.5а.

Действие реле (с замыкающим коммутирующим контактом КК) показано на рис. 4.5б с помощью временных диаграмм. Используются логические переменные:

x_n = « к катушке реле (рис. 4.5в) приложено напряжение U »,

d_n = « замыкающий контакт (рис. 4.5г) замкнут ».

Задержка отпущания реле обозначена через $\tau_{от}$.

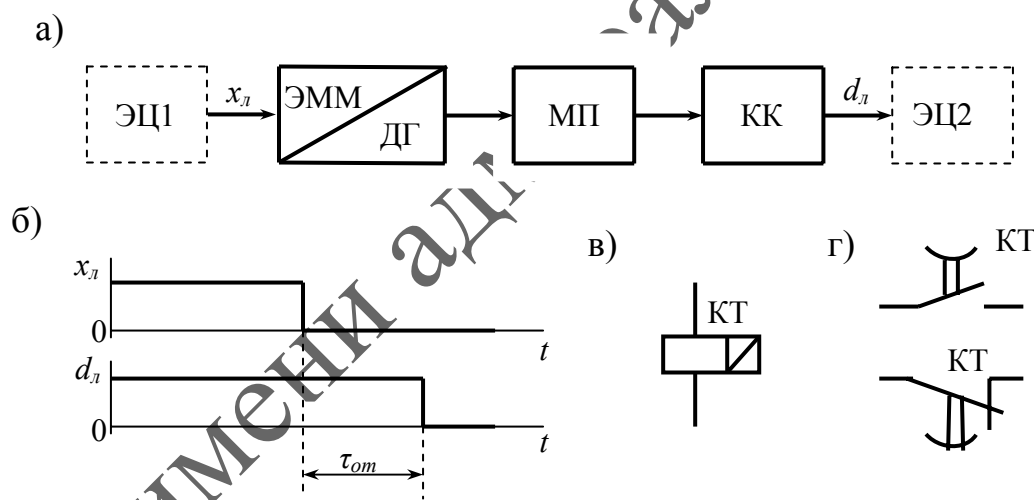


Рис. 4.5. Структурная схема (а), временные диаграммы работы (б), обозначения на электрической схеме катушки (в) и контакта (г) электромагнитного реле времени

На рис. 4.9в показано обозначение катушки электромагнитного реле времени с запаздыванием при отпускании, на рис. 4.9г – замыкающий контакт (вверху) и размыкающий контакт (внизу).

Настройка реле на требуемую выдержку времени осуществляется с помощью натяжения возвратной пружины и установкой немагнитных прокладок в ЭММ (см. [1] п. 4.8).

Электропневматическое реле времени (типа РВП-2) имеет замедлитель – пневматический механизм (ПМ) в составе механической передачи МП. Он увеличивает время перемещения механической передачи, создавая выдержку времени от 0,4 до 180 с как при срабатывании реле, так и при отпуске.

Пневматический механизм ПМ имеет камеру с диафрагмой, которая является элементом механической передачи. Скорость перемещения диафрагмы зависит 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.

Моторное реле времени (типа Е-52, РВ-4, ВС-10 и др.) создает выдержку времени (1...360 с и более) при включении реле за счет замедления, получаемого в редукторе синхронного двигателя. Структура реле (на примере программного реле типа ВС-10) показана на рис. 4.6а.

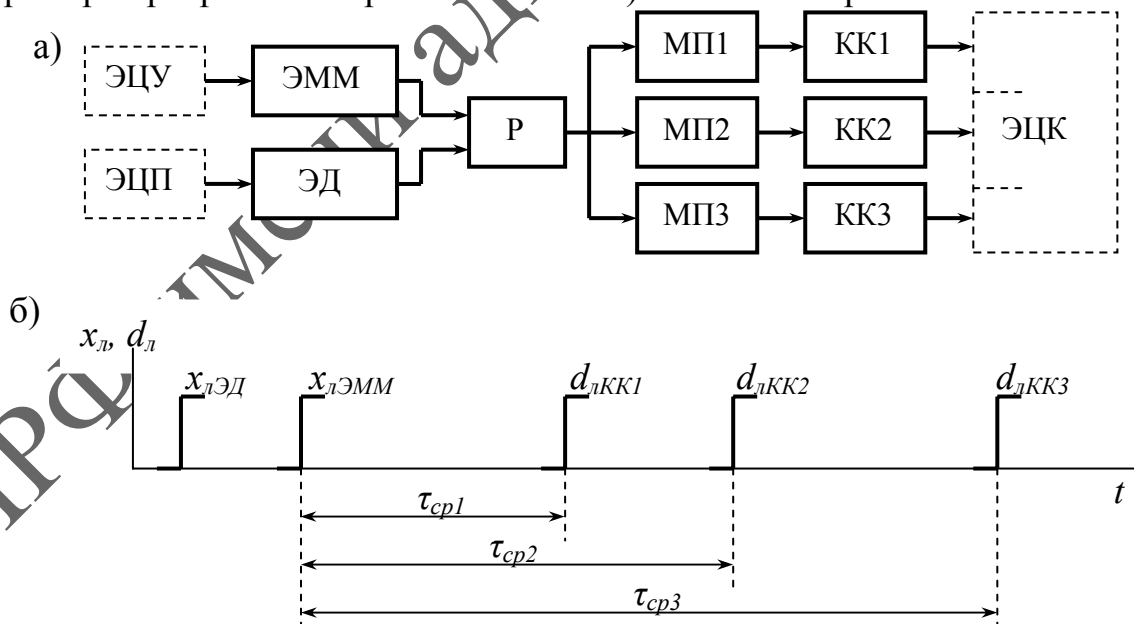


Рис. 4.6. Упрощенная структурная схема (а) и временные диаграммы работы (б) моторного реле времени типа ВС-10

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. 4.10а) или шесть. В каждой механической передаче 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. 4.6б участками временных диаграмм. Все воздействия характеризуются логическими переменными x_l (входными), d_l (выходными). Индексы у логических переменных определяют отношение каждой переменной к конкретной связи, показанной на рис. 4.6а. 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 (дополнительным контактом). Возврат реле в исходное состояние произойдет после отключения электромагнитного механизма сигналом $x_{лЭММ} = 0$.

4.4. Полупроводниковые и комбинированные реле

Полупроводниковое реле тока обычно содержит полупроводниковый ключ (импульсный усилитель) в составе исполнительного устройства, измерительный преобразователь, а также элементы логики в составе устройства управления (см. [1] п. 6.1 ... 6.4). Полупроводниковое реле назы-

вают также электронным реле [2]. С помощью электронного чаще всего транзисторного ключа осуществляется включение и отключение выходного электромагнитного реле напряжения, которое конструктивно объединяют с полупроводниковым реле. Упрощенная функциональная схема полупроводникового реле переменного тока показана на рис. 4.7 [9].

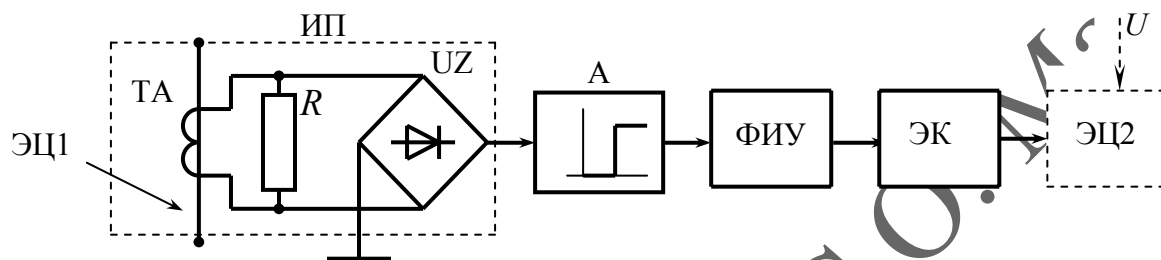


Рис. 4.7. Упрощенная функциональная схема полупроводникового реле тока

Измерительный преобразователь (ИП) обычно 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 (UZ) и сравнивается в *компараторе*¹⁴ (пороговым элементом А) с опорным напряжением, от величины которого зависит ток срабатывания реле. В качестве компаратора обычно используют *операционный усилитель*¹⁵ с положительной обратной связью. Характеристику управления компаратора можно представить по табл. 4.1 нелинейностью 2 (первый квадрант), если под А понимать опорное напряжение и под d – напряжение на выходе компаратора.

Сигнал с компаратора передается на формирователь импульсов управления (ФИУ) электронным ключом (ЭК). Когда ток в

¹⁴ Компаратор – устройство сравнения двух копий одних и тех же данных с целью проверки их корректности, идентичности. - см. Терминологический словарь по автоматике, информатике и вычислительной технике/ В. В. Зотов, Ю. Н. Маслов, А. Е. Пядочкин и др. – М.: Высш. шк., 1989.

¹⁵ Операционный усилитель (ОУ) – усилитель постоянного тока интегрального исполнения с большим коэффициентом усиления по напряжению (до 10^5). Напряжение на выходе ОУ изменяется в диапазоне, ограниченном двумя фиксированными значениями напряжения разного знака.

контролируемой цепи превысит значение уставки, заданной опорным напряжением, электронный ключ откроется по сигналу с компаратора, снизив сопротивление в коммутируемой цепи (ЭЦ2) от большого значения до малого значения. Ключ изменяет свое состояние, если к цепи подведено от источника электрической энергии необходимое по величине напряжение U . Если в цепи ЭЦ2 установлено контактное выходное реле (точнее его включающая катушка), то выходное реле сработает. Уменьшение тока в контролируемой цепи ниже определенного значения вызовет переход электронного ключа в непроводящее состояние и отключение выходного реле в цепи ЭЦ2.

В некоторых полупроводниковых реле предусматривают элементы (например, тиристорные оптопары), обеспечивающие гальваническую развязку электрических цепей ЭЦ1 и ЭЦ2.

У реле постоянного тока в составе измерительного преобразователя применяют шунт и специальную схему преобразования напряжения, снимаемого с шунта.

Полупроводниковое реле напряжения имеет в своем составе измерительный преобразователь, логические элементы, электронный ключ. Оно может быть представлено функциональной схемой как на рис. 4.7 с той лишь разницей, что вместо трансформатора тока в измерительном преобразователе используется трансформатор напряжения.

На рис. 4.8 приведена упрощенная функциональная схема трехфазного реле минимального напряжения [9].

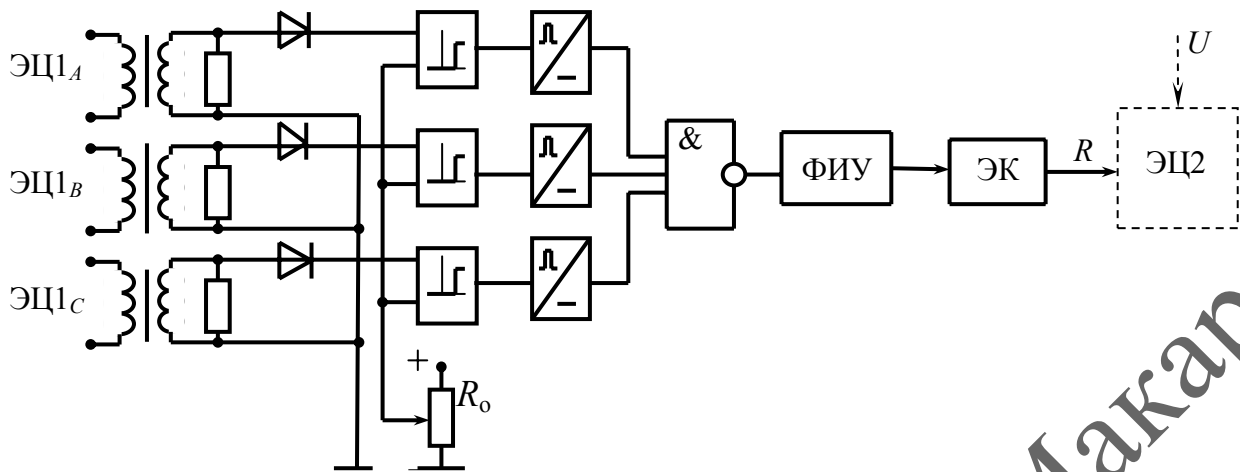


Рис. 4.8. Упрощенная функциональная схема трехфазного полупроводникового реле напряжения

С помощью трехфазного реле минимального напряжения осуществляется защита трехфазных приемников электрической энергии при недопустимом снижении симметричного фазного или линейного напряжения в контролируемых цепях ЭЦ1_А, ЭЦ1_В, ЭЦ1_С.

Уставка напряжения отпущения реле U_{om} задается с помощью резистора R_0 одинаковой для всех трех контролируемых напряжений U_A , U_B , U_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. 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. Сопротивление в управляемой электрической цепи ЭЦ2 будет скачком снижено им до минимального значения. Если, например, в этой цепи предусмотрено выходное электромагнитное реле, то оно сработает и подаст команду на отключение приемника

электрической энергии (электродвигателя) от питания по всем контролируемым цепям ЭЦ1_А, ЭЦ1_В, ЭЦ1_С.

Для защиты электродвигателей, тиристорных преобразователей или других трехфазных потребителей при снижении симметричного напряжения, асимметрии междуфазных напряжений и обратном чередовании фаз применяют 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 $(0,85...1,10)U_{ном}$.

Полупроводниковое комбинированное реле времени (типа ВЛ) создает выдержку времени (0,1...200 с и более до 100 ч) с помощью электронного устройства замедления. В качестве исполнительного элемента используется малогабаритное выходное электромагнитное реле. Структурная схема полупроводникового комбинированного реле времени приведена на рис. 4.9а.

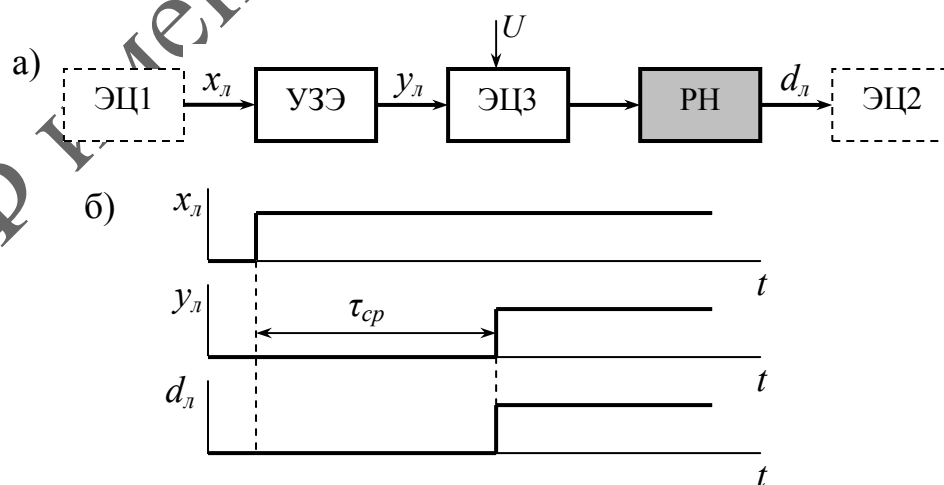


Рис. 4.9. Структурная схема (а) и временные диаграммы работы (б) полупроводникового комбинированного реле времени

Сигнал x_n передается из электрической цепи ЭЦ1 в цепь ЭЦ2 с задержкой времени τ_{cp} (рис. 4.9б). Выходной сигнал d_n формирует электромагнитное реле напряжения (РН), катушка которого подключается под напряжение U цепи ЭЦ3 выходным сигналом y_n 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_C на конденсаторе С после подачи по цепи ЭЦ1 напряжения на вход устройства задержки. Выходной сигнал y_n формируется компаратором устройства задержки на основе сравнения U_C 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).

4.5. Оптоэлектронные твердотельные реле

Оптоэлектронные твердотельные реле являются аппаратами нового поколения. Они функционально эквивалентны электромагнитным реле с замыкающими контактами, но вместо контактов содержат сильноточные ключи с гальванической развязкой между входами управления и нагрузкой. Входной элемент – светодиод, выходной коммутирующий элемент – тиристор, симистор или полевой транзистор. Реле имеет пластмассовый корпус.

Оптоэлектронные твердотельные реле делят на четыре категории по функциональному назначению и роду тока: реле переменного тока; реле постоянного тока, реле общего назначения, реверсивные реле.

Реле переменного тока с оптосимисторами является альтернативой электромагнитного реле.

Оно состоит из светодиода, оптически связанного 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).

Применение: коммутация 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.

Применение: коммутация цепей постоянного тока, в том числе силовых цепей электродвигателей постоянного тока, импульсных источников питания, быстродействующих систем защиты.

Реле общего назначения являются альтернативой электромеханическим и полупроводниковым реле на основе тиристорov.

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.

Применение: коммутация 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.

По обозначениям микросхем (в соответствии с ЕНСК.431162.001 ТУ):

5П19 – двухполярные реле;

5П20 – однополярные реле;

5П36 – трехфазные реле;

5П55 – реверсивные реле.

4.6. Реле, контролирующее неэлектрические параметры

В автоматизированных электроприводах и системах автоматики применяют реле, контролирующее неэлектрические параметры. К ним относятся реле перемещения, реле уровня, реле скорости, реле давления, реле температуры и др. Большинство таких *контактных реле*, контролирующее неэлектрические параметры, может быть представлено структурными схемами, показанными на рис. 4.10.

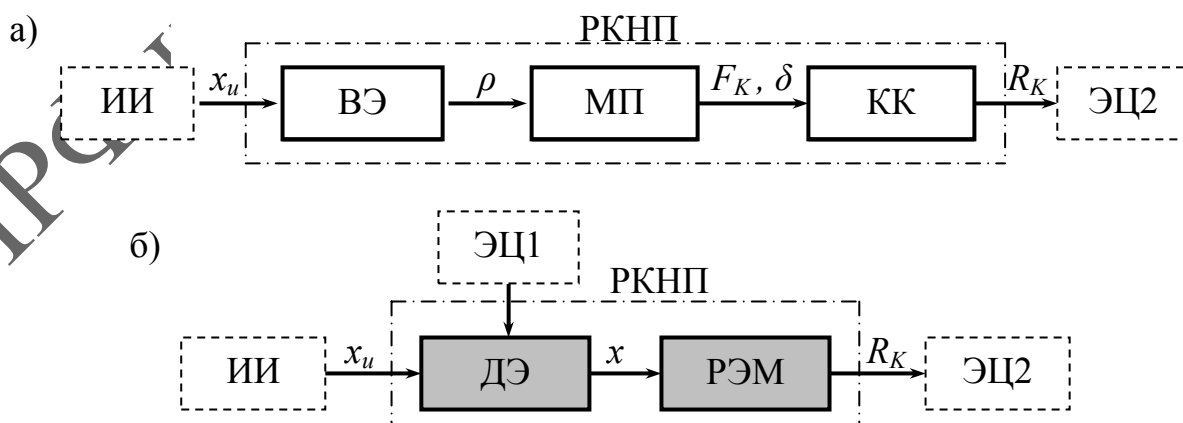


Рис. 4.10. Структурная схема контактного реле

Структурная схема на рис. 4.10а является по существу обобщением структурной схемы электромагнитного реле, изображенной на рис. 4.1. Основное отличие реле, контролирующего неэлектрический параметр, (РКНП) от электромагнитного реле (РЭМ), показанного на рис. 4.1, относится к воспринимающему устройству (ВЭ), так как источником информации (ИИ) для него является не электрическая цепь (как ЭЦ1 на рис. 4.1), а среда, характеризуемая неэлектрической физической величиной x , (информационным параметром – перемещением, скоростью, давлением, температурой или др.).

В *механическом реле положения* воспринимающим элементом служит рычаг, толкатель или иное механическое устройство, по кинематической цепи которого передается сигнал о перемещении контролируемого объекта. В качестве реле положения может рассматриваться путевой или конечный выключатель. Обычно эти выключатели относят к числу командоаппаратов.

