

Центр  
учебной книги  
и среднего обучения  
**РИПО**

**А. Г. Сеньков  
В. А. Дайнеко**

# **ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКА**

**Учебное пособие**



**А. Г. Сеньков  
В. А. Дайнеко**

# **ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКА**

Допущено Министерством образования  
Республики Беларусь в качестве учебного пособия  
для учащихся учреждений образования, реализующих  
образовательные программы среднего специального образования  
по специальностям «Мехатроника», «Техническая эксплуатация  
оборудования», «Машины и технология обработки материалов  
давлением», «Технология машиностроения»



Минск  
РИПО  
2020

УДК 621.31(075.32)  
ББК 31.291я723  
С31

**Авторы:**

заведующий кафедрой «Автоматизированные системы управления производством» УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» кандидат технических наук, доцент *А. Г. Сеньков*;  
заведующий кафедрой «Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий» этого же учреждения образования кандидат технических наук, доцент *В. А. Дайнеко*

**Рецензенты:**

цикловая комиссия специальных учебных предметов (дисциплин) машиностроения и металлообработки филиала «Колледж современных технологий в машиностроении и автосервисе» УО РИПО (*М. Б. Бондарев*); доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета кандидат технических наук, доцент *О. Ф. Онейко*

*Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.*

*Выпуск издания осуществлен при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь.*

**Сеньков, А. Г.**

С31 Электропривод и электроавтоматика : учеб. пособие / А. Г. Сеньков, В. А. Дайнеко. — Минск : РИПО, 2020. — 177 с., [4] л. ил. : ил.  
ISBN 978-985-7234-38-7.

В учебном пособии изложен новый материал по датчикам, электрическим аппаратам управления и защиты в системах автоматики, новым электрическим аппаратам и приборам, в которых использованы достижения микропроцессорной техники и силовой преобразовательной техники, приведены сведения о системах управления электроприводами с числовыми программными устройствами. Материал сопровождается иллюстрациями, схемами и контрольными вопросами по каждому разделу.

Предназначено для учащихся учреждений среднего специального образования по специальностям «Мехатроника», «Техническая эксплуатация оборудования», «Машины и технология обработки материалов давлением», «Технология машиностроения».

**УДК 621.31(075.32)  
ББК 31.291я723**

**ISBN 978-985-7234-38-7**

© Сеньков А. Г., Дайнеко В. А., 2020  
© Оформление. Республиканский институт профессионального образования, 2020

## **ВВЕДЕНИЕ**

---

---

Во многих отраслях промышленности производительность технологического оборудования в значительной степени определяется уровнем его автоматизации, основным звеном которой является электропривод. Прогресс во многих отраслях науки и техники (машиностроение, микроэлектроника, транспорт, космическая техника, добыча и переработка полезных ископаемых и т. д.) все более подчеркивает его важнейшую роль. Большинство людей редко используют понятие «электропривод», хотя сталкиваются с этим понятием ежедневно: комфортное движение в электропоезде, лифте, автомобиле, использование многочисленных бытовых приборов (пылесос, миксер, кондиционер, вентилятор, кухонный комбайн, автоматическая стиральная машина) и т. д.

В настоящее время на смену регулируемому электроприводу постоянного тока пришел регулируемый электропривод переменного тока, прежде всего на базе асинхронных короткозамкнутых двигателей. Асинхронные двигатели – самые распространенные электрические машины. Однако до недавнего времени их применяли в основном в нерегулируемых электроприводах для вращения механизмов, работающих с постоянной скоростью: вентиляторов, насосов, компрессоров, конвейеров.

В связи с появлением новых поколений транзисторов и тиристоров, а также относительно недорогих микропроцессоров высокого быстродействия выпуск и эксплуатация автоматизированных электроприводов переменного тока на базе асинхронных электродвигателей стали экономически целесообразными. Это объясняется и тем, что технология производства асинхронных

двигателей в настоящее время практически полностью автоматизирована.

Современный автоматизированный электропривод представляет собой сложную электромеханическую систему, которая управляет, например, мощными, в несколько десятков тысяч киловатт, аэродинамическими трубами, где осуществляется моделирование условий, аналогичных тем, какие возникают в полете летательных аппаратов, или реверсивными прокатными станами, в которых двигатели постоянного тока мощностью каждый в 10 000 кВт более 1000 раз в течение 1 ч, т. е. примерно за каждые 3 с, меняют свое направление вращения, обеспечивая автоматически прокатку заготовки. В соответствии с системным подходом к электроприводу все элементы внутри него теснейшим образом взаимосвязаны и взаимообусловлены, а сам электропривод столь же тесно связан с системами более высокого уровня. Поэтому необходимо глубокое понимание этих взаимосвязей и учет их на практике.

Понимание устройства и работы электропривода – это прежде всего понимание физических процессов, происходящих в нем, умение сопоставить современные технические решения в области микро- и силовой электроники, а также современного программного обеспечения. Это необходимо всем, чья деятельность непосредственно связана с проектированием, изготовлением и эксплуатацией установок, в которых используются автоматизированный электропривод и системы управления им.

В учебном пособии приведены общие теоретические положения, касающиеся механики автоматизированного электропривода, а также наиболее распространенные и перспективные способы управления им. Рассмотрены разомкнутые (релейно-контактные) системы управления пуском и торможением электропривода, основные виды его защиты и блокировки, а также замкнутые системы управления последовательного и параллельного действия.

Задача данного учебного пособия: дать развернутое представление о средствах, входящих в состав современного электропривода (электродвигатель, силовой преобразователь, датчики и система управления), показать основные способы регулирования электроприводов, обозначить их достоинства и недостатки.

# 1. ЭЛЕКТРОПРИВОД

---

---

Для выполнения технологической операции исполнительный орган рабочей машины должен совершать механическое движение с требуемой скоростью и преодолевать при этом силу сопротивления. То есть к исполнительному органу должна быть подведена механическая энергия от устройства, называемого приводом. Таким образом, **привод** (он же силовой привод) в механике — совокупность устройств, предназначенных для приведения в действие машин и механизмов.

Выбор типа привода — важнейшая задача, которая стоит при проектировании любого оборудования, где будет осуществляться линейное перемещение или вращательное движение. По виду энергии, используемой для приведения в действие машин и механизмов, различают три основных типа привода:

- гидравлический;
- пневматический;
- электрический.

Каждый из них передает энергию исполнительному механизму и преобразует ее в движение. У каждого — своя рабочая среда, что делает отличными их характеристики.

*Гидравлический привод (гидропривод)* — совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов посредством гидравлической энергии. Так, в 1795 г. английский изобретатель Джозеф Брама изобрел гидравлический пресс. Функцией гидропривода является передача мощности от приводного двигателя к рабочим органам машины (например, в одноковшовом экскаваторе — передача мощности от двигателя внутреннего сгорания к ковшу или к гидродвигателям привода

стрелы, к гидродвигателям поворота платформы и т. д.). В общих чертах передача мощности в гидроприводе происходит следующим образом:

- приводной двигатель передает вращающий момент на вал насоса, который сообщает энергию рабочей жидкости;
- рабочая жидкость по гидролиниям через регулируемую аппаратуру поступает в гидродвигатель, где гидравлическая энергия преобразуется в механическую;
- после этого рабочая жидкость по гидролиниям возвращается либо в гидробак, либо непосредственно к насосу.

*Пневматический привод (пнеумопривод)* – совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение частей машин и механизмов посредством энергии сжатого воздуха. Обязательными элементами пневмопривода являются компрессор (генератор пневматической энергии) и пневмодвигатель. Приводной двигатель передает вращающий момент на вал компрессора, который осуществляет сжатие воздуха и таким образом сообщает энергию рабочему газу. Рабочий газ по пневмолиниям через регулируемую аппаратуру поступает в пневмодвигатель, где пневматическая энергия преобразуется в механическую. После этого рабочий газ выбрасывается в окружающую среду, в отличие от гидропривода, в котором рабочая жидкость по гидролиниям возвращается либо в гидробак, либо непосредственно к насосу.