В *механическом реле уровня* воспринимающим элементом, как правило, служит поплавок. Перемещение его вслед за контролируемым уровнем жидкости (воды, масла и т.п.) передается механической передаче (МП) с переключающей пружиной (см. [1] п. 3.2, п. 3.3). МП воздействует на коммутирующий контакт (КК), вызывая замыкание и размыкание контакта при определенных уровнях жидкости. Реле уровня часто используют для автоматического включения и отключения электропривода насоса, а также в системах сигнализации.

Механическое реле скорости реагирует на направление и частоту вращения вала двигателя. Оно имеет воспринимающий элемент, который действует по принципу асинхронного электродвигателя (рис. 4.11).

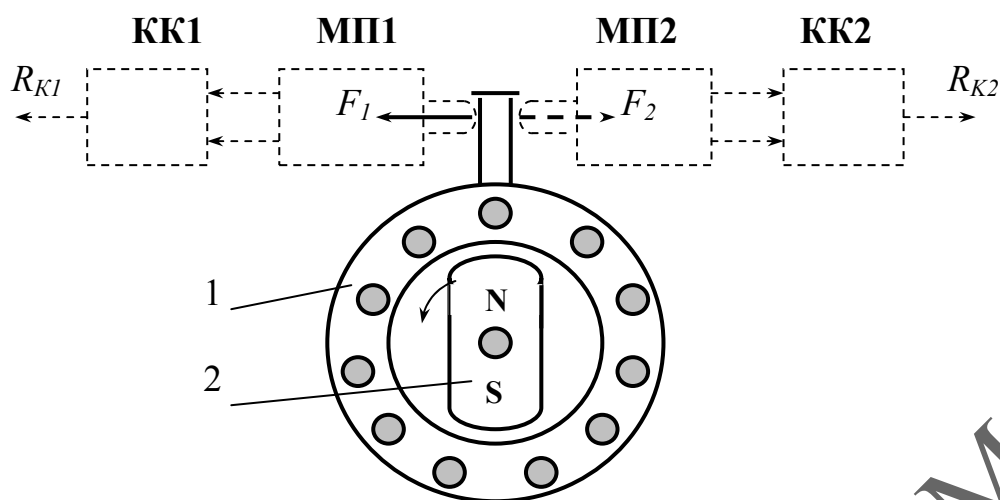


Рис. 4.11. Воспринимающий элемент механического реле скорости

Реле механически соединяется с валом двигателя и постоянный магнит 2 вращается этим валом, внутри цилиндра 1 типа «белчья клетка». Токи, индуцированные в стержнях клетки, взаимодействуют с вращающимся магнитным полем постоянного магнита и создают для цилиндра вращающий момент. В зависимости от направления вращения магнита (и вала) механическая передача МП1 или МП2 будет воспринимать усилие F_1 или F_2 , пропорциональное по величине скорости вращения вала. Коммутационное положение контакта КК1 или контакта КК2 определится величиной соответствующей силы и, следовательно, скоростью вращения вала.

Уставку срабатывания реле в зависимости от скорости вращения настраивают путем регулировки натяжения возвратной пружины передаточного механизма, который может иметь также переключающую пружину для ускорения процесса коммутации (см. [1] п. 3.2, п. 3.3).

Механическое реле давления предназначено для автоматического включения электроприводов насосов, поддерживающих определенное давление в системах, и использования в различных устройствах автоматики и сигнализации.

В качестве воспринимающего элемента в реле давления применяется мембрана или сильфон. Предусматривается регулировка уставки по давлению на срабатывание реле. Контакты реле давления, например типа РДК-57, позволяют разрывать электрическую цепь напряжением 380 В, мощностью до 350 Вт.

Механическое температурное реле реагирует на изменение температуры воспринимающего элемента, принцип действия которого подобен действию биметаллического электротеплового преобразователя (см. [1] п. 3.4) с той разницей, что на нагрев биметалла оказывает влияние не ток, а окружающая среда. Конструктивное исполнение воспринимающего элемента 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 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.

Комплектное реле контроля неэлектрических параметров состоит из электромагнитного реле (РЭМ) и электрического датчика (ДЭ) – измерительного преобразователя неэлектрической величины в электрическое напряжение $x=U_u$ (или ток: $x=I_u$), которое подается на обмотку катушки малогабаритного РЭМ (рис. 4.10б). Для контроля величины перемещения используется ДЭ перемещения, для контроля скорости – ДЭ скорости, для

контроля температуры – ДЭ температуры. Например, для устройств автоматики в качестве реле скорости и направления вращения используется тахогенератор постоянного тока (см. п.) совместно с поляризованным реле.

Среди *бесконтактных реле*, контролирующих неэлектрические величины, получили распространение температурные реле на основе термистора (терморезистора) – полупроводникового прибора с существенно нелинейной вольтамперной характеристикой и большим по абсолютной величине отрицательным температурным коэффициентом 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 СТЗ-27) в рабочем диапазоне температур от 25 °С. Номинальная мощность рассеяния 70 мВт.

5. Аппараты защиты

5.1. 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. 5.1а), с двумя аппаратами (рис. 5.1б) и с тремя аппаратами (рис. 5.1в).

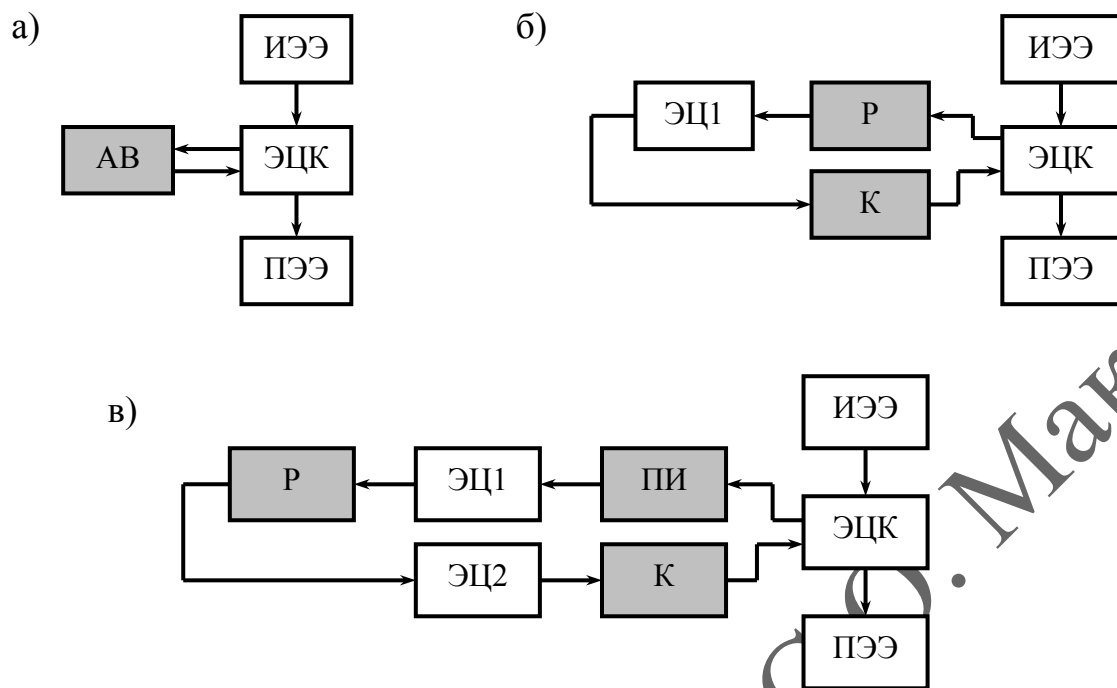


Рис. 5.1. Структурные схемы узлов автоматической защиты

Источником информации для аппарата защиты служит канал передачи энергии от источника электрической энергии (ИЭЭ) до приемника электрической энергии (ПЭЭ) по электрической цепи (ЭЦК). Контролируемый параметр цепи ЭЦК – ток или (u) напряжение.

В схеме на рис. 5.1а аппаратом защиты является *автоматический выключатель* (АВ) или *предохранитель* с плавкой вставкой. Автоматический выключатель (см. п. 5.4), называемый также *автоматом*, выполняет функцию защиты, разрывая своими контактами ЭЦК при автоматическом отключении сверхтоком. Предохранитель (см. п. 5.6) разрывает ЭЦК своей плавкой вставкой, разрушаемой сверхтоком.

Для схем на рис. 5.1б и рис. 5.1в аппаратом защиты обычно называют реле (Р) тока или напряжения, применяемое совместно с контактором (К). Для защиты двигателей электроприводов от перегрузки применяются *электроплавные реле* (см. п. 5.3). Функции контроля параметров ЭЦК и гальванической развязки цепи управления (ЭЦ1) и силовой ЭЦК может выпол-

нять (на рис. 5.1в) *измерительный преобразователь* (ПИ), например, трансформатор тока или трансформатор напряжения.

Электродвигатель привода защищают от перегрузки с помощью электротеплового реле, если ток в двигателе превышает на 25...400% номинальный 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».

5.2. Электромагнитные аппараты защиты

Электромагнитное реле максимального тока 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. 5.2. 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} .

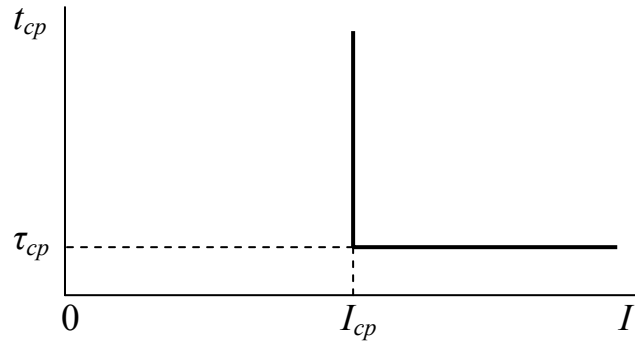


Рис. 5.2. Времятоковая характеристика реле максимального тока

На рис. 5.3 приведены примеры, иллюстрирующие принцип построения схем защиты с реле максимального тока.

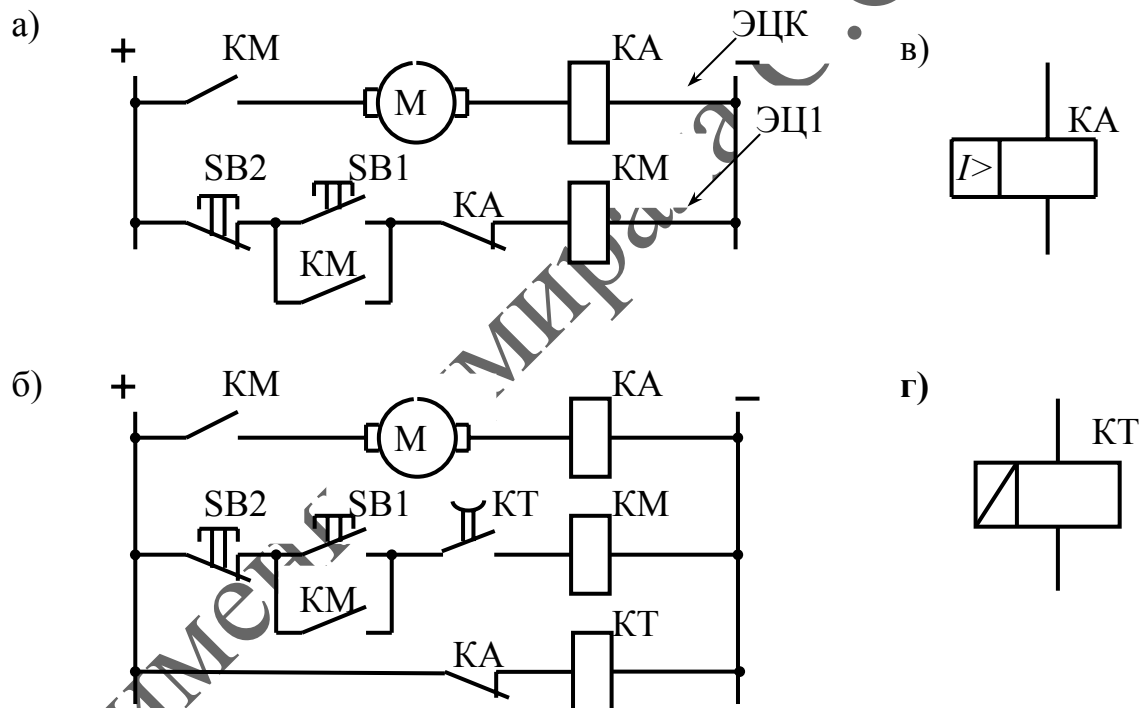


Рис. 5.3. Фрагменты схем защиты электродвигателя от сверхтоков (а, б) и применяемые условные обозначение катушки реле с обмоткой максимального тока (в) и катушки электромагнитного реле времени (г)

В схеме на рис. 5.3а 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 схе-

ме показана только якорная обмотка двигателя). Непосредственное включение и отключение двигателя осуществляется главным контактом КМ контактора КМ.

Пуск двигателя М (рис. 5.3а) состоится 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 [9] 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 двигателя 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. 5.3б реле максимального тока КА используется для ограничения времени «стоянки двигателя под током», осуществляя защиту двигателя от перегрузки.

Реле 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 (τ_{om}) реле КТ успеет снизиться до величины, меньшей $I_{отп}$ тока отпускания реле КА. Иначе говоря, при пуске двигателя реле тока КА должно отпустить раньше, чем отпустит реле времени КТ, тогда замыкания 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 τ_{om} 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 $k_B \geq 0,7$.

Электромагнитное реле минимального напряжения применяют для защиты электропривода при снижении напряжения в питающей сети относительно его номинального значения $U_{Нсети}$. Реле минимального напряжения настраивают на отпущание при определенном значении параметра отпущания U_{om} . Реле отпустит, если напряжение $U_{сети}$ в сети снизится до значения $U < U_{om}$ (например, $U_{om} = 0,85 U_{Нсети}$). При этом тяговая характеристика реле располагается ниже его механической характеристики.

В схеме на рис. 5.4а реле минимального напряжения KV предназначено для отключения схемы управления от питания при снижении напряжения питания до величины уставки напряжения отпущания реле $U_{om} < U_{Нсети}$. 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.

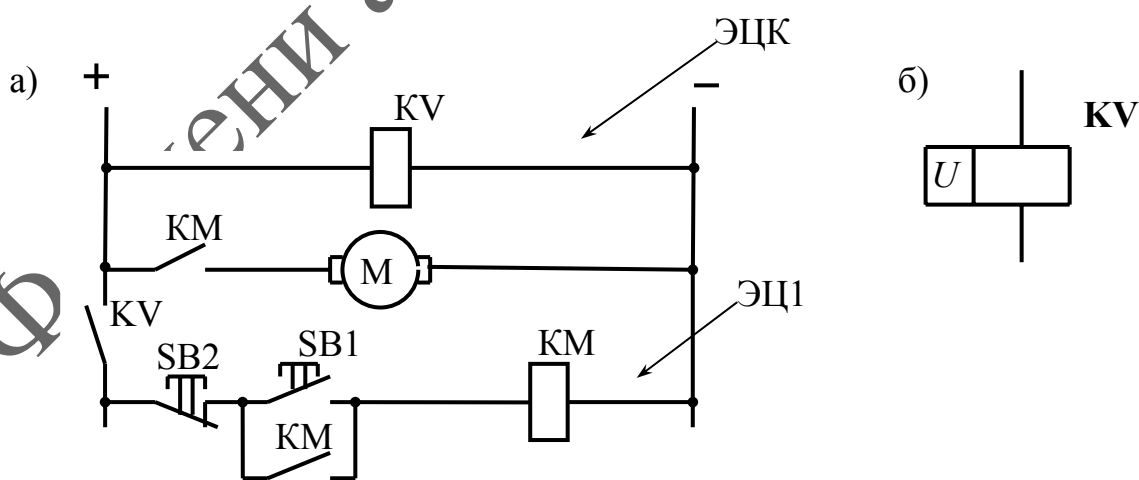


Рис. 5.4. Фрагмент схемы с минимальной защитой при использовании реле напряжения (а), условное обозначение катушки реле с обмоткой напряжения (в)

Когда реле KV отпустит при снижении напряжения в сети до напряжения отпускания; контакт KV разомкнется и отключит от питания катушку контактора КМ. Двигатель М будет выключен главным контактом КМ контактора. Вновь включить двигатель удастся нажатием кнопки SB1 тогда, когда напряжение в сети превысит напряжение срабатывания реле KV.

Электромагнитное реле максимального напряжения настраивают на срабатывание при определенном значении уставки на срабатывание $U_{cp} > U_{нсети}$. Реле срабатывает, если напряжение сети $U_{сети} > U_{cp}$. Тяговая характеристика реле при срабатывании располагается выше механической характеристики реле. Если в схеме на рис. 5.3 вместо реле минимального 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 (см. п. 3.2) 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.

В схемах на рис. 5.3 и на рис. 5.4 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 зашунтирует 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 5.1б и рис. 5.1в, построены узлы защиты в электроприводах переменного тока с использованием реле тока, реле напряжения и контакторов, предназначенных для работы в цепях переменного тока. В системах с бесконтактной коммутацией электрических цепей узлы защит выполняются по схеме рис. 5.1в.

5.3. Электротепловые реле защиты

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. 5.1б.

Воспринимающим элементом теплового реле служит биметаллический электротепловой преобразователь (см. [1] п. 3.4). В реле применяется механическая передача с защелкой (см. [1] п. 3.2). 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, обтекаемым тем же током нагрузки.

При выборе теплового реле необходимо согласовать его времятоковую характеристику с характеристикой нагрева защищаемого объекта (электродвигателя). Чем больше ток перегрузки I относительно номинального тока $I_{Н\text{дв}}$ 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-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 [9]:

$$t_{cp} = T_P \ln \frac{I^2 - I_{нач}^2}{I^2 - I_\infty^2}.$$

На рис. 5.4а 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_∞ .

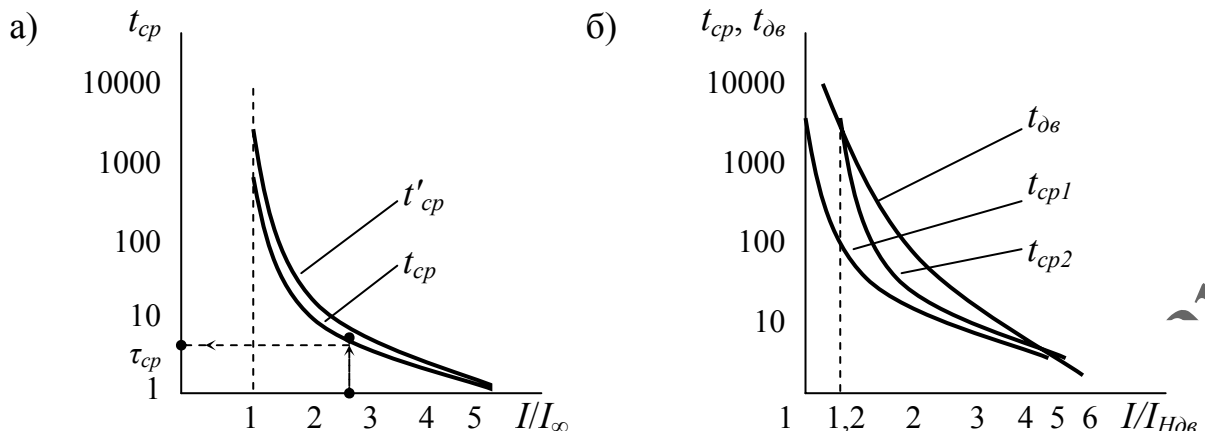


Рис. 5.5. Времятоковые характеристики электротепловых реле

Времятоковая характеристика теплового реле позволяет определить время срабатывания реле (τ_{cp}) при определенном значении тока перегрузки. На графиках рис. 5.5 по оси ординат отложено примерное время срабатывания реле в секундах.

Характеристика нагрева двигателя показана на рис. 5.5б. Она представляет собой зависимость допустимого времени $t_{\delta в}$ нахождения двигателя под током перегрузки (когда температура двигателя достигает заданного предельного значения) от отношения $I/I_{H\delta в}$, где $I_{H\delta в}$ – номинальный ток двигателя. Времятоковые характеристики t_{cp1} и t_{cp2} соответствуют разным тепловым реле. У одного реле (характеристика t_{cp1}) ток срабатывания I_{∞} равен номинальному току двигателя $I_{H\delta в}$, 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 $I_{Нреле}=1,2I_{\infty}$, равным номинальному току $I_{Ндв}$ 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% [9].

На рис. 5.6 приведена электрическая схема, иллюстрирующая применение тепловых реле КК1 и КК2 для защиты асинхронного двигателя М от перегрузки.

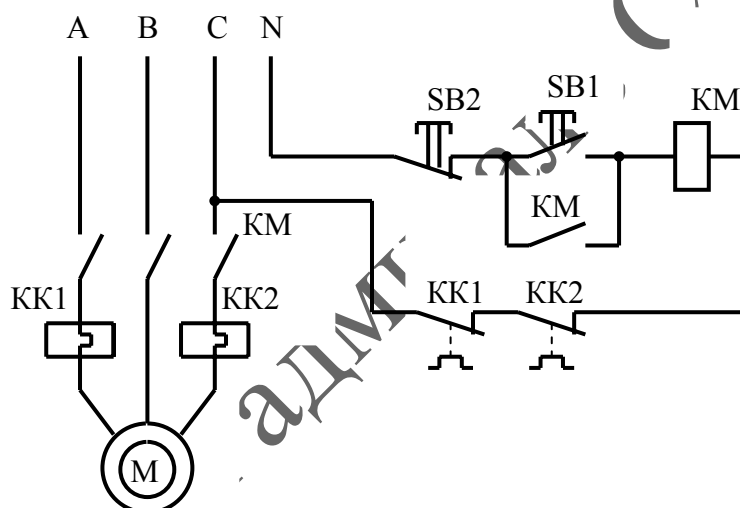


Рис. 5.6. Фрагмент электрической схемы с тепловыми реле защиты двигателя от перегрузки

Электротепловые реле типа ТРТ обеспечивают защиту асинхронного двигателя в следующих условиях: при длительной (свыше 20 мин) перегрузке двигателя током свыше $1,35I_{Нреле}$; при затяжном пуске; при обрыве одной фазы. Регулятор реле позволяет изменять уставку тока в пределах $\pm 0,15I_{Нреле}$. 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 износостойчивость 10^4 срабатываний.

В схеме на рис. 5.6 кроме защиты от перегрузки реализована нулевая защита на контакторе КМ.

5.4. Автоматические воздушные выключатели

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 потому, что гашение электрической дуги на коммутирующем контакте происходит в воздушной среде. Узел защиты с автоматическим выключателем (АВ) рассмотрен в п. 5.1, рис. 5.1а.

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. [1], п. 4.1) с якорем, втягивающимся в катушку под действием электромагнитной силы тяги. Якорь воздействует на защелку механической передачи (см. [1], п. 3.2), которую (МП) 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. [1], п. 3.4.), а также полупроводниковые расцепители.

Автоматический воздушный выключатель с несколькими видами защит представлен структурной схемой на рис. 5.7.

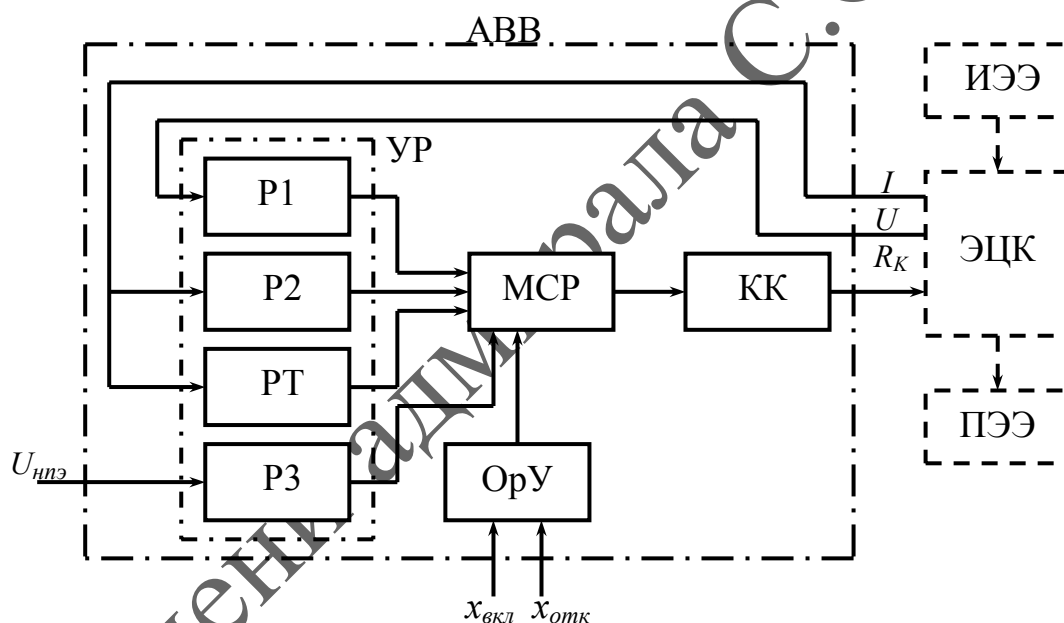


Рис. 5.7. Структурная схема автоматического воздушного выключателя с несколькими видами защит

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. [1], п. 2.8). В некоторых автоматах устанавливают дополнительные дугогасительные контакты, и могут быть предусмотрены вспомогательные контакты для коммутации слаботочных цепей сигнализации и управления.

В зависимости от типа автомата его узел расцепителей (УР) состоит из определенной комбинации расцепителей из следующего состава:

P1 – расцепитель минимального напряжения U (*минимальный расцепитель*, реагирующий на снижение напряжения);

P2 – расцепитель максимального тока I (*максимальный расцепитель*, реагирующий на ток короткого замыкания);

P3 – независимый расцепитель, на который подается сигнал $U_{нпэ}$, несущий информацию, например, об изменении направления передачи энергии в цепи ЭЦП;

PT – расцепитель тока перегрузки (тепловой расцепитель, реагирующий на ток перегрузки).

Узел УР *установочного* автомата с комбинированным расцепителем состоит из расцепителей P2 и PT. *Универсальный автомат* имеет расцепители P1, P2. 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. [9]. 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. [1] п. 3.2). Это приводит к размыканию коммутирующих контактов КК. Поэтому отключение поврежденного участка электрической цепи ЭЦК и приемника ПЭЭ произойдет тогда, когда хотя бы один из контролируе-

мых 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. 5.7).

На рис. 5.8а 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 установочного автомата с комбинированным расцепителем изображен на рис. 5.8б.

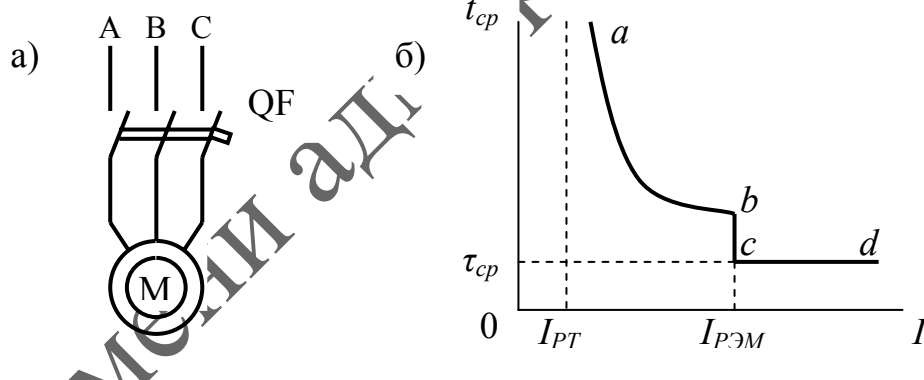


Рис. 5.8. Подключение установочного автомата к трехфазной сети (а) и времятоковая характеристика автомата с комбинированным электромагнитным и электротепловым расцепителем (б)

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. 5.3). Участок $c-d$ обусловлен действием электромагнитного расцепителя максимального тока. Время срабатывания τ_{cp} авто-

матического выключателя от электромагнитного расцепителя практически не зависит от силы тока I , если сила тока превышает уставку $I_{РЭМ}$ электромагнитного расцепителя.

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:

А3000 – наиболее распространенная серия. Рассчитаны на переменные напряжения 380, 660 В, постоянные напряжения до 440 В. Отключаемые токи (коммутационная способность) до 60 кА.

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 10 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.

Автоматы выбирают по числу полюсов, по номинальным значениям тока и напряжения. Номинальные значения напряжения $U_{Нав}$ и тока $I_{Нав}$ ав-

томата по отношению к номинальному значению напряжения сети $U_{Hсети}$ и номинальному току нагрузки (двигателя) $I_{Hдв}$ должны удовлетворять следующим условиям:

$$U_{Нав} \geq U_{Hсети}, \quad I_{Нав} \geq I_{Hдв}.$$

Уставки $I_{РТ}$, $I_{РЭМ}$ токов для защиты двигателя электропривода обычно определяют следующим образом:

для электротеплового расцепителя (защита от перегрузки) – по номинальному току двигателя $I_{Hдв}$,

$$I_{РТ} \geq (1,2 \dots 1,4) I_{Hдв};$$

для электромагнитного расцепителя (защита от короткого замыкания) – по наибольшему значению тока какого-либо переходного процесса $I_{пер}$ (пуск, реверс, торможение),

$$I_{РЭМ} \geq (1,5 \dots 2,0) I_{пер}.$$

Предельный ток отключения автомата должен быть не менее возможного тока короткого замыкания в цепи.

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, $(12 \dots 14)I_{Нав}$, 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.

5.5. Выключатели 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 подключен чувствительный орган устройства управления (УУ) – электромагнитный механизм (ЭММ), воздействующий на защелку привода коммутирующих контактов. Защитный проводник (РЕ) отделен от ВДТ.

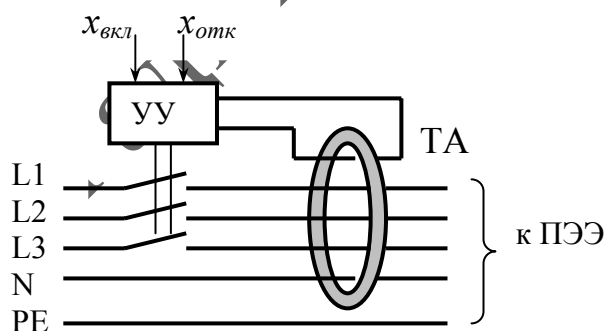


Рис. 5.9. Функциональная схема участка трехфазной цепи с выключателем дифференциального тока

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.

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.

По количеству полюсов (коммутирующих контактов) УЗО подразделяют на двухполюсные (фаза, например, L1 + нейтраль N) и четырехполюсные (фазы L1, L2, L3 + нейтраль N). УЗО подключают с помощью зажимов к соответствующим проводам, идущим к приемнику электрической энергии. Схема подключений УЗО в трехфазной сети показана на рис. 5.10.

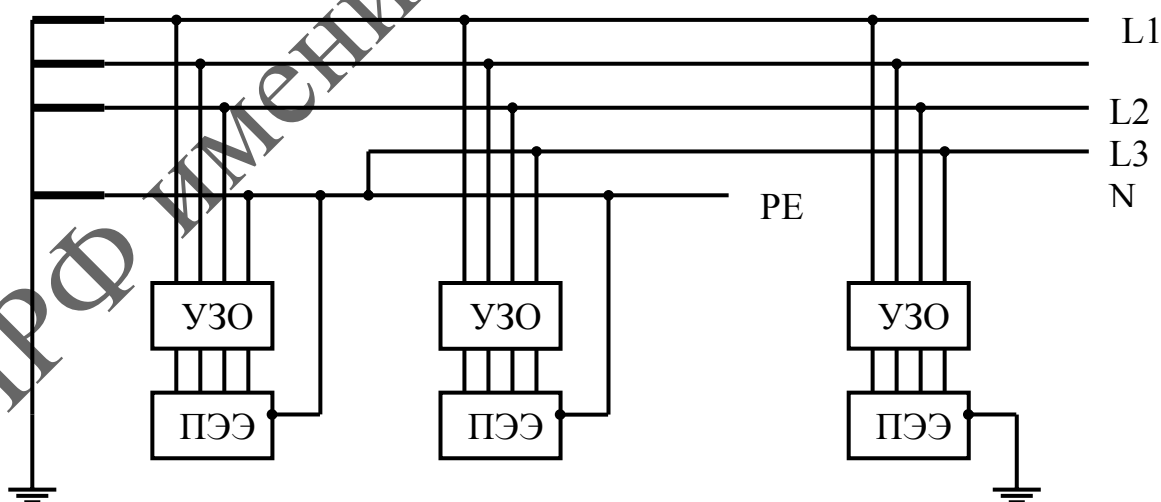


Рис. 5.10. Схема подключений четырехполюсных УЗО

Для ВДТ нормируется номинальный длительно протекающий через выключатель ток. Для АВДТ нормируется номинальный ток электротепловых расцепителей, установленных в фазные линии.

5.6. Предохранители

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.

Конструкции предохранителей разнообразны. В большинстве своем они состоят из следующих частей (рис. 5.11а): 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.

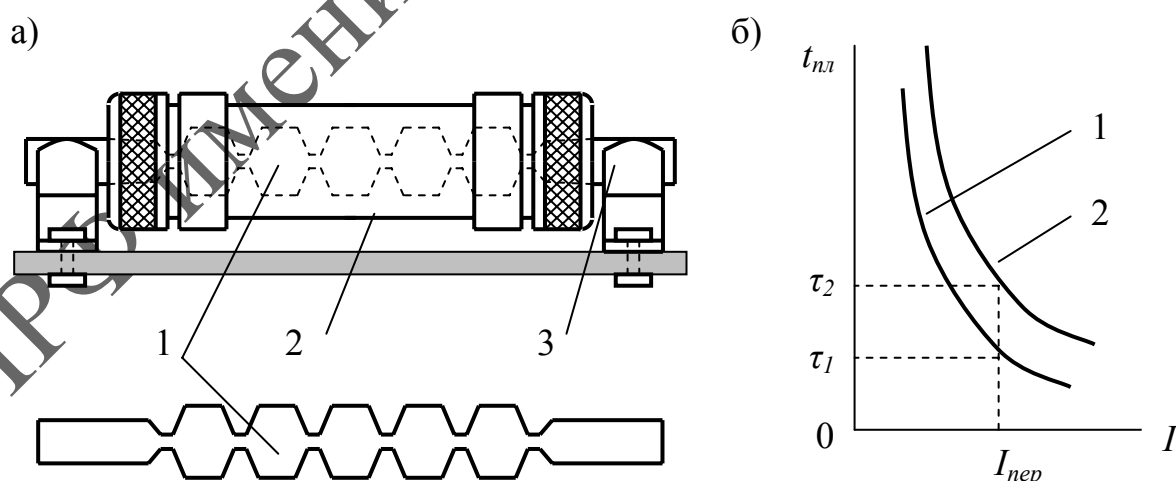


Рис. 5.11. Предохранитель с плавкой вставкой (а) и времятоковые характеристики плавких вставок (б)

Времятоковая (*защитная*) характеристика предохранителя представляет собой зависимость времени $t_{пл}$ плавления вставки от протекающего через нее тока I . На рис.5.12б 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, возникшая в среде песка, разбивается на множество мелких дуг и быстро гаснет.

Ток, на который рассчитана плавкая вставка для длительной работы, называют *номинальным током плавкой вставки* $I_{Нвс}$. Ток, на который рассчитаны токоведущие и контактные части предохранителя, называют *номинальным током предохранителя* ($I_{Нпр}$).

Для повышения чувствительности к плавящему току плавкие вставки изготавливают фигурной формы, как на рис. 5.11а. Током перегрузки $I > I_{Нвс}$ 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 фигур-

ной 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 плавления. Оловянные шарики растворяют медную проволоку в местах своего расположения. Возникшая в этих местах электрическая дуга расплавляет затем медную проволоку по всей длине.

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.

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 соблюдении условия $I_{Нпр} \geq I_{Нес}$. Если нагрузкой является электродвигатель, то следует учитывать пусковой ток этого двигателя или ток реверсирования. Для защиты асинхронного двигателя номинальный ток плавкой вставки принимают:

$$I_{Нес} = (I_{Ндв} \lambda_i) / \alpha ,$$

где $I_{Ндв}$ – 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.

6. Командоаппараты и другие аппараты ручного управления

6.1. Общие сведения

Командоаппаратами называют устройства преимущественно ручного управления, предназначенные для переключений в цепях управления электроаппаратами постоянного или переменного тока [4]. Замыкая и размыкая при помощи командоаппарата те или иные цепи, человек-оператор может дистанционно подать команду¹⁶, 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-машинна» и структурная схема командоаппарата отображены на рис. 6.1 в виде схем.

¹⁶ Команда представляет собой управляющий сигнал, который инициирует выполнение определенной операции в исполнительном устройстве – см. Першиков В.И., Савинков В.М. Толковый словарь по информатике. – М.: Финансы и статистика, 1991.

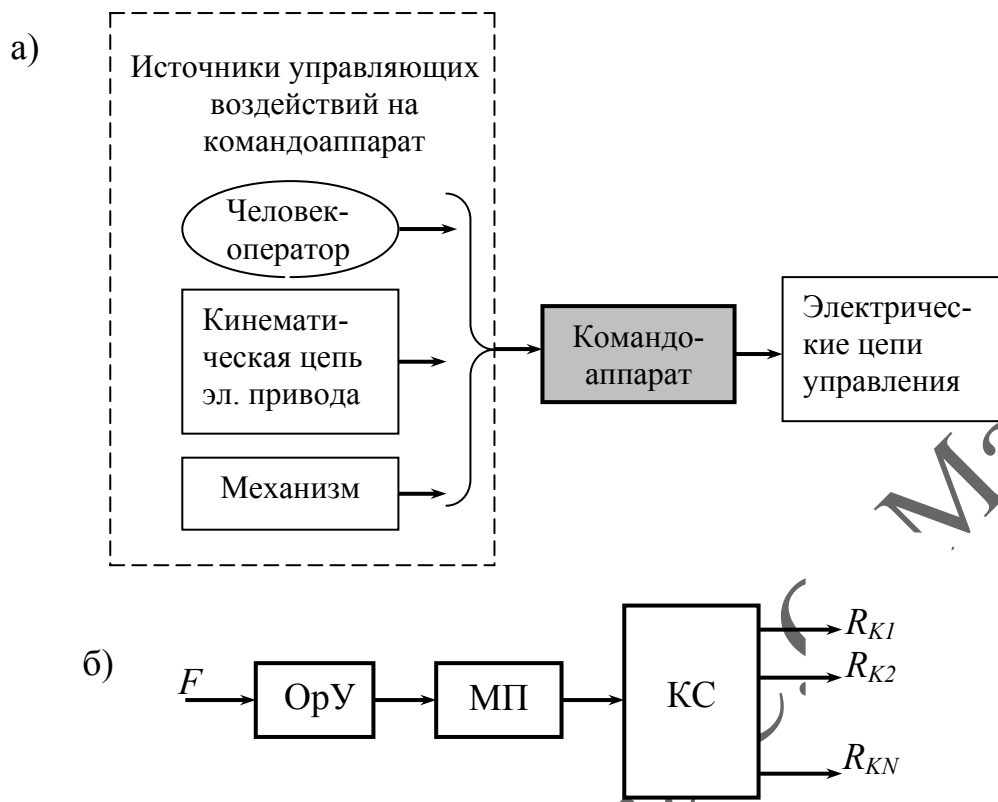


Рис. 6.1. Обобщенная схема взаимодействия командоаппарата с элементами человеко-машинной системы (а) и структурная схема командоаппарата (б)

В состав командоаппарата (рис. 6.1б) входят: контактная система (КС) с коммутирующими контактами, орган управления (OpУ) и механическая передача (МП). Составные части (КС, OpУ и МП) у разных командоаппаратов отличаются по конструкции. Особенности и характеристики этих частей рассмотрены в [1] (разделы 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.