*Электрический привод (электропривод)* преобразует электрическую энергию в механическую и обратно. В настоящее время на производстве, в сельском, коммунальном хозяйствах наиболее распространен электрический привод, на долю которого приходится более 60 % потребления электроэнергии. Электропривод потребляет энергию только при движении, что делает его особенно экономичным. Можно использовать электродвигатель любого типа: постоянного, переменного тока, серводвигатель и др. Благодаря своим компактным размерам его можно монтировать в составе практически любого оборудования и станков. Из-за доступности источника энергии его применяют во всех отраслях на основных и вспомогательных операциях.

Достоинства электрического привода: высокий коэффициент полезного действия (КПД) преобразования электрической энергии в механическую; легкость управления; широкие возможности для автоматизации технологических процессов; возможность

работы в широком температурном диапазоне, при повышенной влажности; более низкая стоимость. Возможности электропривода все более расширяются по мере развития силовой электроники и микропроцессорной техники.

**Электропривод (ЭП)** – это электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств и предназначенная для приведения в движение рабочих органов машин и управления этим движением.

Функциональная схема электропривода представлена на рисунке 1.1.

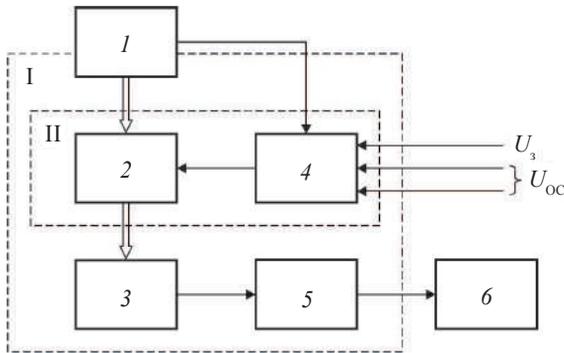


Рис. 1.1. Функциональная схема электропривода:

I – электропривод; II – система управления; 1 – источник электроэнергии; 2 – силовой преобразователь; 3 – электродвигатель; 4 – блок управления; 5 – передаточное устройство; 6 – рабочая машина

Основной элемент электропривода – электродвигатель, который преобразует электрическую энергию от источника в механическую энергию рабочей машины. Передаточное устройство служит для изменения скорости вращения выходного вала электродвигателя до значения, необходимого рабочей машине. Оно может быть выполнено в виде редуктора, т. е. быть неуправляемым. Управляемое передаточное устройство представляет собой коробку передач с электромагнитными муфтами, изменяющими ее передаточное число. Для получения электроэнергии требуемых параметров между электродвигателем и источником энергии включают силовой преобразователь. Управление преоб-

разователем осуществляется от блока управления, на вход которого поступают задающий сигнал  $U_3$  и дополнительные сигналы обратной связи  $U_{oc}$ , дающие информацию о характере движения исполнительных органов, работе отдельных узлов, об аварийных режимах. Преобразователь вместе с блоком управления образуют систему управления. Утолщенными линиями показаны силовые каналы передачи электрической и механической энергии, а тонкими – каналы передачи сигналов управления.

В электроприводах используют асинхронные, синхронные двигатели; электродвигатели постоянного тока независимого, последовательного, смешанного возбуждения; вентильные, шаговые и линейные электродвигатели постоянного и переменного тока.

По характеру движения электроприводы бывают вращательными и линейными; по направлению вращения – реверсивными и нереверсивными; по принципу действия электродвигательного устройства – непрерывного действия (подвижные части электродвигателя в установившемся режиме работы находятся в состоянии непрерывного движения) и дискретного действия (подвижные части находятся в состоянии дискретного движения). Так, примером электропривода дискретного действия может служить использование так называемых шаговых электродвигателей для вращения стрелок в часах с кварцевым механизмом.