OpУ 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 комадоконтроллера и более). Этим позициям могут быть приписаны какие-либо обозначения или номера, например, «Ручное

управление», «Автоматическое управление»; «Вперед», «Назад»; «ВКЛ.», «ВЫКЛ.» и т.п. Исходной позиции, например, «ВЫКЛ.» (выключено) часто присваивается номер 0, другой позиции «ВКЛ.» (включено) присваивается 1" и т. п.

У *командоаппарата с самовозвратом* ОпУ после прекращения управляющего (мускульного) 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 мускульных усилий.

6.2. Кнопки управления и кнопочные посты

В системах управления электроприводов и других системах автоматике 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. 6.2а).

Каждая кнопка поста имеет в своей контактной системе один замыкающий контакт и один размыкающий контакт (рис. 6.2б).

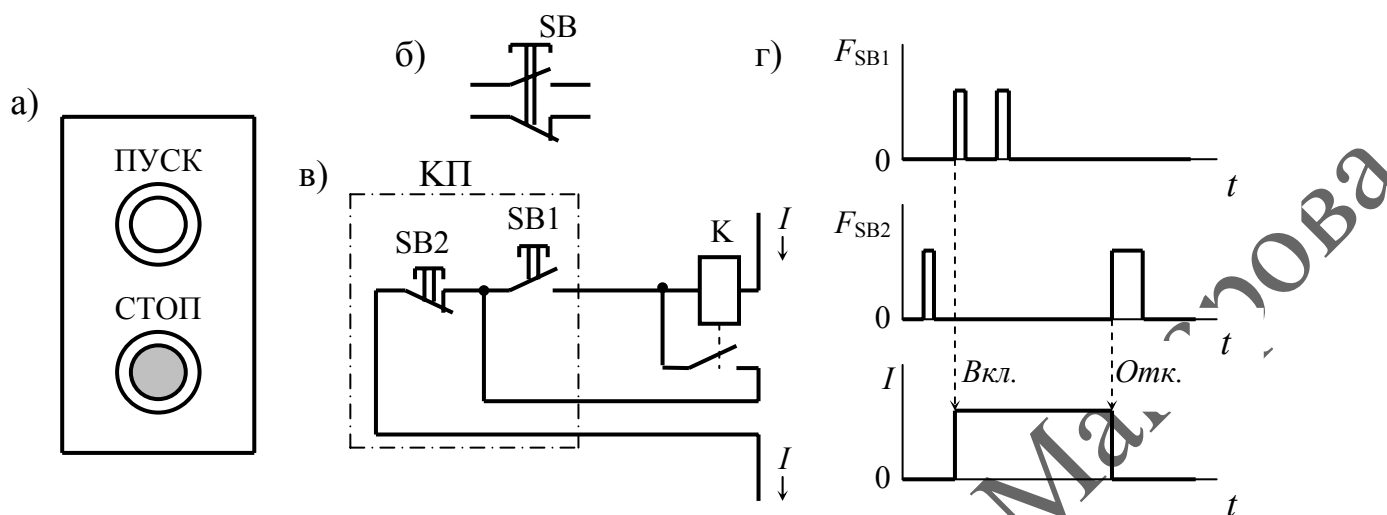


Рис. 6.2. Кнопочный пост управления и применение его в узле дистанционного управления

Электрическая схема узла дистанционного управления с кнопочным постом на рис. 6.2в 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 замыкающий контакт, у кнопки SB2 – размыкающий контакт. По цепи протекает ток I , если замкнут контакт SB2 и хотя бы один из контактов SB1 или К.

Из схемы рис. 6.2в следует, что дистанционная связь между кнопочным постом КП и аппаратом К осуществляется по трем проводникам.

Временные диаграммы на рис. 6.2г 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 пере-

менного 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.

В клавиатуре, используемой для ввода команд в цифровую систему, применяются слаботочные кнопки управления с самовозвратом. Схемы некоторых узлов формирования сигналов управления с помощью кнопок и логических элементов приведены на рис. 6.3.

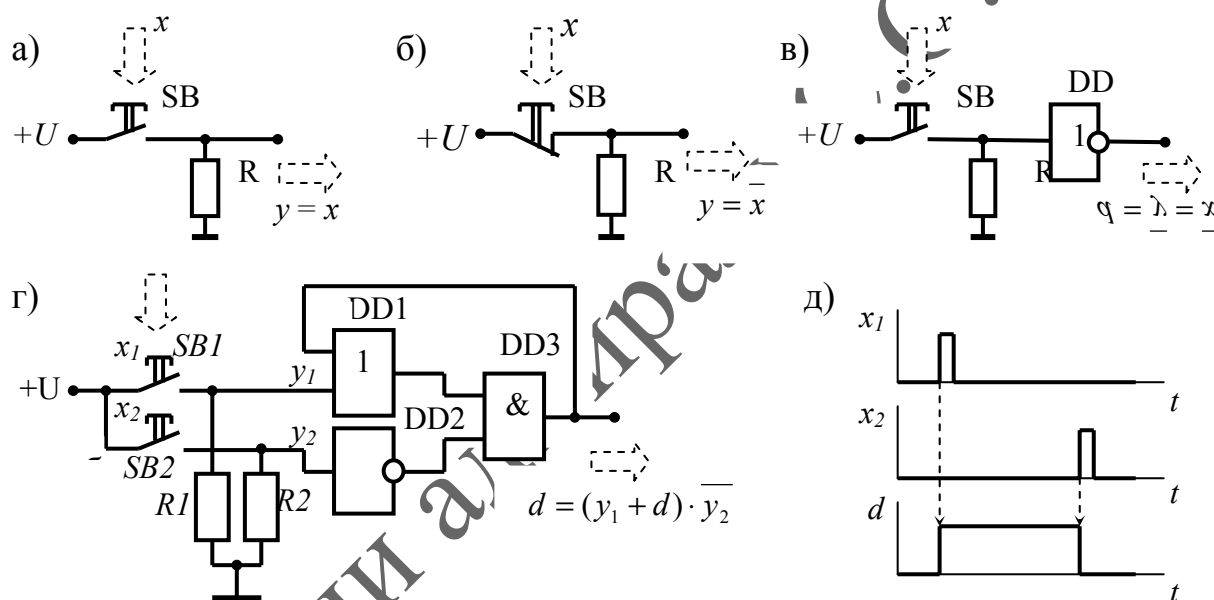


Рис. 6.3. Применение кнопок управления для формирования сигналов управления в микроэлектронных логических и цифровых системах

Логические переменные, указанные на схемах, определены следующими высказываниями:

$$x_{(1,2)} = \langle \text{к кнопке } SB(1,2) \text{ приложено усилие } F_{SB(1,2)} \rangle,$$

$$y_{(1,2)} = \langle \text{на резисторе } R(1,2) \text{ падает напряжение } U \rangle.$$

$$d = \langle \text{на выходе узла действует напряжение } U \rangle.$$

Черта над буквой означает инверсию логической переменной.

Сравнение рис. 6.3б и рис. 6.3в показывает возможность замены кнопки с размыкающим контактом на кнопку с замыкающим контактом при сохранении логической функции узла.

На рис. 6.3г приведена схема узла с памятью, функционально подобного узлу дистанционного управления, показанному на рис. 6.2в. 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

$$d = (x_1 + d) \cdot \overline{x_2},$$

где знаки «+» и «·» означают соответственно выполнение операций логического сложения (ИЛИ) и логического умножения (И). Действие логического узла характеризуют временные диаграммы на рис. 6.3д (сравните с диаграммами на рис. 6.2г).

6.3. Универсальные переключатели, пакетные ключи, командоконтроллеры

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* (OpУ) в виде рукоятки (пример на рис. 6.4а) или в ином исполнении. Орган управления преобразует мускульное усилие человека в момент силы, который воздей-

ствуется через механические передачи (МП) на коммутирующие контакты контактной системы (КС) аппарата (рис. 6.1б, см. также [1] п. 3).

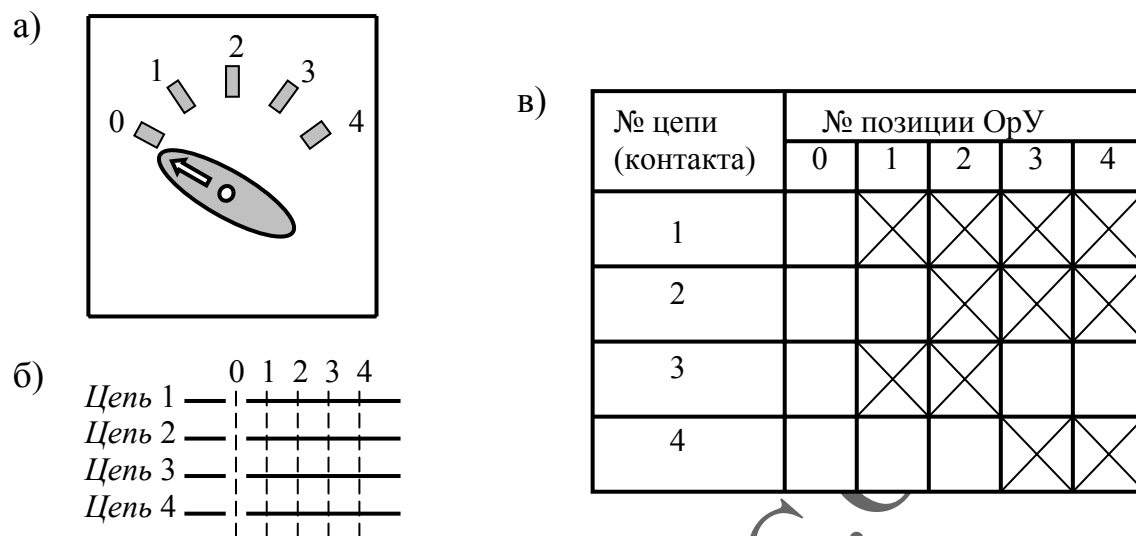


Рис. 6.4. Панель с органом управления (а) и примеры электрической схемы (б) и таблицы замыканий (в) командоаппарата

На рис. 6.4а 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. 6.4б, или в таблице замыканий, как на рис. 6.4в (количество контактов в этом примере $M=4$). Точками на пунктирных линиях схемы (рис. 6.4б) 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. 6.4в показана таблица замыканий для аппарата, представленного на рис. 6.4б 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.

Универсальные пакетные ключи управления 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.

Командоконтроллеры – командоаппараты с ручным (могут быть с ножным) или сервомоторным приводом¹⁷, подвижные контакты которого последовательно замыкаются или размыкаются при повороте его приводного вала [3]. 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

¹⁷ 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 словарь по автоматике, информатике и вычислительной технике/ В. В. Зотов, Ю. Н. Маслов, А. Е. Пядочкин и др. – М.: Высш. шк., 1989.

последовательности действий отдельных механизмов [4]. Предназначены для работы в цепях до 440 В постоянного тока и 500 В переменного тока.

Структура командоконтроллера может быть представлена схемой, показанной на рис. 6.1б. 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. 6.4б, рис 6.4в.

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. [1] п. 3.2). 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. [1] п. 3.2, рис. 3.2), освобождает толкатель от защелки. Под действием возвратной пружины толкатель возвращается в исходное положение, контакт замыкается.

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.

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.

Электронным аналогом командоаппарата является *шифратор* – узел цифровой системы, который формирует на выходе двоичный код при появлении сигнала на одном из входов. 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 замыканий нужно использовать таблицу истинности. Так, в приведенном на рис. 6.4б 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. 6.5а, логическая схема, реализованная на элементах ИЛИ – на рис. 6.5б.

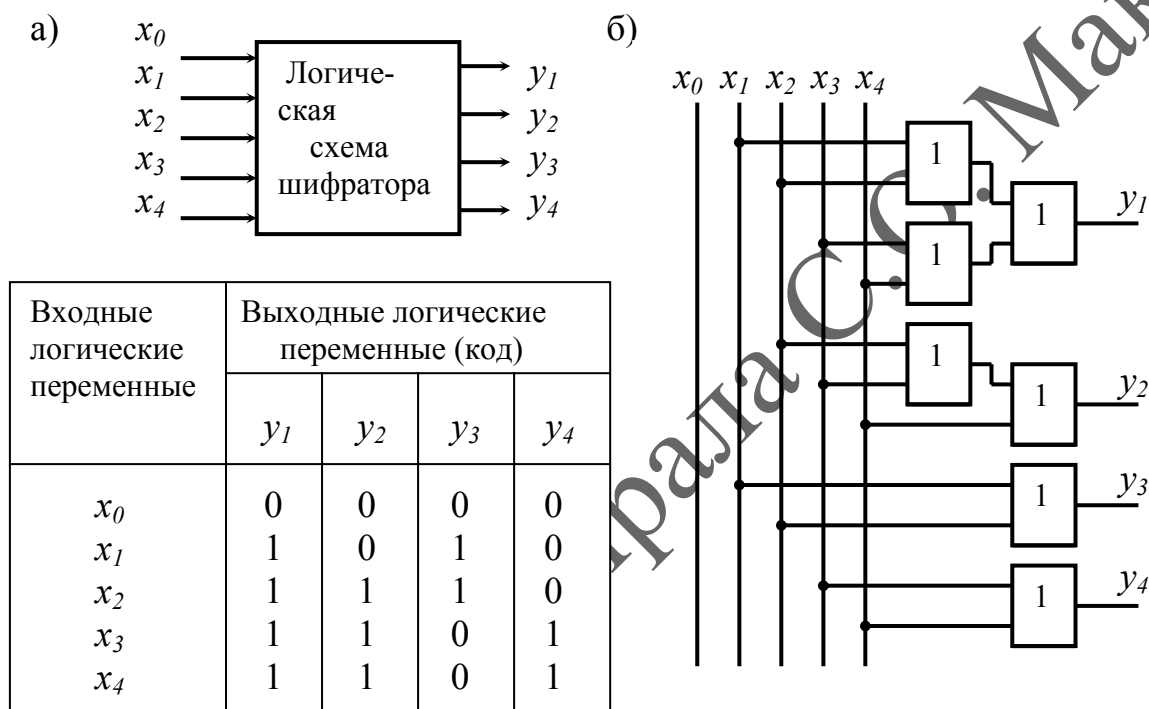


Рис. 6.5. Представление командоаппарата логической схемой шифратора

6.4. Путьевые и конечные выключатели

Путьевой выключатель представляет собой командоаппарат, кинематически связанный с рабочей машиной, предназначенный для срабатывания на определенных расстояниях ее пути [3]. *Конечный выключатель* – это путьевой 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.

Путевой и конечный выключатели могут быть представлены структурной схемой, как на рис. 6.1б. 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. 6.6 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).

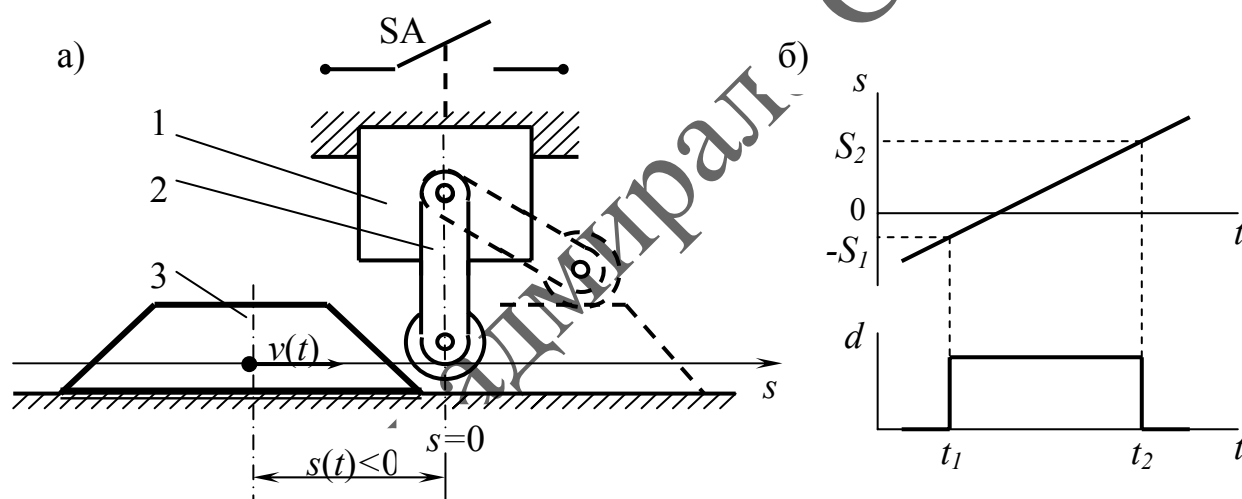


Рис. 6.6. Иллюстрация принципа работы путевого выключателя с помощью изобразительной модели (а) и временных диаграмм (б)

Путевой (конечный) выключатель практически не влияет на скорость $v(t)$ движения объекта 3 при механическом контакте объекта с роликом приводного рычага. Воздействие на орган управления 2 выключателя зависит от координаты $s(t)$ положения объекта, которая изменяется со скоростью $v(t) = ds(t)/dt$. Скорость перемещения органа управления (ОРУ на рис. 6.1б) выключателя полностью определяется скоростью $v(t)$ объекта и координатой положения $s(t)$. Для ускоренного размыкания и замыкания контактов при малых $v(t)$ в путевых и конечных выключателях используются ме-

ханические передачи с защелками и механизмами мгновенного переключения (см. [1] п. 3.2, п. 3.3).

На рис. 6.6б 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. 6.6а). Возвращение приводного рычага в исходное положение и размыкание контакта происходит под действием возвратной пружины при $s = S_2$ ($S_1 > 0$), когда пропадает механический контакт ролика с объектом при перемещении объекта со скоростью $v(t) > 0$.

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.. Переключение контактов в рычажных выключателях осуществляется воздействием объекта на рычаг (рис. 6.6а), который передает движение подвижному контактному узлу, в кнопочных - 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.). Они выполняются на напряжение до 380 В переменного тока и до 220 В постоянного тока. Допустимый длительный ток коммутирующих контактов 10 А (до 20 А у некоторых выключателей серии УБ).

Путевые и конечные выключатели являются нелинейными элементами автоматизированных электроприводов. На рис. 6.7 показаны характе-

ристики управления и схемы контактных систем путевых и конечных выключателей рычажного типа ВК-311 и кнопочного типа ВК-111.

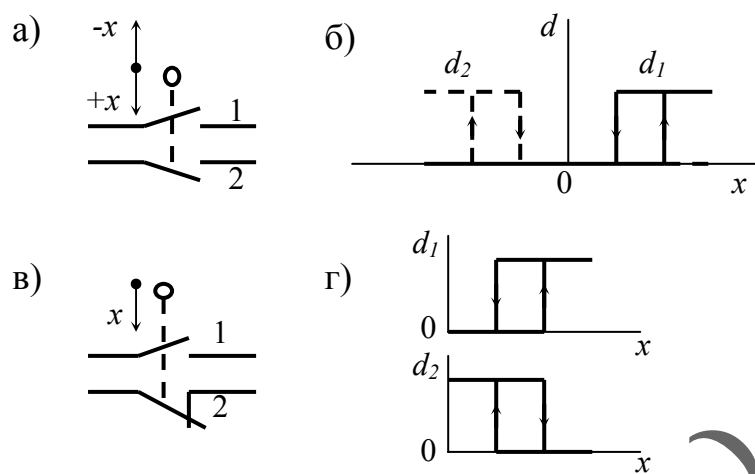


Рис. 6.7. Контактные системы выключателей ВК-311, ВК-111 (а, в) и характеристики управления выключателей (б, г)

Для рычажного выключателя переменная x (рис. 6.7а) характеризует угол отклонения рычага от нейтрального (вертикального на рис. 6.6а) положения со знаком «+» против направления движения часовой стрелки. Две выходные 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. 6.7б).

Для кнопочного выключателя переменная x (рис. 6.7в) 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. 6.7г.

На рис. 6.8а на примере выключателя ВК-311 отображено действие путевого выключателя в зависимости от координаты перемещения s контролируемого объекта (см. рис. 6.6).