Электропривод может получать питание от сети, а может быть автономным, т. е. получать питание от аккумуляторов или от теплового двигателя (дизель-электрический или турбоэлектрический привод).

По роду тока электроприводы разделяют на приводы постоянного и переменного тока; по виду преобразовательного устройства – на вентильные, тиристорные, транзисторные и с преобразователями частоты.

По характеру изменения параметров электроприводы могут быть регулируемыми и нерегулируемыми. Параметры регулируемых электроприводов изменяются под воздействием регулирующего устройства, нерегулируемых – в результате возмущающих воздействий.

По виду связей с исполнительным органом рабочей машины электроприводы делят на безредукторные, редукторные, маховиковые и электрогидравлические.

Электропривод бывает групповой, индивидуальный и взаимосвязанный. В групповом приводе один электродвигатель при-

водит в движение с помощью разветвленной передачи группу механизмов или группу рабочих органов одного механизма. Кинематическая схема такого привода оказывается громоздкой, а сам привод неэкономичен, поэтому находит ограниченное применение.

В индивидуальном приводе электродвигатель приводит в движение только один рабочий орган. Кинематическая схема механизма с индивидуальным приводом существенно упрощается, повышается экономичность и снижается металлоемкость механизма. Электродвигатель может встраиваться непосредственно в механизм.

Взаимосвязанный привод обеспечивает работу одного механизма при помощи нескольких электродвигателей.

## **1.1. СТРУКТУРА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Механическая часть электропривода включает в себя движущиеся массы двигателя – ротор или якорь, передаточное устройство и рабочий орган исполнительного механизма – рабочую машину (см. рис. 1.1). Передаточное устройство осуществляет преобразование движения в механической части электропривода. При помощи передаточного устройства может увеличиваться или уменьшаться скорость, изменяться вид движения, например осуществляться преобразование вращательного движения в поступательное и т. д. К передаточным устройствам относятся редукторы, винтовые, зубчато-реечные или ременные передачи, барабан с тросом и т. п.

Исполнительный, или рабочий, орган рабочей машины реализует подведенную к нему механическую энергию в полезную работу. Чаще всего он является потребителем энергии. Эта функция рабочего органа характерна для механизмов, осуществляющих обработку материалов, подъем или перемещение грузов и т. п. При этом поток механической мощности направлен от двигателя к рабочему органу. Иногда рабочий орган может быть источником механической энергии. В таком случае он отдает механическую энергию, запасенную механизмом, например, при спуске груза. Поток механической мощности при этом направлен от рабочего органа к двигателю. Передача механической энер-

гии от вала двигателя к рабочему органу или обратно связана с потерями в механических звеньях. Причина потерь — трение в подшипниках, направляющих, зацеплениях и т. п. В механических звеньях, обладающих упругостью, возникают дополнительные потери, обусловленные вязким трением в деформируемых элементах. В результате поток мощности, проходя от источника к потребителю, постепенно уменьшается.

Моменты и силы, приложенные к отдельным частям электропривода, могут быть движущими, направленными в сторону движения, и тормозными, действующими в противоположном направлении.

Активный момент имеет постоянное направление действия, не зависящее от направления скорости. Он создается так называемыми потенциальными силами (гравитационными, силами упругой деформации).

Реактивный момент создается в основном силами трения, всегда направлен противоположно направлению движения, поэтому его знак изменяется на противоположный с изменением направления движения. К реактивным моментам относятся также моменты неупругой деформации.

Если направление момента, создаваемого двигателем, и направление вращения его вала совпадают, двигатель работает в основном режиме — двигательном. При этом он преобразует электрическую энергию в механическую, а его момент является движущим.

Если направление момента, создаваемого двигателем, и направление вращения его вала противоположны, двигатель работает в тормозном режиме, создавая тормозной момент и потребляя при этом механическую энергию.

Реактивные моменты всегда являются тормозными. Например, моменты сопротивления трения, возникающие в механизмах, моменты сопротивления при резании металла и др. Активный момент действует в одном и том же направлении независимо от направления частоты вращения. Он может быть направлен как по движению, так и против него.