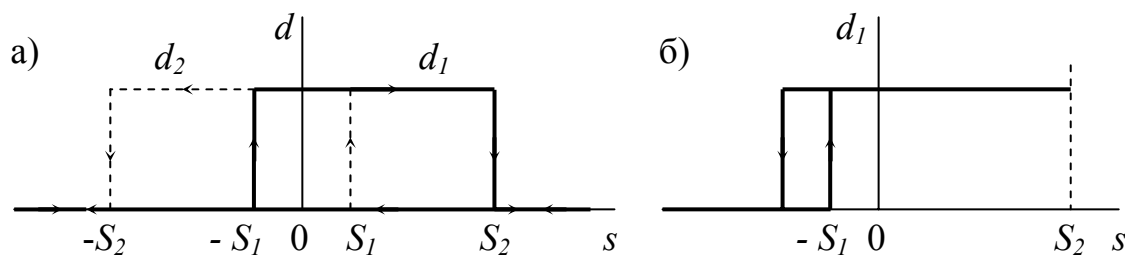


Рис. 6.8. Зависимость выходных сигналов путевого выключателя (а) и конечного выключателя (б) от координаты s перемещения объекта

Сплошными линиями показано как изменяется положение контакта 1 (см. рис. 6.7а, рис. 6.7б), 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 ($d_2=0$).

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. 6.8а). 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. 6.8б.

Для электроприводов применяют также путевые и конечные выключатели, действующие без механической связи с контролируемым объектом. Например, выключатели на герконах реагируют на магнитное поле, созданное магнитным элементом, установленным на перемещающемся

объекте. В некоторых выключателях используются индуктивные, индукционные, оптические или иные датчики положения (см. п.). 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 [9]. 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.

6.5. Контроллеры

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. 6.9а).

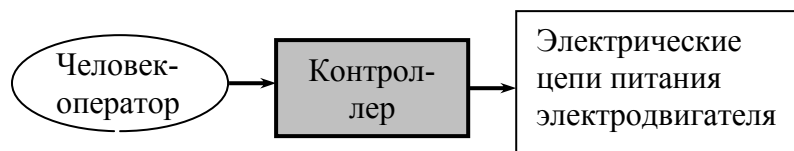
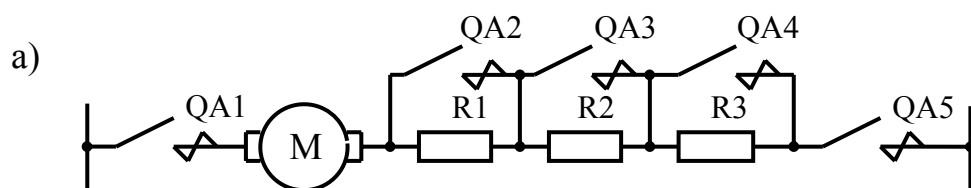


Рис. 6.9. Схема взаимодействия контроллера с элементами человеко-машинной системы

Контроллер может быть представлен структурной схемой, как на рис. 6.1б. 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. 6.3), 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 вертикальной 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.

Вариант применения контроллера QA для пуска и регулирования частоты вращения двигателя М показан на рис. 6.10а. Состояние контактов QA1, ..., QA5 контроллера для каждой позиции ОрУ определено таблицей замыканий на рис. 6.10б.



б)

Контакт контроллера	№ позиции ОРУ				
	0	1	2	3	4
QA1		X	X	X	X
QA2			X	X	X
QA3				X	X
QA4					X
QA5		X	X	X	X

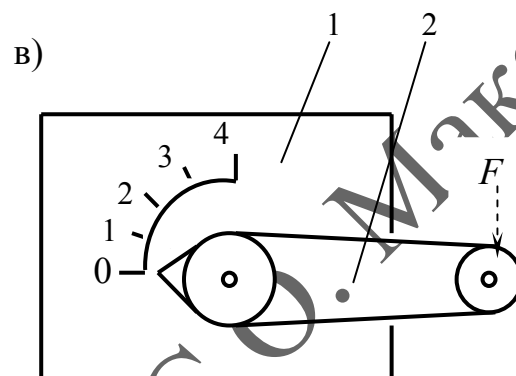


Рис. 6.10. Фрагмент электрической схемы с контактами контроллера (а), таблица замыканий (б), изобразительная модель верхней части корпуса 1 контроллера с рукояткой управления 2 (в)

В соответствии с таблицей замыканий (рис. 6.10б) двигатель отключен, если рукоятка управления (рис. 6.10в) находится в положении «0». Включение двигателя в работу и изменение его установившейся скорости вращения осуществляется при изменении 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 для продолжительной работы двигателя с требуемой скоростью вращения.

Резисторы R1, R2, R3 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.

6.6. Реостаты

«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;

регулируемые – 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 рези-

сторов 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).

На рис. 6.11 представлена электрическая схема пускового реостата типа РЗП. Переключатель ступеней пуска имеет девять положений от 0 до 8. 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, обеспечит питание от сети обмотки возбуждения LM двигателя, а также питание якорной обмотки двигателя М через резистор R. Перемещение рукоятки до позиции 8 приведет к ступенчатому уменьшению сопротивления реостата. В позиции 8 рукоятки сопротивление R будет полностью выведено и процесс пуска двигателя закончится.

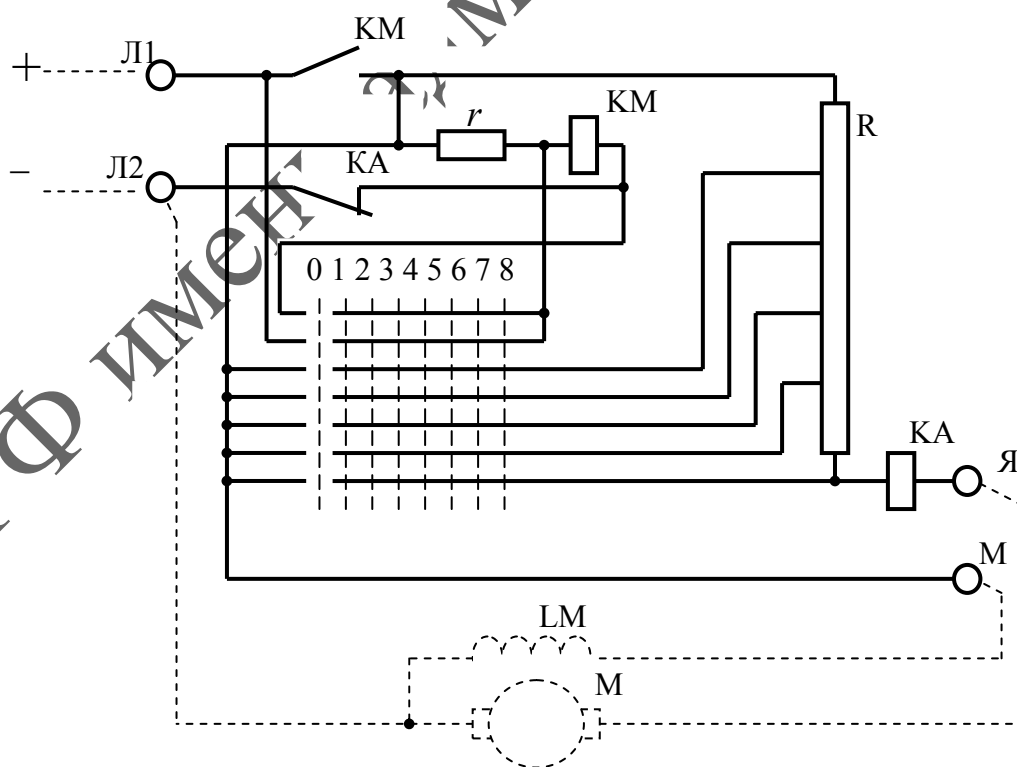


Рис. 6.11. Электрическая схема пускового реостата типа РЗП

Если в процессе работы двигатель окажется перегруженным, то срабатывает 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 ЛМ оказывается замкнутой на резисторы реостата, и энергия магнитного поля, запасенная в обмотке возбуждения, расходуется на создание тока и нагрев резисторов.

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.

6.7. Рубильники и ререключатели

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. 6.12.

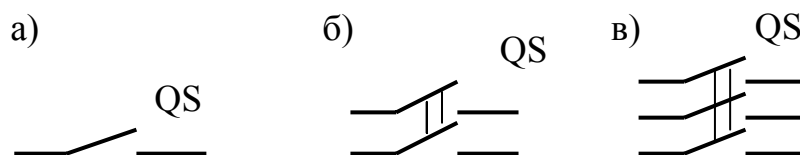


Рис. 6.12. Обозначение рубильника на электрической схеме: однополюсного (а), двухполюсного (б), трехполюсного (в)

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.

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 размыкание контактов, независимо от скорости перемещения рукоятки рубильника. В некоторых случаях рубильник комплектуют дугогасительной 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* [3]. На рис. 5.13 приведен пример обозначения на электрической схеме двухполюсного переключателя.



Рис. 6.13. Переключатель двухполюсный 3-позиционный с нейтральным положением (а), с самовозвратом в нейтральное положение (б)

Рубильники и рубящие переключатели выполняют открытого и водо-защищенного 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.

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. [1] п. 3.3). 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. 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.

ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова

7. Дистанционно управляемые тормозные устройства и муфты

7.1. Общие сведения

В составе кинематической цепи механической части электроприводов иногда предусматриваются электромеханические устройства, с помощью которых осуществляется управление передачей энергии от двигателя до производственного механизма или в обратном направлении. К таким устройствам относятся дистанционно управляемые тормозы и муфты, способные управлять вращающим моментом на валу механической передачи. Как правило, в них используются электромагниты для создания необходимых управляющих усилий и обеспечения возможности дистанционного управления передачей энергии по силовой кинематической цепи КЦС (см. п. 1.2, рис. 1.4).

Замедление вращения вала и фиксация его в неподвижном состоянии осуществляется с помощью тормозного устройства. Объединенные в одну конструкцию механический тормоз и электромагнит образуют электроаппарат, который называют электромагнитным тормозом. С помощью электромагнита тормоз создает тормозной момент M_T на валу механической передачи, влияющий на угловую скорость вращения ω вала в соответствии с дифференциальным уравнением

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_D - M_T \pm M_H, \quad (7.1)$$

где M_D – движущий момент, создаваемый двигателем электропривода; M_H – момент нагрузки, создаваемый производственным механизмом; J – суммарный момент инерции частей кинематической цепи. Знак «+» в уравнении (7.1) соответствует случаю, когда направление действия момента M_H совпадает с направлением момента M_D . Для фиксации положения вала в состоянии покоя ($\omega=0$, $M_D=0$) момент M_T должен иметь величину, достаточную для того, чтобы обеспечить выполнение равенства

$$M_T = M_H. \quad (7.2)$$

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. 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

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_D - M_M, \quad (7.3)$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_M - M_H, \quad (7.4)$$

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

Продолжительная работа фрикционной муфты в режиме управления скоростью ω_2 путем изменения момента M_M приводит к ее повышенному нагреву из-за трения фрикционных 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, так как $J_2 < J_1 + J_2$.

Асинхронные муфты скольжения не имеют фрикционных частей и поэтому не нагреваются так, как фрикционные муфты. Асинхронные муфты используют при длительных режимах управления скоростью вращения ω_2 ведомого вала. При этом ведущий вал вращается, как правило, с постоянной скоростью ω_1 за счет того, что двигатель электропривода работает в

режиме источника скорости (может использоваться неуправляемый синхронный двигатель).

7.2. Электромагнитные тормозы

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 переменного тока (типа ТКТ). Катушка электромагнита обычно подключается под полное напряжение сети.

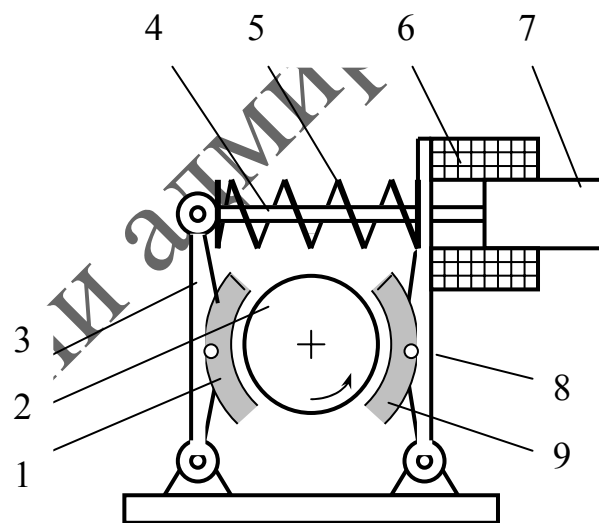


Рис. 7.1. Изобразительная модель колодочного электромагнитного тормоза

Изобразительная модель колодочного электромагнитного тормоза показана на рис. 7.1.

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.

Если на катушку 6 электромагнита подать питание, то под действием возникшей электромагнитной силы тяги якорь 7 втянется в катушку, 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. Освобождения вала колодками происходит за время, равное времени трогания τ_{mp1} якоря электромагнита (см. [1] п. 4.7). На интервале времени $\tau_{\delta e1}$ движения якоря тормозной момент уже равен нулю ($M_T=0$). Тормоз включают одновременно с включением двигателя электропривода.

Выключают тормоз обычно одновременно с отключением двигателя электропривода. На интервалах времени τ_{mp2} трогания и времени $\tau_{\delta e2}$ 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

$$J \frac{d\omega}{dt} = -(M_T + M_H), \quad (7.5)$$

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 $\tau_{32} = \tau_{mp2} + \tau_{\delta e2}$ определяет время запаздывания при отключении тормоза, и считают M_T , M_H постоянными ве-

личинами. Тогда частота вращения вала при торможении будет уменьшаться по линейному закону во времени до тех пор, пока вал не остановится.

7.3. Электромагнитные фрикционные 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. Один диск расположен на ведущей полумуфте (ведущий вал), другой диск – на ведомой полумуфте (ведомый вал). В переходных режимах $\omega_2 \neq \omega_1$ (рис. 7.2).

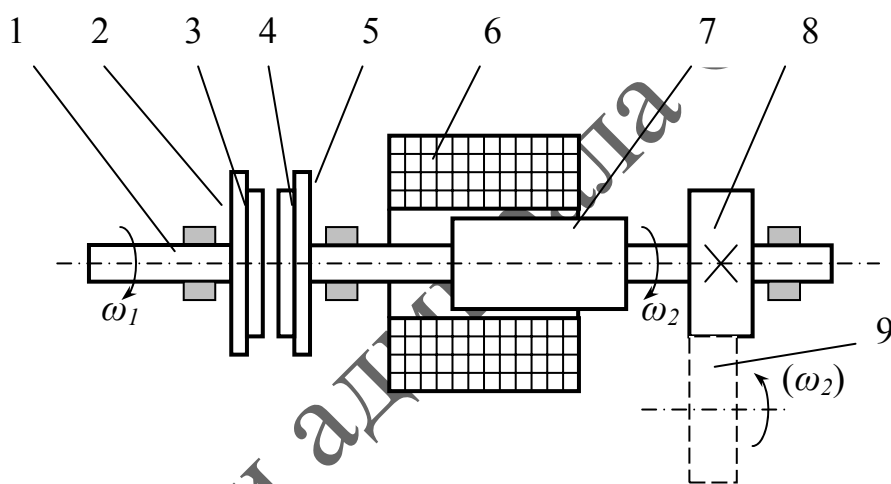


Рис. 7.2. Изобразительная модель электромагнитной фрикционной муфты

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.

При включении муфты различают три этапа.

Первый этап – от момента приложения напряжения к катушке до момента соприкосновения фрикционных колец 3 и 4. Продолжительность первого этапа составляет суммарное время трогания и движения ($\tau_{мп1} + \tau_{дв1}$).

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). Движение ведущего вала и ведомого вала в переходном режиме $\omega_2 \rightarrow \omega_1$ описывается дифференциальными уравнениями (7.3), (7.4). Скорость скольжения ведущего фрикционного кольца относительно ведомого кольца $\omega_c = \omega_1 - \omega_2$ определяется по решению системы дифференциальных уравнений (7.3), (7.4).

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.

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

Мощность, отдаваемая двигателем при включении муфты, $P_D = M_D \omega_1$. Мощность, отдаваемая в нагрузку, $P_H = M_H \omega_2$. Потери в муфте за счет скольжения $P_{\Pi} = P_D - P_H = M_{\Pi} = M_D \omega_1 - M_H \omega_2$. 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 $M_D = M_H$, $\omega_2 = \omega_1$ и $P_{\Pi} = 0$.

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. В переходном режиме скорость вращения ω_2 определяется решением дифференциального уравнения (7.4) при $M_M = 0$.

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.

Промышленность выпускает электромагнитные фрикционные муфты серий ЭТМ, Э11М десяти габаритов в нескольких конструктивных модификациях с контактным токоподводом и с бесконтактным токоподводом. Муфты рассчитаны на включение в сеть постоянного тока напряже-

нием 24 В. Номинальный вращающий момент в зависимости от габарита и модификации муфты составляет от 16 до 1000 Нм.

7.4. Электромагнитные порошковые муфты

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. 7.3 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.

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 создают 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.

7.5. Электромагнитные асинхронные муфты

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

Асинхронная муфта состоит (рис. 7.3а) 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.

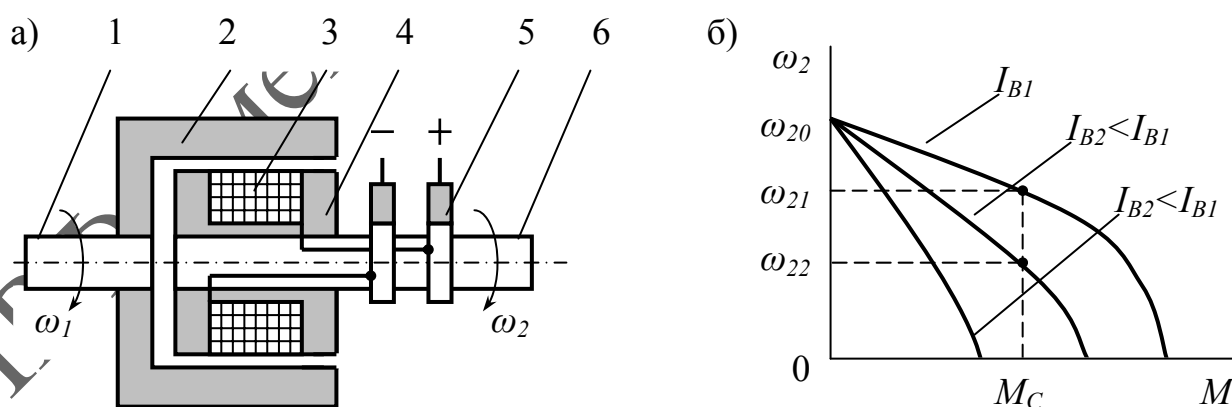


Рис. 7.3. Изобразительная модель асинхронной муфты (а) и ее механические характеристики (б)

Якорь 2 вращается в магнитном поле, созданном обмоткой катушки 3 индуктора 4. В якорь индуцируются вихревые токи. Они взаимодейству-

ют с полем индуктора в результате чего создается вращающий момент, направленный в сторону вращения якоря. Под действием этого момента индуктор приходит во вращение.

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.

Свойства электромагнитной асинхронной муфты определяются ее механической характеристикой (рис. 7.3б). 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.

8. Измерительные преобразователи и электрические датчики

8.1. 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*¹⁸ – 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.

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 $R = \varphi[f(x)] = \psi(x)$.

¹⁸ Измерительные преобразователи имеют разные определения в разных научных дисциплинах. В общем смысле измерительный преобразователь является устройством, которое преобразует изменение одной величины в изменение другой (см. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1991).

Мы будем использовать терминологию и понятия 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* – 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.

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.

*Датчик*¹⁹ представляет собой совокупность конструктивно и функционально объединенных измерительных преобразователей, формирующих на выходе удобный для использования сигнал. Датчик, сигналом на выходе которого является электрическое напряжение или ток, относится к *электрическим датчикам*. Именно такие электрические датчики рассматриваются в этом разделе.

Представим электрический датчик структурной схемой (рис. 8.1).

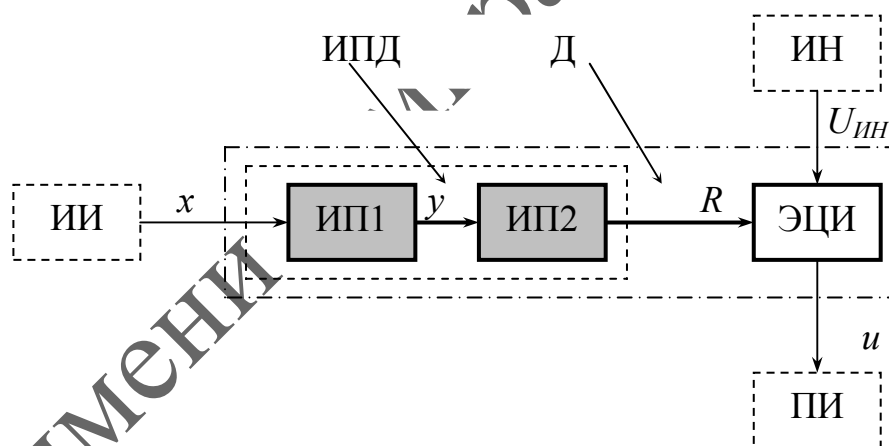


Рис. 8.1. Структурная схема электрического датчика

¹⁹ 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).

Датчик – измерительный (входной) преобразователь, преобразующий информацию об измеряемой физической величине в сигнал, удобный для использования и обработки в системах автоматического контроля и управления (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).

На схеме рис. 8.1 выделены: первичный измерительный преобразователь (ИП1) и преобразователь (ИП2), выходная переменная которой 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*²⁰ выходным сигналом ИПД (например, функцией времени $R(t)$) напряжения $U_{ин}$ питания ЭЦИ от стабильного источника электрической энергии (обычно источника напряжения ИН). ИПД в схеме на рис. 8.1 выполняет функцию *модулятора* процесса передачи энергии от ИН к ПИ.

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.

²⁰ *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. Пялочкин и др. – М.: Высш. шк., 1989).

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. 8.3) преобразуют угол поворота рукоятки управления в пропорциональное этому углу электрическое напряжение.

На рис. 8.2 приведены временные диаграммы, отображающие преобразование входного сигнала x в выходной сигнал u датчиками разных типов.

С помощью электрического датчика с *аналоговым* выходом (рис. 8.1а) входная физическая величина x в каждый текущий момент времени t преобразуется в выходную электрическую величину u (например, напряжение).

К характеристике управления обычно предъявляется требование, чтобы она представляла собой *линейную* функцию – линейную зависимость выходной величины от входной величины $u=kx$, где k – постоянная величина (*коэффициент преобразования*).

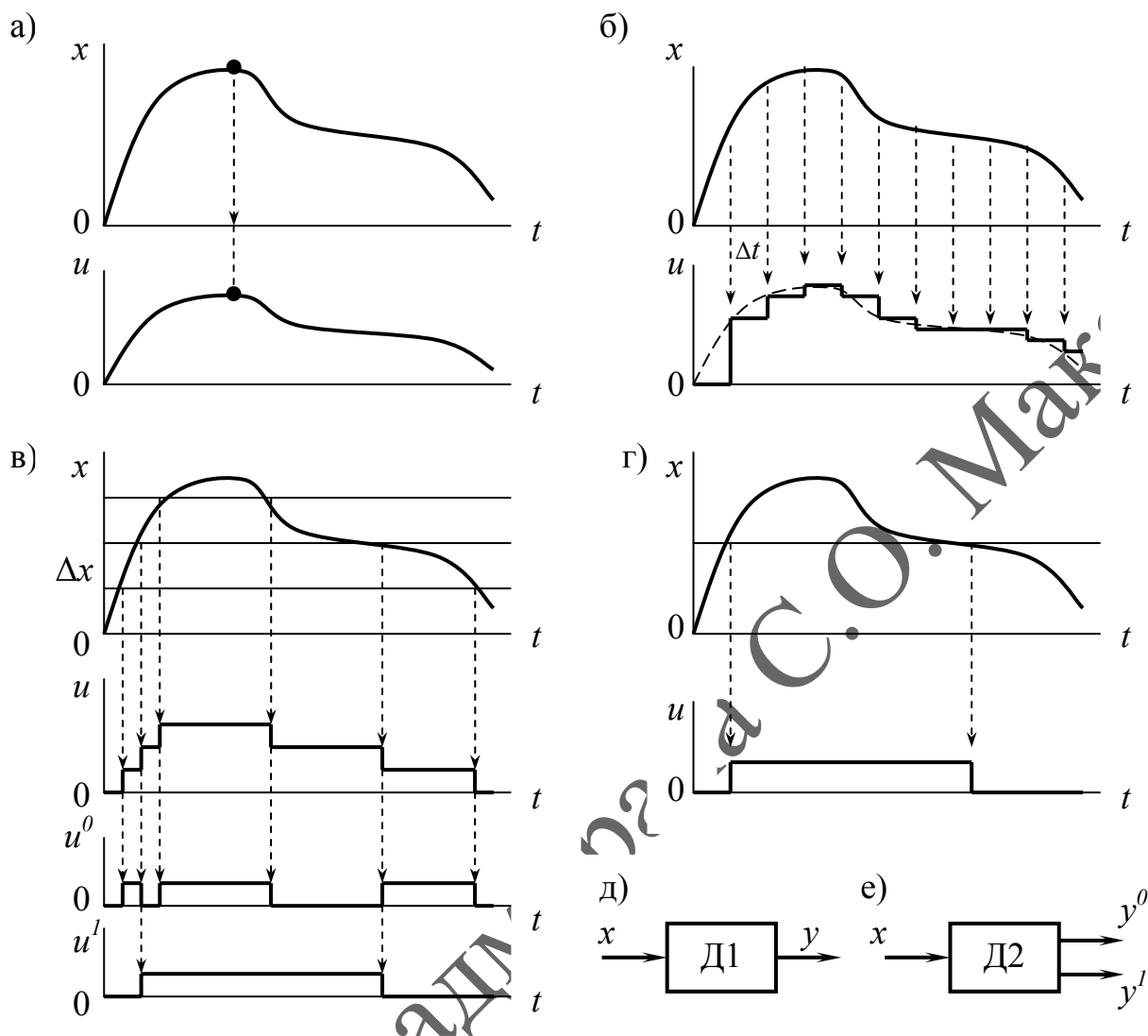


Рис. 8.2. Временные диаграммы входного (x) и выходного (u) сигналов датчиков разного типа

Электрические датчики с *дискретным* выходом осуществляют квантование входного сигнала x по времени (рис. 8.1б) или/и квантование по уровню (рис. 8.1в). Как правило, *шаги квантования* Δt по времени и Δx по уровню фиксированы, т.е. имеют определенное неизменное для датчика значение. Выходной 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. 8.1в 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*, представляют как датчик с *цифровым* выходом.

Элемент на рис. 8.1д отображает датчик с аналоговым выходом, а также с выходом, полученным в результате квантования входного сигнала. Элемент на рис. 8.1е – 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. 8.1г) является цифровой выход (рис. 8.1д), содержащий одноразрядный код значений x типа «больше» или «меньше» заданной величины. Датчик с таким выходом называют *позиционным* датчиком. К позиционным датчикам можно отнести разнообразные электро-механические и электронные реле, у которых коэффициент возврата равен единице.

8.2. Резистивные преобразователи и датчики положения

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

На каркасе цилиндрической или кольцевой формы (рис. 8.3а и рис. 8.3б) уложена обмотка из витки проволоки, по которым скользит подвижная деталь электрического контакта – щетка движка. Вместо витков про-

волоки может использоваться пленочное покрытие из проводникового или полупроводникового материала.

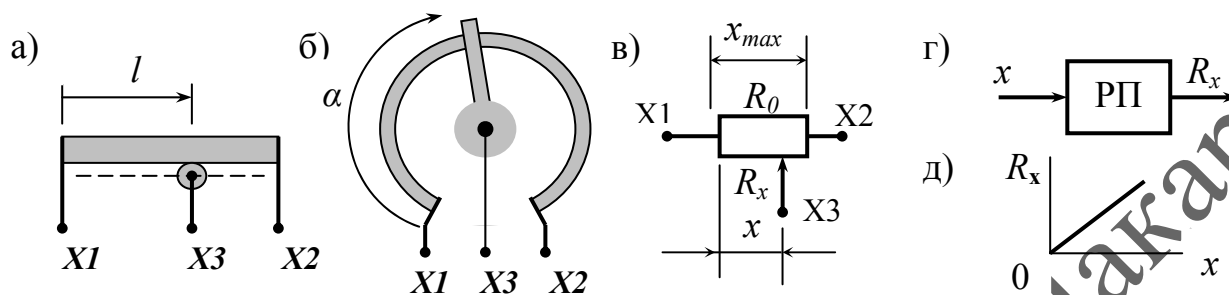


Рис. 8.3. Резистивные преобразователи линейного и углового перемещения

Линейное перемещение l движка (рис. 8.3а), или угловое перемещение – угол поворота α (рис. 8.3б), характеризуемые координатой x , вызывают изменение сопротивления R_x между клеммами X1 и X3 (рис. 8.3в). 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 (ПП на рис. 8.3г) линейно зависит от перемещения движка x (рис. 8.3б).

Резистивный преобразователь используют в *потенциметрическом датчике* (ПД на рис. 8.4а), выходной переменной которого является электрическое напряжение U_x .

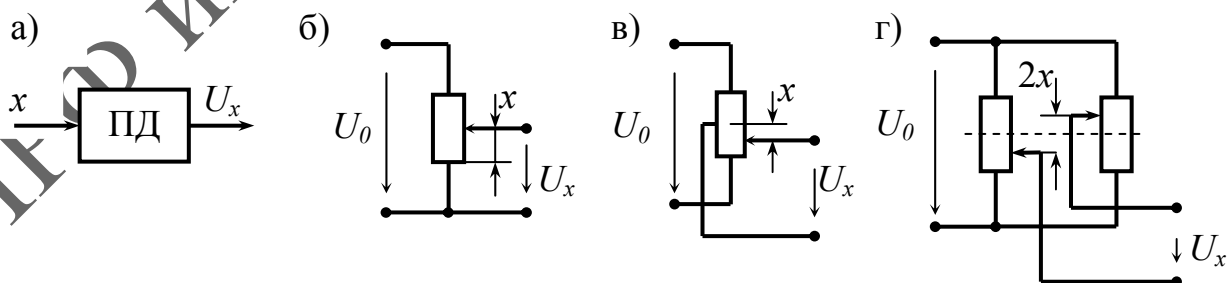


Рис. 8.4. Потенциметрические датчики с выходным напряжением U_x , пропорциональным перемещению x

Схема простейшего датчика представлена на рис. 8.4б. 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. 8.4в, реагирует на знак входного сигнала. При постоянном напряжении питания U_0 напряжение U_x на выходе датчика изменяет полярность при переходе подвижной детали контакта (ползунка) через среднее положение.

В схеме на рис. 8.4г 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 *однотактного* датчика на рис. 8(3в).

Характеристика управления потенциометрического 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.

Путем соответствующего профилирования каркаса резистивного преобразователя можно получить различные по виду нелинейные зависимости U_x от x .

Минимальная погрешность проволочных датчиков 0,05%; их недостаток – ступенчатость характеристики управления из-за дискретного изменения сопротивления R_x при перемещении щетки движка. Класс точности пленочных потенциометров достигает 0,01%. Для обеспечения стабильности работы датчики должны иметь сопротивление R_0 , превышающее 1000 Ом.

В табл. 8.1 приведены технические характеристики некоторых потенциометрических датчиков угла поворота.

Таблица 8.1.
Технические характеристики потенциометрических датчиков угла поворота

Характеристики	Тип потенциометрического датчика				
	ПД	ПП	ПК	П-1	П-63
Рабочий диапазон, град	320	320	>360	±27	±10
Чувствительность, В/град	0,08	0,08	0,1	2,5	1,5
Напряжение питания U_0 , В	30	30	-	30	30
Ступенчатость, виток/град	1-3	1-3	2,6	-	6
Сопротивление, кОм	1	4	1,6	-	-

8.3. Индуктивные преобразователи и датчики положения

Индуктивный измерительный преобразователь представляет собой дроссель без насыщения (см. [1] п. 5.1), который, в зависимости от конструкции, преобразует линейное или угловое перемещение x якоря в изменение индуктивности L своей обмотки. Когда к обмотке приложено переменное напряжение $u(t)=U_m \sin \omega t$, она создает реактивное сопротивление $X_L = \omega L$ в электрической цепи.

Для простейшего датчика на основе дросселя без насыщения выходной переменной является ток I в обмотке по величине обратно пропорциональный значению индуктивности L , так как $I=U/X_L=U/\omega L$, если не учитывать малое по величине активное сопротивление обмотки дросселя (U – действующее значение напряжения $u(t)$).

Как известно (см. [1] п. 5.1),

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

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; S_p – площадь воздушного зазора между сердечником и якорем дросселя; ρ – длина воздушного зазора, w – количество витков обмотки.

Чтобы получить линейную зависимость тока I от перемещения якоря, конструкцию датчика создают такой, чтобы при перемещении якоря изменялось значение ρ , а величина S_p оставалась неизменной. Конструкция такого *индуктивного датчика* подобна конструкции электромагнитного механизма (см. [1] п. 4.1, п. 4.2, п. 4.3). Но это электромагнитный механизм *обратного действия*, так как входным сигналом является перемещение ρ якоря, выходным – изменение силы тока I , протекающего по виткам катушки.

Существенным недостатком является возникновение большой по величине электромагнитной силы тяги, действующей на якорь. Этот недостаток практически полностью устраняется в дифференциальном индуктивном датчике (ДИД). Функциональная схема, отражающая принцип построения ДИД, показана на рис. 8.6а.

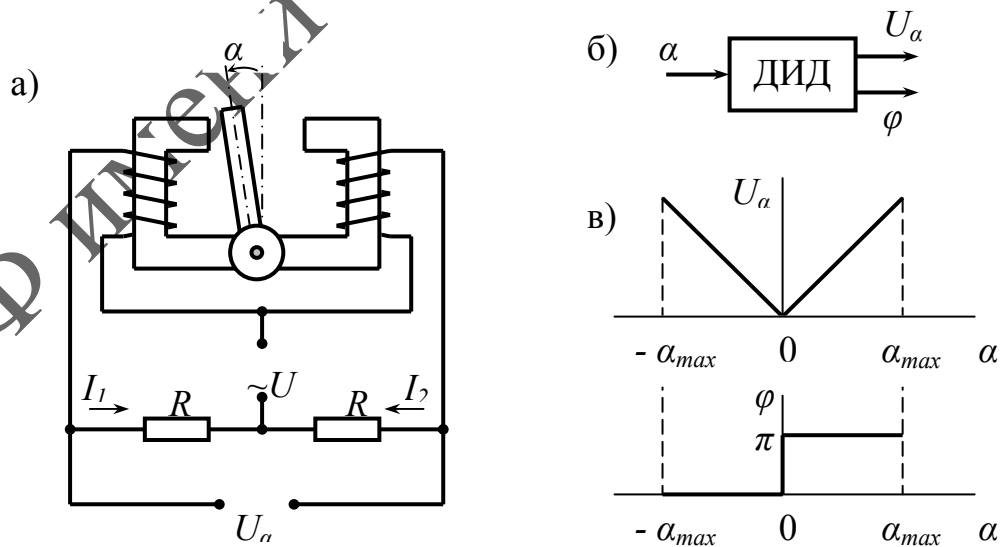


Рис. 8.5. Функциональная схема дифференциального индуктивного датчика (а), его вход и выходы (б), характеристики управления (в)

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 (см. [1] п. 4.5). 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 (обозначим через S_I) называют *чувствительностью по току*. Выходное напряжение

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

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

Действующее значение U_α напряжения на выходе датчика не зависит от знака входной величины α . Поэтому $U_\alpha = S_U |\alpha|$. От знака входной величины 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. 8.5б). Характеристики управления датчика показаны на рис. 8.5в.

Увеличение диапазона изменения контролируемого датчиком угла почти до 360° позволяют получить индуктивные датчики иной конструкции, которую можно представить по рис. 8.5а, 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_a на выходе датчика. С целью повышения чувствительности датчика индуктивный преобразователь может быть включен в колебательный контур с частотой 10...15 кГц [9].

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.

8.4. Емкостные преобразователи перемещения

Электрическая емкость конденсатора

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

пропорциональна площади пластины q и обратно пропорциональна расстоянию l между пластинами ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды).

Конструктивное исполнение емкостных преобразователей перемещения такое, что входной сигнал приводит к изменению расстояния l между пластинами или к изменению взаимной площади пластин q .

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.

8.5. Сельсины

Сельсин (индукционный электромашинный датчик) – небольшая электрическая машина, в которой 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. 8.6а, рис. 8.6б изображены функциональные схемы сельсина, у которого трехфазная обмотка синхронизации 1 (А, В, С) размещена на статоре.

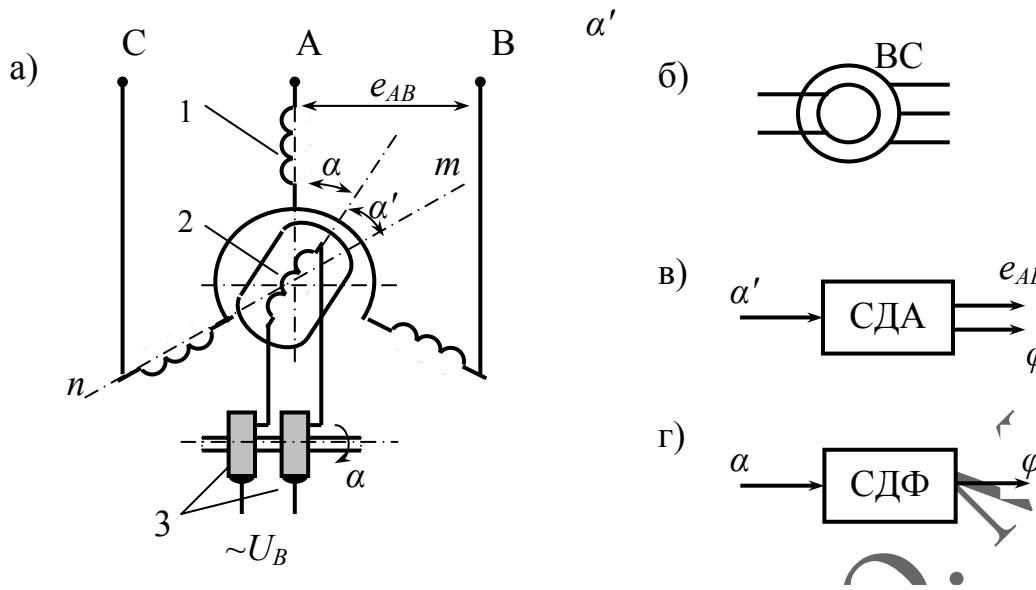


Рис. 8.6. Функциональная схема сельсина-датчика (а), его обозначение на электрической схеме (б), входы и выходы при работе в амплитудном (а) и фазовом (б) режимах

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:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= k_T U_{Bm} \cos \alpha \sin \omega t, \\ e_B &= k_T U_{Bm} \cos(\alpha - 2\pi/3) \sin \omega t, \\ e_C &= k_T U_{Bm} \cos(\alpha + 2\pi/3) \sin \omega t, \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

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

Линейная ЭДС:

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

Сельсин применяют в качестве измерительного преобразователя угла (поворота ротора) в двух режимах.

Амплитудный режим. При реализации амплитудного режима начало отсчета угла перемещают на $\pi/3$ по направлению к фазе В (линия $m-n$). 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 $\sin \alpha' \approx \alpha'$ и

$$E_{ABm} \approx k_C \alpha'. \quad (8.2)$$

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. 8.9в.

Из-за неточности изготовления магнитопровода и обмоток возникают статические погрешности, приводящие к отклонению амплитуды ЭДС от кусочно-линейной зависимости (8.2). Статические погрешности соизмеримы с полезным выходным сигналом при малых значениях α' . Кроме статических погрешностей при вращении ротора в выходном сигнале 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.