Механической характеристикой *рабочей машины* называют зависимость

$$M = f(\omega), \quad (1.1)$$

где  $M$  – момент сопротивления рабочей машины, Н·м;  $\omega$  – угловая скорость вращения, рад/с ( $\omega = \pi n/30$ , где  $n$  – частота вращения, об/мин).

Большинство механических характеристик машин можно математически описать с помощью следующей формулы:

$$M = M_0 + (M_{с.ном} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^x, \quad (1.2)$$

где  $M_0$  – начальный момент сопротивления при  $\omega = 0$ ;  $\omega$  – текущее значение угловой скорости, соответствующее текущему значению момента  $M$ ;  $M_{с.ном}$  – статический момент сопротивления при  $\omega_{ном}$ .

При  $x = 0$  получается не зависящая от скорости механическая характеристика, для которой  $M = M_{с.ном}$ . Такая характеристика у подъемных кранов, лебедок. При  $x = 1$  получается линейно возрастающая характеристика. Ею обладают многие машины, у которых основные сопротивления создаются силами трения совместно с аэродинамическими силами: молотилки, дробилки кормов, лесопильные рамы, зерноочистительные машины. Иногда такую характеристику называют *генераторной*, так как она присуща генераторам постоянного тока независимо от возбуждения при постоянной нагрузке.

Если  $x = 2$ , момент сопротивления пропорционален квадрату угловой скорости. Такую характеристику называют *вентиляторной*. Так изменяется момент сопротивления вентиляторов и других механизмов, принцип работы которых основан на законах аэро- и гидродинамики.

Если  $x = -1$ , получается нелинейно спадающая характеристика, для которой момент сопротивления изменяется обратно пропорционально скорости, а мощность остается постоянной. Такой характеристикой обладают металлорежущие станки, у которых с увеличением подачи скорость вращения деталей уменьшается.

Механической характеристикой *электродвигателя* называют зависимость скорости вращения выходного вала электродвигателя  $\omega$  от электромагнитного момента  $M$ , развиваемого электродвигателем в установившемся режиме, т. е.

$$\omega = f(M). \quad (1.3)$$

Различают естественную и искусственную характеристики электродвигателей. Естественная характеристика соответствует основной схеме включения электродвигателя и номинальным параметрам питающего напряжения. Если двигатель включен не по основной схеме или в его электрические цепи включены дополнительные элементы, или же двигатель питается напряжением с ненормальными параметрами, то он будет иметь искусственные характеристики. Таких характеристик может быть сколько угодно; иногда их называют регулировочными.

Качественно механические характеристики электродвигателя оцениваются жесткостью  $\beta$ , определяемой как

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} \cong \frac{\Delta M}{\Delta \omega}, \quad (1.4)$$

где  $\Delta M$  — изменение электромагнитного момента на валу электродвигателя, соответствующее изменению его угловой частоты вращения  $\Delta \omega$ .

Механическую характеристику 1 синхронного двигателя (рис. 1.2) можно оценивать как абсолютно жесткую ( $\beta = \infty$ ), характеристику 4 асинхронного электродвигателя — как имеющую переменную жесткость, характеристику 2 электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения — как жесткую, характеристику 3 электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения — как мягкую.

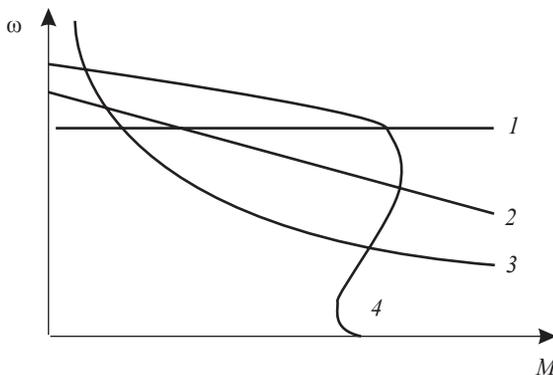


Рис. 1.2. Механические характеристики электродвигателей

## 1.2. НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Используя механические характеристики исполнительных органов рабочих машин и электродвигателей, можно выполнять проверку условия установившегося движения электропривода. Для этого в одном квадранте совмещаются характеристики электродвигателя 1 и исполнительного органа 2 (рис. 1.3).