Режим фазовращателя. В режиме фазовращателя обмотка статора получает питание от источника трехфазного напряжения с неизменной амплитудой. Образуется круговое вращающееся магнитное поле, и в обмотке

ротора, ось которой сдвинута на угол α относительно начала отсчета, наводится ЭДС

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

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

$$\varphi = \alpha. \quad (8.3)$$

Вход и выход сельсина-датчика (СДФ), применяемого в режиме фазовращателя, показаны на рис. 8.9г.

8.6. Сельсинные системы

Системы, состоящие из двух сельсинов. Обычно сельсины применяются попарно, создав между двумя сельсинами электрические связи. Такие сельсины могут работать в качестве датчиков угла поворота или в качестве элементов дистанционной передачи. Датчиками являются сельсины, работающие в *трансформаторном* режиме. В дистанционных передачах (угла поворота) используются сельсины, работающие в *индикаторном* 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 (8.1). Поэтому по трехфазным обмоткам обоих сельсинов будут протекать переменные токи, возбуждая магнитные потоки.

Трансформаторный режим. 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 (см. рис. 8.10), то в его обмотке возбуждения будет наведена переменным магнитным потоком ЭДС

$$e_{\text{вых}} = E_m \cos(\beta - \alpha) \sin \omega t, \quad (8.3)$$

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 будет определяться выражением

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

Для малых значений угла α принимают линейную зависимость

$$E_{m \text{ вых}} = E_m |\alpha|.$$

Изменение знака угла α приводит к изменению фазы ЭДС $e_{\text{вых}}$ на угол, равный π . 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. 8.7а 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. Снизу под схемой показаны вход и выходы сельсинной системы (ССТ), работающей в трансформаторном режиме.

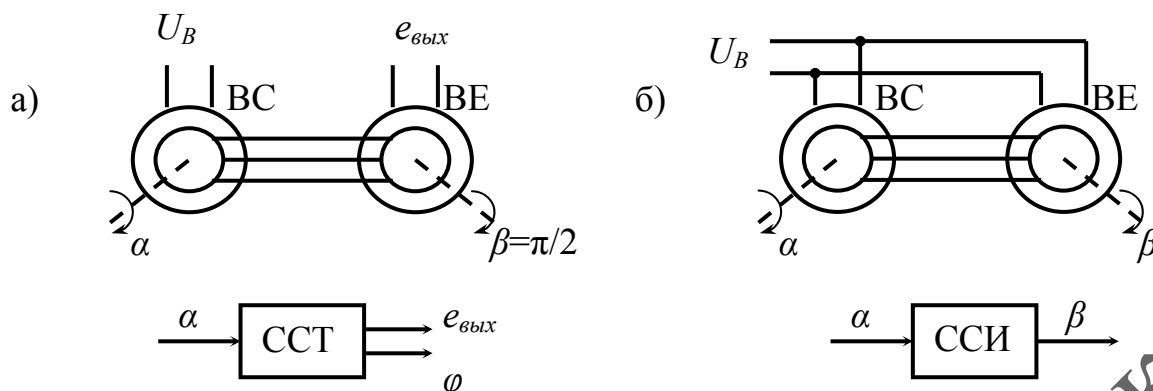


Рис. 8.7. Сельсинные системы, работающие в трансформаторном (а) и индикаторном (б) режимах

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 $\pm(20-30)^\circ$. В табл. 8.2 приведены технические данные некоторых сельсинов.

Таблица 8.2

Технические характеристики сельсинов

Характеристики	Тип сельсинов-датчиков			Тип сельсинов-приемников	
	СГСМ	СБМТ	БД	СМСМ	СТ-2
Напряжение U_B , В	115	36	110	115	40
Частота, Гц	400	400	400	400	400
Потребляемая мощность, Вт	3	-	10	1,5	-
Масса, кг	0,24	0,58	0,40	0,14	0,14

Индикаторный режим. На рис. 8.7б показаны сельсины, работающие в индикаторном режиме (сельсинная система дистанционной передачи угла поворота ССИ). Теперь 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 (8.3) 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 скоростью 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.

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 (рис. 8.8а) включают между двумя обычными сельсинами В1 и В2. По существу он обеспечивает возможность введения дополнительного входного сигнала.

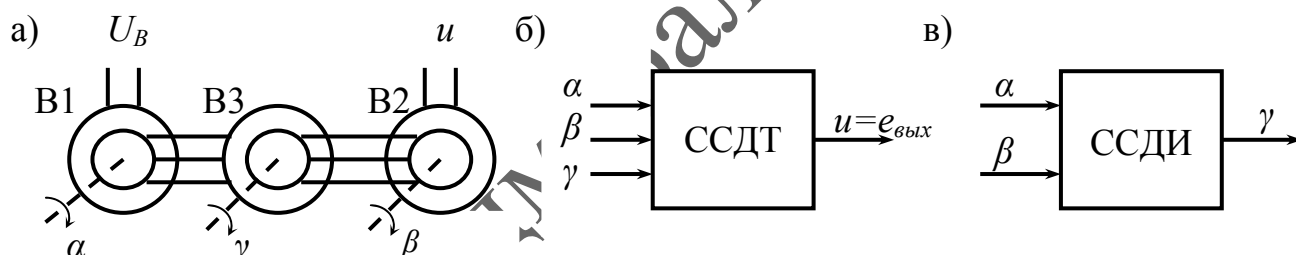


Рис. 8.8. Сельсинная система с дифференциальным сельсином (а) и ее входы-выходы в трансформаторном (б) и индикаторном (в) режимах работы

В трансформаторном режиме выходной сигнал u , снимаемый с однофазной обмотки сельсина В2, по аналогии с (8.3) будет определяться 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. 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. 8.8а). Входными сигналами сельсинной системы (рис. 8.8в) 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.

8.7. Вращающиеся трансформаторы

Вращающийся трансформатор (индукционный электромашинный датчик) – небольшая электрическая машина, аналогичная по конструкции асинхронной машине с фазным ротором с равномерным воздушным зазором. В пазы статора и ротора уложены по две попарно одинаковые обмотки. Магнитные оси статорных обмоток С1-С2 и С3-С4 взаимно перпендикулярны и роторных обмоток Р1-Р2 и Р3-Р4 также взаимно перпендикулярны (рис. 8.9а).

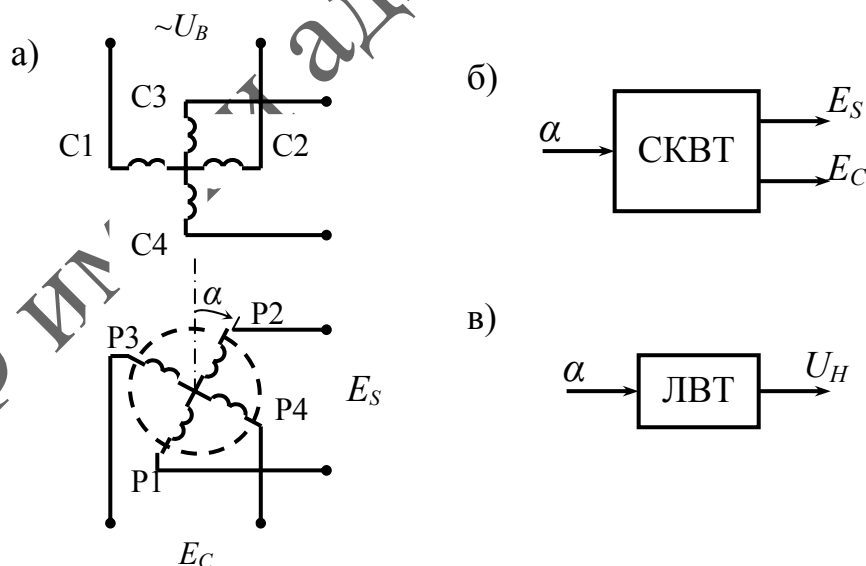


Рис. 8.9. Функциональная схема (а), входы и выходы синусно-косинусного (б) и линейного (в) вращающихся трансформаторов

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

Обмотку С1-С2 статора называют обмоткой *возбуждения*. На нее подают переменное напряжение U_B . Обмотку С3-С4 называют *квадратурной* или *компенсационной* обмоткой. Обмотки ротора: Р1-Р2 – *синусная*, Р3-Р4 – *косинусная*.

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ) работает следующим образом. Если на обмотку возбуждения С1-С2 вращающегося трансформатора подано переменное напряжение U_B (рис. 8.12а), то обмотки ротора будут пронизываться пульсирующим магнитным потоком, созданным обмоткой возбуждения. В обмотках ротора будут индуцироваться трансформаторные ЭДС

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

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. 8.9б). Таким образом вращающийся трансформатор осуществляет преобразование угла поворота α в ЭДС E_S , E_C , изменяющиеся по закону синуса и по закону косинуса соответственно 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.

Линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ) реализован по определенной схеме так, что первичное или вторичное симметрирование используют также для получения на выходе ЛВТ (на обмотке P1-P2) напряжения U_H (рис. 8.9в), 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 $-55^\circ < \alpha < 50^\circ$.

Вращающиеся трансформаторы, как и сельсины, могут применяться попарно 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 транс-

формации 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).

8.8. 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. 8.10а приведена функциональная схема канала передачи одного (i -го) разряда цифровой информации о положении объекта, характеризующегося координатой x . Элементы, входящие в состав датчика, пронумерованы от 1 до 6.

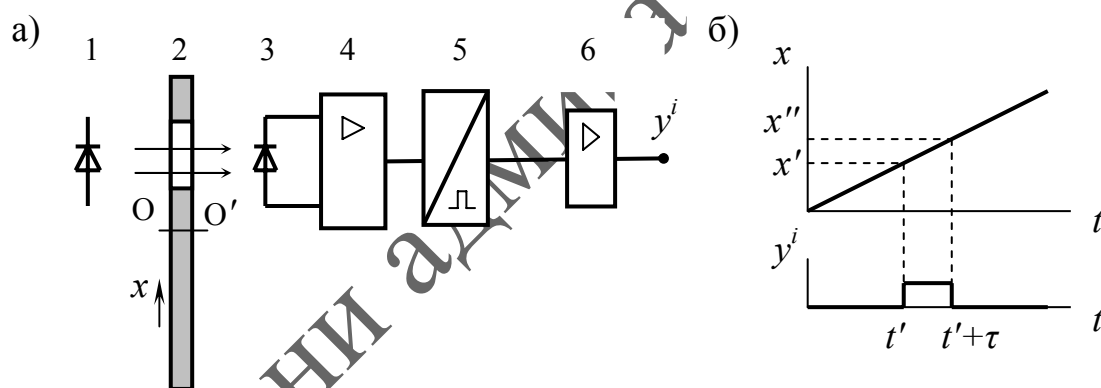


Рис. 8.10. Функциональная схема информационного канала кодового датчика (а) и временные диаграммы, поясняющие его действие (б)

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 . 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 из-

менения x , пока на интервале времени $(t', t'+\tau)$ фотодиод 3 освещен светодио-
 диодом 1 через окно пластины (диска) 2. Требуемый уровень выходного
 сигнала (напряжения) создается усилителем 6. Временные диаграммы, по-
 ясняющие преобразование x в логическую переменную y^i , показаны на рис.
 8.10б. 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. 8.11а показана кодовая пластина (с горизонтальными дорож-
 ками), с помощью которой формируется обычный четырехразрядный код.

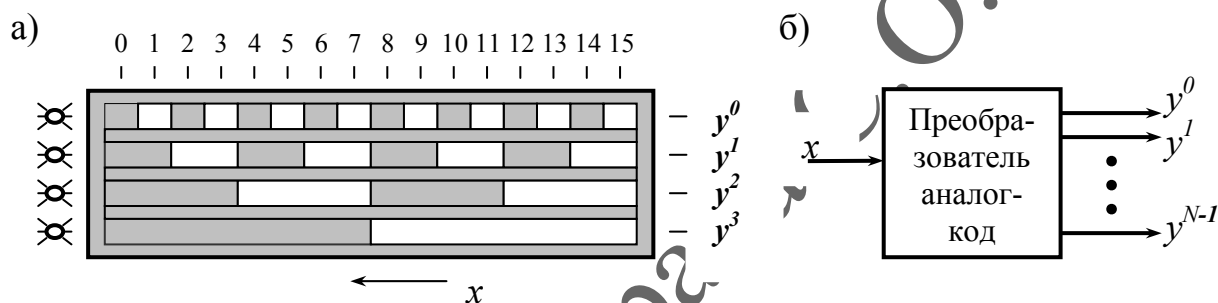


Рис. 8.11. Изобразительная модель кодовой пластины (а) и входы-
 выходы N -разрядного кодового датчика (б)

Слева от пластины показано расположение излучающих элементов –
 светодиодов. Сверху от пластины пронумерованы от 0 до 15 позиции от-
 носительного расположения пластины и светоизлучающих элементов.
 Предполагаем в данном случае, что кодовая пластина перемещается влево,
 занимая такие промежуточные положения, характеризуемые координатой
 x , при которых неподвижные излучающие элементы находятся за пласти-
 ной. Например, позиции 5 соответствует положение пластины, при кото-
 ром окна первой и третьей сверху дорожек открыли световой поток для
 соответствующих фотоприемников (фотодиодов). Через вторую и четвер-
 тую дорожки световые потоки не проходят к соответствующим фотопри-
 емникам.

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. 8.11б), 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.

В табл. 8.3 приведены технические характеристики некоторых типов фотоэлектрических преобразователей угла в код.

Таблица 8.3

Технические характеристики фотоэлектрических преобразователей

Тип, марка преобразователя	Количество разрядов, N	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
ФКУ-8	8	44,5x35,2	0,08
ФП-11В	11	105x100	0,45
ФП-ЛОГ-11	11	105x100	0,45
ФПВК-СК-12	12	140x126	1,0
ФПВК-Л-13	13	140x126	0,95
ОЭП-Л-9	9	55x108,5	0,25
ОЭП-Л-12	12	142x109	0,9

8.9. Датчики на основе измерительных преобразователей положения

На основе измерительных преобразователей положения (ИПП), рассмотренных в п. 8.2 ... п. 8.8, реализуют датчики различных физических ве-

личин: давления, уровня, температуры и др. в соответствии со схемой рис. 8.1. В качестве измерительного преобразователя ИП2 в них применяется тот или иной ИПП. Первичный измерительный преобразователь ИП1 может быть изготовлен для конкретного объекта с целью контроля его определенного параметра. В специализированной конструкции ИП1 в качестве чувствительного элемента может использоваться мембрана, преобразующее 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 и вращающиеся трансформаторы, работающие в трансформаторном режиме (см. рис. 8.7а). 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 об-

мотки 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, работающая в индикаторном режиме (см. рис. 8.8а), и дисковый кодовый преобразователь (рис. 8.6а), 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.

8.10. 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.

Тахогенератор постоянного тока – это электрическая машина постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 8.12а) или с возбуждением от постоянного магнита (рис. 8.12б).

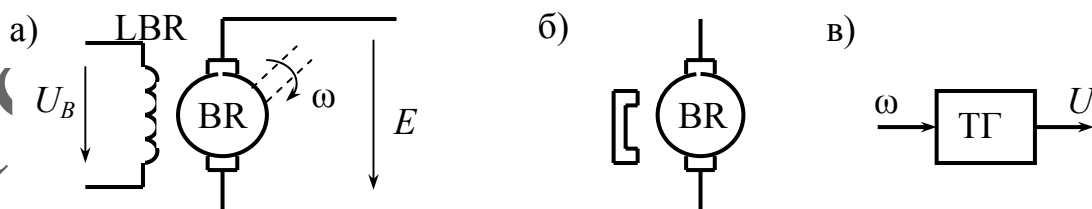


Рис. 8.12. Функциональные схемы тахогенераторов

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, $\kappa = c_e \Phi = const.$

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. 8.13). Если же сопротивление нагрузки имеет конечную величину $R_H < \infty$, то линейность преобразования $\omega \rightarrow U$ нарушается.

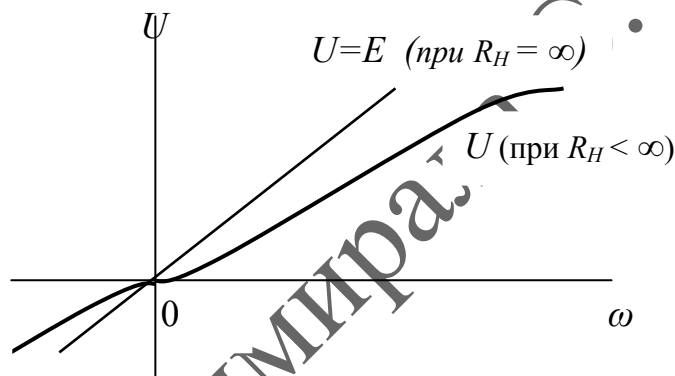


Рис. 8.13. Характеристики управления тахогенератора постоянного тока

Протекающий в цепи якорной обмотки ток вызывает реакцию якоря. Линейная характеристика искажается, как показано на рис. 8.13. 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 характеристика управления может быть приближенно представлена линейной зависимостью

$$U = \kappa_{ТГ} \omega$$

Постоянный по величине коэффициент $\kappa_{ТГ}$ определяется выражением

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

где $R_{\text{я}}$ – 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

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

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

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

Асинхронный тахогенератор переменного тока выполнен на базе асинхронной двухфазной машины. 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 $q-q$ (рис. 8.14а).

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 выполняется тонкостенным в виде стакана из немагнитного проводникового материала (обычно алюминиевого сплава). Внутри ротора размещается неподвижный шихтованный сердечник по которому замыкаются магнитные потоки.

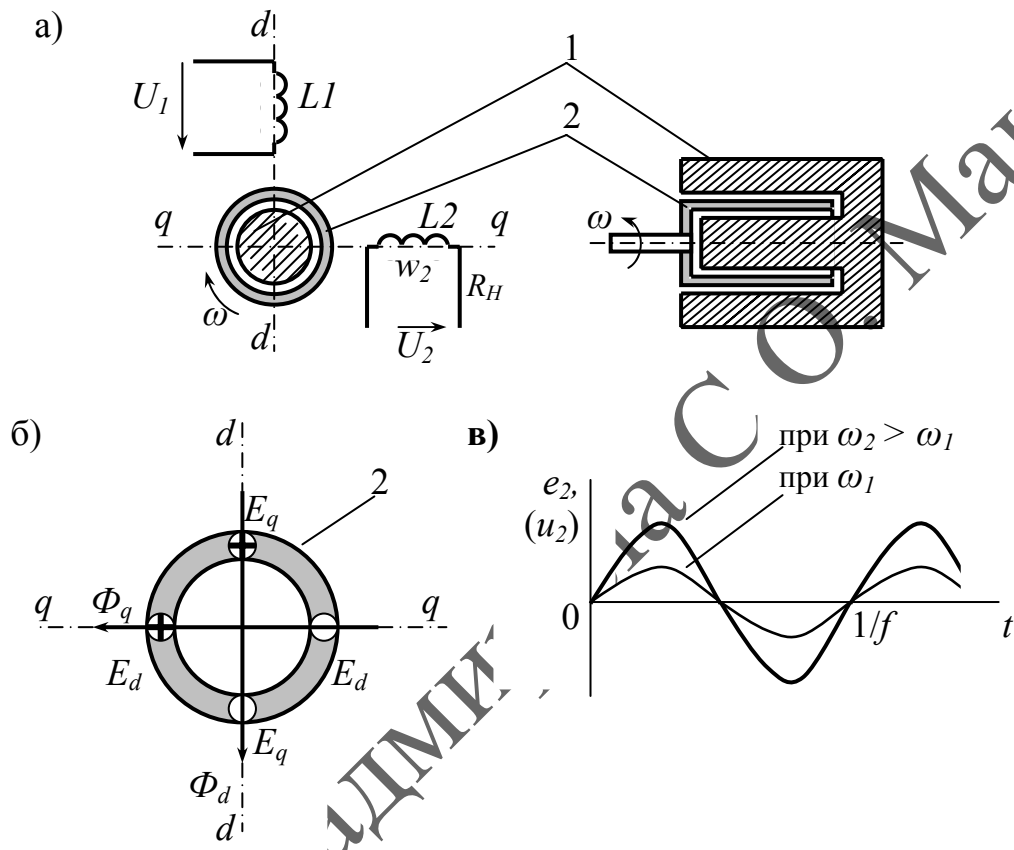


Рис. 8.14. Элементы синхронного тахогенератора переменного тока (а, б) и временная диаграмма ЭДС генераторной обмотки (в)

Принцип действия асинхронного тахогенератора состоит в следующем. Обмотка возбуждения $L1$ создает вдоль оси $d-d$ переменный магнитный поток Φ_d (на рис. 8.14б 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. 8.14б показанна 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.