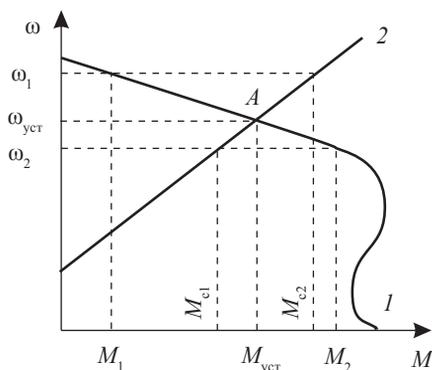


Рис. 1.3. Определение скорости установившегося движения и статической устойчивости работы электропривода

Точка *A* пересечения этих характеристик, в которой моменты двигателя и рабочей машины равны, соответствует установившемуся движению со скоростью  $\omega_{уст}$ .

В зависимости от вида механических характеристик движение может быть устойчивым или неустойчивым. Под *устойчивостью* понимают свойство системы «двигатель — рабочая машина» поддерживать движение со скоростью  $\omega_{уст}$  при возможных отклонениях от нее. Предположим, по какой-то причине скорость электропривода повысилась до  $\omega_1$ . Из характеристик видно, что при скорости  $\omega_1$  момент нагрузки  $M_{с1}$  больше момента двигателя  $M_1$ , т. е.  $M_1 < M_{с1}$ . При этом начнется процесс торможения, который завершится при скорости  $\omega_{уст}$ . При снижении скорости возникнет положительный динамический момент, и скорость будет возрастать, пока не достигнет  $\omega_{уст}$ .

Таким образом, система «двигатель — рабочая машина» с изображенными на рисунке 1.3 механическими характеристиками обладает свойством возвращаться к скорости установившегося

движения при возможных отклонениях от нее, т. е. движение в такой системе является устойчивым.

Проверка на устойчивость движения может быть выполнена аналитически, с использованием понятия жесткости характеристик. Движение устойчиво при выполнении условия

$$\beta < \beta_c, \quad (1.5)$$

где  $\beta$  и  $\beta_c$  — жесткости механических характеристик соответственно двигателя и исполнительного органа рабочей машины.

### 1.3. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В электроприводах постоянного тока используют электродвигатели с независимым (ДПТ НВ), последовательным (ДПТ ПВ) и смешанным (ДПТ СВ) возбуждением, а также с возбуждением от постоянных магнитов, которые по своим характеристикам близки к ДПТ НВ.

Электродвигатели постоянного тока применяют в регулируемом электроприводе, ДПТ ПВ и ДПТ СВ применяют в системах электростартерного пуска двигателей внутреннего сгорания, а также в электротранспорте. Двигатели малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов применяют для привода вспомогательных механизмов автомобилей и тракторов (электросососы, стеклоочистители и т. д.).

Возьмем два магнитных полюса, разместим, как показано на рисунке 1.4. Между ними равномерное магнитное поле с индукцией  $B$ . Поместим между полюсами рамку из проводникового материала шириной  $D$ , длиной  $l$ , концы которой припаяны к полюсам.

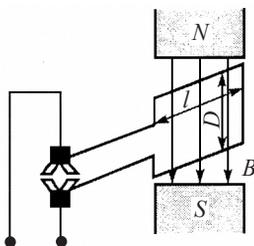


Рис. 1.4. Принцип работы двигателя постоянного тока

Для того чтобы машина работала в качестве двигателя, необходимо к рамке подвести напряжение. Напряжение вызывает ток  $I$ , А. Этот ток будет взаимодействовать с магнитным потоком, т. е. на него будет действовать сила  $f$ , Н:

$$f = BIl. \quad (1.6)$$

Эта сила создаст вращающий момент. Направление вращения, т. е. вектор приложения силы, определяют по правилу левой руки, и если бы вместо полуколец концы рамки были припаяны к кольцам, при переходе рамки с одного полюса на другой создавался бы встречный вращающий момент, и рамка не вращалась бы.

Согласно правилу левой руки, чтобы изменить направление силы, необходимо изменить или направление тока в рамке, или направление магнитного потока. Направление магнитного потока не изменяется, меняется направление тока в рамке с помощью полуколец, а в реальной машине — с помощью коллектора.

В общем случае машина постоянного тока имеет неподвижную часть — корпус и подвижную — якорь (рис. 1.5).

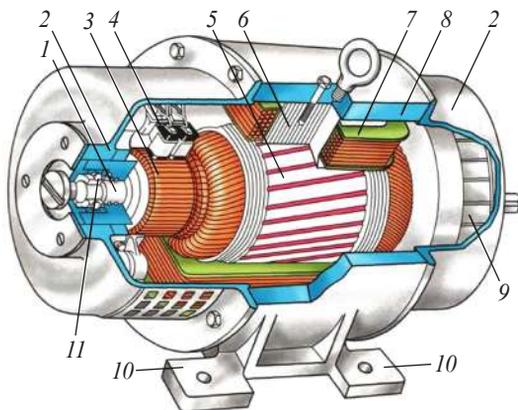


Рис. 1.5. Конструкция двигателя постоянного тока:

- 1 — вал; 2 — подшипниковые щиты; 3 — коллектор; 4 — щеточный аппарат; 5 — якорь; 6 — сердечник полюса; 7 — катушка; 8 — остов; 9 — вентилятор; 10 — лапы; 11 — подшипник

К корпусу крепят полюсы, подшипниковые щиты и лапы для крепления машины к фундаменту. Для машин большой мощности устанавливают отдельно стоящие подшипниковые щиты. Корпус машины постоянного тока является частью магнитопро-

вода, т. е. по нему идет магнитный поток, поэтому его называют еще *станиной*.

Сердечники полюсов выполняют из пластин электротехнической стали, изолированных между собой, так как при вращении якоря в наконечниках полюсов возникает пульсация магнитного потока и появляются дополнительные потери на вихревые токи и перемагничивание. Полюсы делят на главные и дополнительные. Главные предназначены для создания основного магнитного потока. Для этого на полюс устанавливают катушку из обмоточного провода, называемую *обмоткой возбуждения*.

Дополнительные полюсы предназначены для улучшения коммутации.

Якорь машины постоянного тока состоит из вала, сердечника с обмоткой, коллектора и вентилятора. Сердечник якоря, так же как и сердечник полюсов, набирают из пластин электротехнической стали и напрессовывают на вал. В сердечнике якоря выштампованы пазы, в которые укладывают обмотку якоря. Ее изготавливают из обмоточного провода. Концы секции обмоток электрически соединены с коллекторными пластинами. Место припайки обмоток к коллектору называют «петушком». Коллектор выполняют в виде цилиндра, собранного из клинообразных пластин твердотянутой меди, изолированных между собой и валом.

В зависимости от способа закрепления коллекторных пластин различают два основных типа коллекторов: со стальными конусными шайбами (крепление пластины осуществляется корпусными шайбами с изоляционными миканитовыми прокладками) и на пластмассе (крепление пластины с помощью пластмассы).

Электрический контакт коллектора с внешней цепью осуществляется щетками, находящимися в щеткодержателях. Щетки изготавливают из материалов на основе графита. Плотный и надежный контакт между щеткой и коллектором осуществляется при помощи пружин, прижимающих щетки к коллектору. Давление на щетку должно быть отрегулировано, так как чрезмерный нажим может вызвать преждевременный износ щетки, а недостаточный – искрение на коллекторе.