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

$$E_q = c_e \Phi_d \omega \quad (8.4)$$

(на рис. 8.14б показанна 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. 8.14б показан стрелкой, направленная по оси $q-q$). В генераторной обмотке $L2$ потоком Φ_q индуцируется переменная ЭДС

$$e_2(t) = E_{m2}(\omega) \sin(2\pi f t), \quad (8.5)$$

амплитуда $E_{m2}(\omega)$ которой пропорциональна, согласно (8.4), угловой скорости ω вращения ротора тахогенератора. При изменении знака ω , т.е. направления вращения ротора, фаза $e_2(t)$ изменяется на 180° . На рис. 8.14в 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 удается 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 передаточный коэффициент. Амплитудная погрешность асинхронного тахогенератора менее 0,5%.

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

$$e_r(t) = E_{mr}(\omega) \sin(\omega t), \quad (8.6)$$

изменяется с частотой ω , полностью определяемой скоростью вращения ротора. Амплитуда $E_{mr}(\omega)$ ЭДС пропорциональна скорости вращения. При изменении угловой скорости вращения ротора изменяется и амплитуда и частота ЭДС и напряжения на выходе тахогенератора (рис. 8.15)

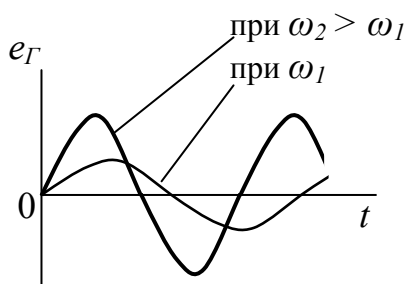


Рис. 8.15. Временные диаграммы ЭДС на выходе синхронного тахогенератора при разных скоростях вращения

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

8.11. Цифровые датчики скорости

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 концентрических дорожках (рис. 8.16а). 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. 8.16а.

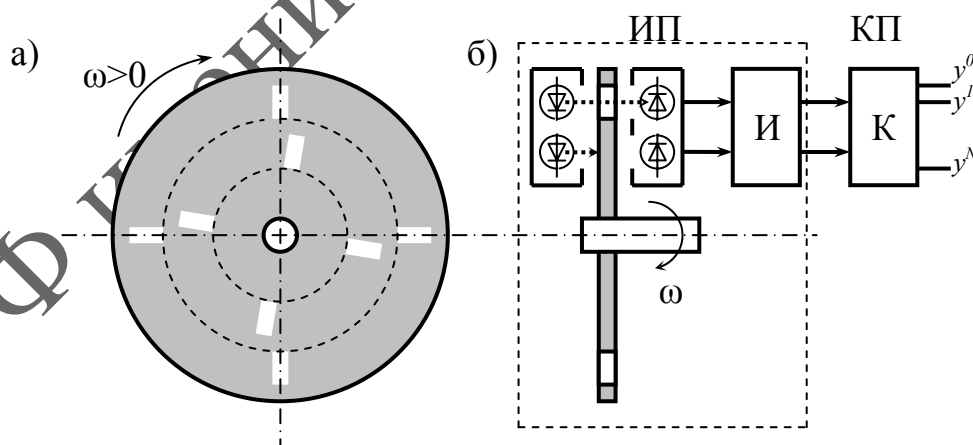


Рис. 8.16. Изобразительная модель кодового диска импульсного преобразователя (а) и функциональная схема цифрового датчика скорости (б)

Когда диск вращается с некоторой угловой скоростью ω , излучение от источников (светодиодов) через окна дорожек периодически попадает на фотодиоды (рис. 8.16б). При этом проводимость фотодиодов увеличивается. По сигналам с фотодиодов в блоке формирования импульсов И вырабатываются импульсы частотой

$$f_{И} = \frac{\omega}{2\pi} n,$$

где n – количество окон на дорожке (на рис. 8.19а 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 .

Принцип формирования выходных сигналов $U_{\omega>0}$ и $U_{\omega<0}$ блоком И в зависимости от направления вращения кодового диска иллюстрируется на рис. 8.17.

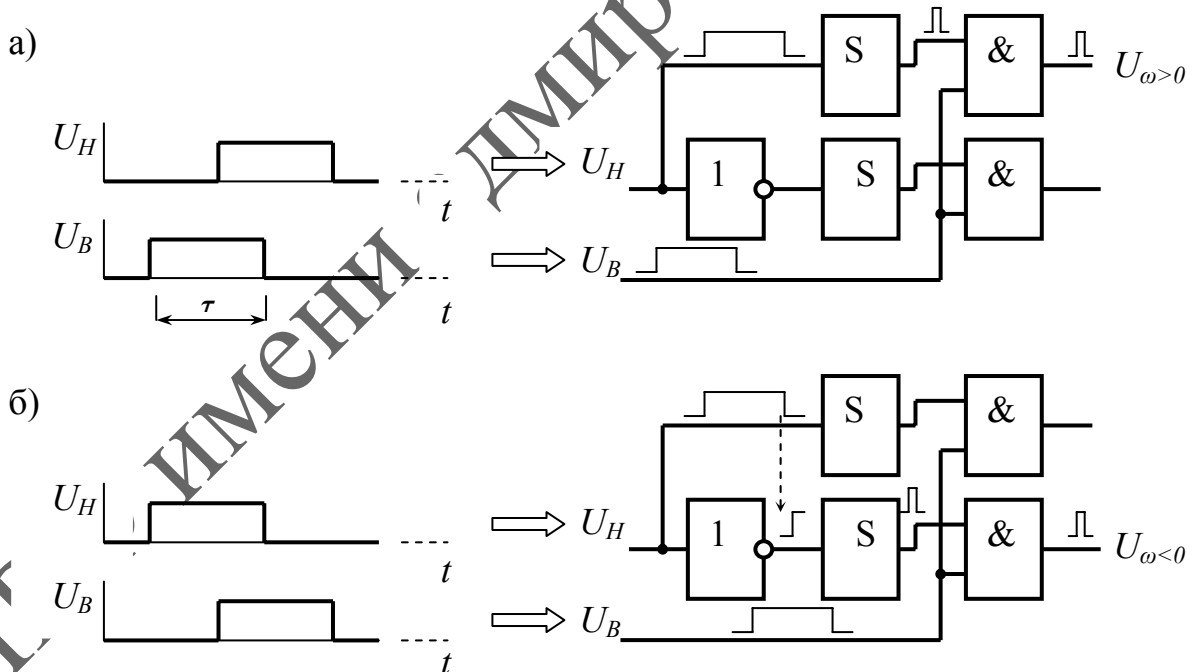


Рис. 8.17. Временные диаграммы сигналов и логические схемы обработки этих сигналов при положительной (а) и отрицательной (б) скорости ω вращения кодового диска

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

Кодовый преобразователь КП (см. рис. 8.16б) – 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

$$n_T = f_H T = \frac{\omega}{2\pi} T \quad (8.7)$$

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

$$\delta_\omega = 1/n_T, \quad (8.8)$$

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 выражений (8.8) и (8.7) 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 уместятся на интервале между двумя сосед-

ними импульсами на выходе импульсного преобразователя. Этот способ дает погрешность, возрастающую с увеличением скорости ω .

8.12. Датчики тока и датчики напряжения

Датчики тока и датчики напряжения осуществляют преобразование текущих значений тока и, соответственно, напряжения (в контролируемой цепи) 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 $0 \dots 10$ 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. 8.18.

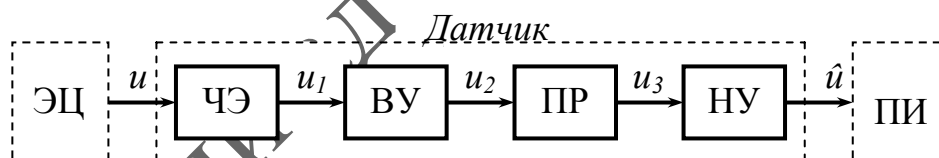


Рис. 8.18. Обобщенная структурная схема датчика тока и датчика напряжения

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).

Подключение чувствительных элементов к электрической цепи с нагрузкой (R_H , Z_H) показано на рис. 8.19.

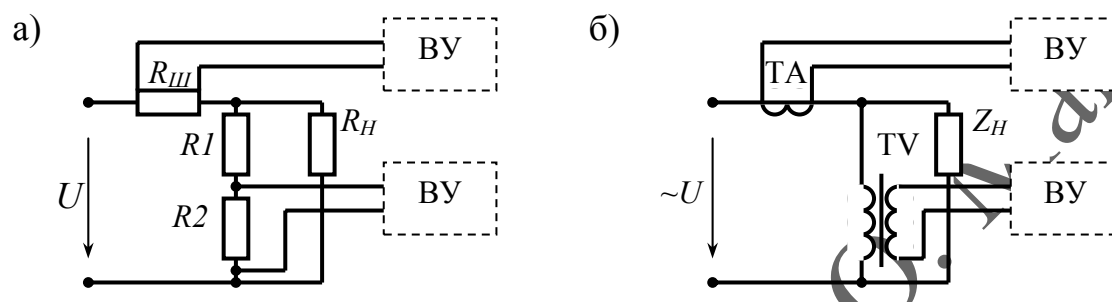


Рис. 8.19. Подключение к электрической цепи чувствительных элементов: шунта $R_{ш}$ и делителя напряжения R_1, R_2 (а); трансформатора тока TA и трансформатора напряжения TV (б)

Шунт ($R_{ш}$ на рис. 8.19а) 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. 8.19а) 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 (рис. 8.19б), что позволяет: уменьшить потери энергии, возникающие в процессе ее преобразования; реализовать гальваническую развязку между цепями; повысить безопасность эксплуатации; уменьшить 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 (ТН на рис. 8.19б) 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

$$u_1 = k_{чЭном} \cdot u.$$

Измерительный трансформатор постоянного тока, выполненный на основе магнитного усилителя (см. [1] п. 5.3), 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. 8.20). Она состоит из одного витка провода. Рабочие обмотки w_p получают питание от источника переменного напряжения $\sim U$.

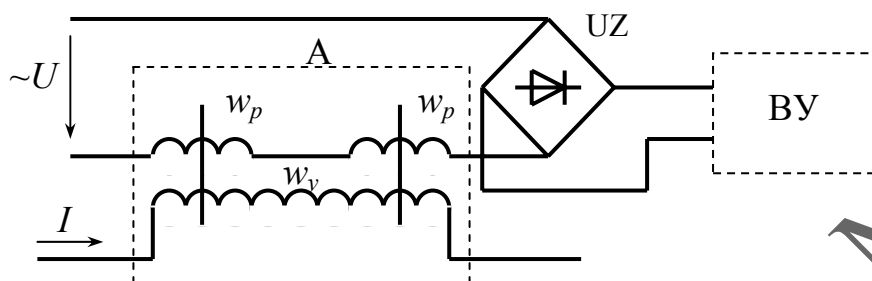


Рис. 8.20. Функциональная схема измерительного преобразователя с измерительным трансформатором постоянного тока А

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. [1] п. 5.3).

Потенциальный разделитель (ПР на рис. 8.18) 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. 8.18) 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. 8.21а.

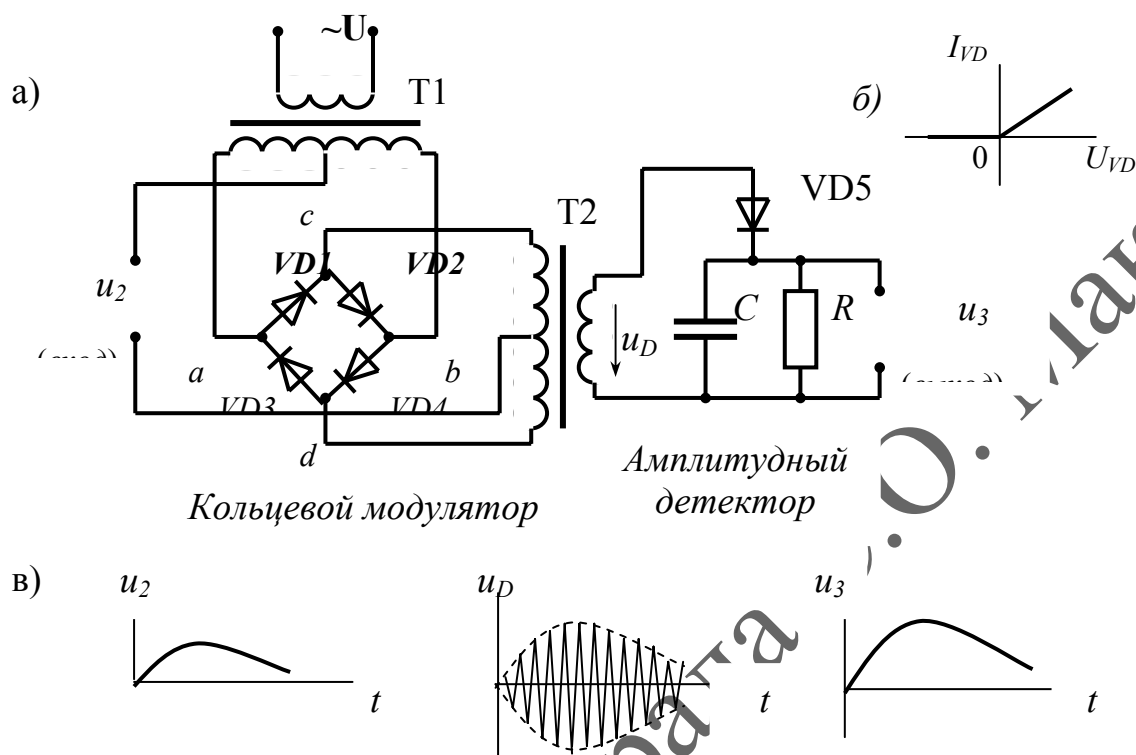


Рис. 8.21. Электрическая схема потенциального разделителя (а), вольтамперная характеристика диодов (б) и временные диаграммы преобразования сигнала (в)

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. 8.21б 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 напря-

жения, 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 T1;

от среднего вывода обмотки трансформатора T1 через источник сигнала u_2 , верхнюю секцию трансформатора T2 (снизу вверх), диод VD2 к точке b .

По верхней секции обмотки трансформатора T2 один коммутирующий ток, обозначим его i_{\downarrow} , протекает сверху вниз, другой i_{\uparrow} – снизу вверх. По нижней секции обмотки T2 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 T2. 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 T2 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 T1 и T2 будут различаться. Следовательно, по одной секции обмотки T2 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. 8.21в.

Демодулятор (в рассматриваемом случае амплитудный детектор) состоит из однополупериодного выпрямителя, выполненного на диоде VD5, и емкостного С-фильтра (см. рис. 8.21а). Получая на входе переменное на-

напряжение u_D , амплитуда которого изменяется в соответствии с сигналом u_2 , детектор выделяет *оггибающую* этого напряжения (правая диаграмма на рис. 8.21в).

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.

ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова

Литература

Основная:

1. Тырва В. О. Электрические и электронные аппараты. Элементы и узлы электроаппаратов: учеб. Пособие. СПб.: ФГО ВПО СПГУВК, 2009.

дополнительная:

2. Алиев И.И., Абрамов М.Б. Электрические аппараты. Справочник. – М.: ИП РадиоСофт, 2004.

3. Марков Э.Т. Судовые электрические аппараты. – Л.: Судостроение, 1982.

4. Родштейн Л.А. Электрические аппараты. – М.: Энергия, 1980.

5. Розанов Ю.К. Электронные устройства электромеханических систем: Учеб. пособие для студентов высш. Учеб. Заведений / Ю.К. Розанов, Е.М. Соколова. – М.: Издательский центр «Академия», 2004.

6. Таев И.С. «Электрические аппараты управления». Высшая школа, 1984.

7. 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.

8. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

9. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Учебн. Для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1988.

10. Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов/ Под ред. Ю.К. Розанова. 2-е изд. – М.: Информэлектро, 2001.

Содержание

Предисловие	3
1. Представление аппарата элементом системы управления.....	4
1.1. Электроаппарат в системе управления	4
1.2. Узлы с дистанционно управляемыми аппаратами, комплектные аппараты	9
1.3. Особенности преобразования входных воздействий аппаратами.....	11
1.4. Основные требования, предъявляемые к аппаратам	13
1.5. Общие условия выбора электроаппарата для системы управления.....	14
2. Контактторы	19
2.1. Общие сведения.....	19
2.2. Классификация, основные технические данные и категории применения контакторов.....	24
2.3. Особенности контакторов постоянного тока и контакторов переменного тока... ..	28
2.4. Разновидности электромагнитных контакторов	33
2.5. Бесконтактные коммутаторы силовых цепей.....	40
2.6. Тиристорные коммутаторы трехфазных цепей асинхронных двигателей	44
3. Пускатели.....	48
3.1. Общие сведения.....	48
3.2. Магнитные пускатели	51
3.3. Тиристорные пускатели.....	53
4. Реле	59
4.1. Общие сведения.....	59
4.2. Электромагнитные реле тока и напряжения	63
4.3. Контактные реле времени	70
4.4. Полупроводниковые и комбинированные реле	74
4.5. Оптоэлектронные твердотельные реле	79
4.6. Реле, контролирующие неэлектрические параметры	81
5. Аппараты защиты.....	86
5.1. Общие сведения.....	86
5.2. Электромагнитные аппараты защиты	88
5.3. Электротепловые реле защиты	93
5.4. Автоматические воздушные выключатели.....	97
5.5. Выключатели дифференциального тока	103
5.6. Предохранители	106
6. Командоаппараты и другие аппараты ручного управления	110
6.1. Общие сведения.....	110
6.2. Кнопки управления и кнопочные посты.....	112
6.3. Универсальные переключатели, пакетные ключи, командоконтроллеры	115
6.4. Путевые и конечные выключатели.....	120
6.5. Контроллеры.....	125
6.6. Реостаты	128
6.7. Рубильники и переключатели	130
7. Дистанционно управляемые тормозные устройства и муфты.....	135
7.1. Общие сведения.....	135
7.2. Электромагнитные тормозы.....	137
7.3. Электромагнитные фрикционные муфты	139
7.4. Электромагнитные порошковые муфты	142
7.5. Электромагнитные асинхронные муфты	143

8. Измерительные преобразователи и электрические датчики.....	145
8.1. Общие сведения.....	145
8.2. Резистивные преобразователи и датчики положения.....	150
8.3. Индуктивные преобразователи и датчики положения	153
8.4. Емкостные преобразователи перемещения	156
8.5. Сельсины.....	157
8.6. Сельсинные системы.....	160
8.7. Вращающиеся трансформаторы	165
8.8. Кодовые датчики положения	168
8.9. Датчики на основе измерительных преобразователей положения	170
8.10. Генераторные преобразователи скорости вращения	172
8.11. Цифровые датчики скорости.....	178
8.12. Датчики тока и датчики напряжения	181
Литература.....	188

ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова

Учебное издание

Тырва Владимир Оскарович

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ
АППАРАТЫ**

Часть 2

**АППАРАТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НИЗКОГО
НАПРЯЖЕНИЯ**

Учебное пособие

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 12.10.10

Сдано в производство 12.10.10

Формат 60×84 1/16

Усл.-печ. л. 11,04.

Уч.-изд. л. 9,5.

Тираж 150 экз.

Заказ № 142

**Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7**

**Отпечатано в типографии ФГОУ ВПО СПГУВК
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2**