Вал машины устанавливают в подшипниках.

Для охлаждения применяют систему вентиляции. В машинах малой и средней мощности обычно используют вентилятор,

который крепится на валу машины и закрывается кожухом из металла.

Выводы обмоток идут в клеммную коробку, которая закреплена на станине. Подъем машины осуществляют рым-болтом, вкрученным в верхнюю часть станины.

## 1.4. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Принцип действия электродвигателей постоянного тока основан на взаимодействии токов, проходящих по проводникам якоря, с неподвижным магнитным потоком, создаваемым обмоткой возбуждения. Основная схема включения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) приведена на рисунке 1.6, где приняты следующие обозначения:  $LR$  – обмотка возбуждения;  $R_{доб}$  – добавочный резистор в цепи якоря, Ом;  $R_{рег}$  – регулировочный резистор в цепи возбуждения, Ом;  $U$  – напряжение сети, В;  $R_{я}$  – внутреннее сопротивление якорной цепи, Ом;  $I$ ,  $I_{в}$  – токи в цепях якоря и возбуждения, А;  $U_{в}$  – напряжение питания обмотки возбуждения, В;  $E$  – электродвижущая сила (ЭДС) якоря, В.

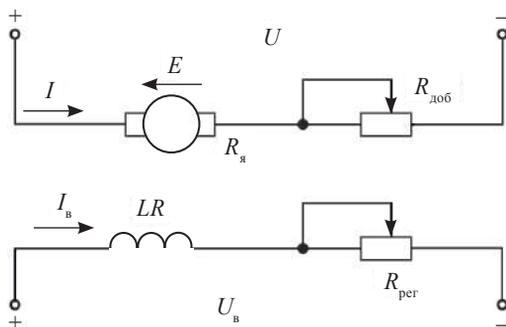


Рис. 1.6. Схема включения ДПТ НВ

Уравнения напряжения, ЭДС якоря и электромагнитного момента записывают в следующем виде:

$$U = E + IR, \quad (1.7)$$

$$E = k\Phi\omega, \quad (1.8)$$

$$M = k\Phi I, \quad (1.9)$$

где  $R = R_{\text{я}} + R_{\text{доб}}$  – полное сопротивление цепи якоря, Ом;  $k = \frac{pN}{2\pi a}$  – конструктивный коэффициент двигателя;  $p$  – число пар полюсов;  $N$  – число активных проводников обмотки якоря;  $a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря;  $\Phi$  – магнитный поток, Вб.

Подставив выражение (1.8) в уравнение (1.7), получим формулу для электромеханической характеристики  $\omega(I)$ :

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R}{k\Phi} I. \quad (1.10)$$

Формулу для механической характеристики  $\omega(M)$  ДПТ НВ получают из формулы (1.10), используя выражение (1.9):

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R}{(k\Phi)^2} M. \quad (1.11)$$

Естественная механическая характеристика, соответствующая номинальным значениям  $U = U_{\text{ном}}$ ,  $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ ,  $R_{\text{доб}} = 0$ , изображена на рисунке 1.7.

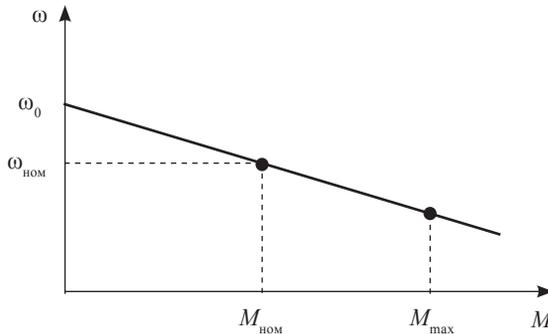


Рис. 1.7. Естественная механическая характеристика ДПТ НВ

При работе ДПТ НВ возможны следующие энергетические режимы (рис. 1.8):

- двигательный –  $M > 0$ ,  $\omega_0 > \omega > 0$  (участок I);

- идеального холостого хода —  $M = 0$ ,  $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_{ном}}$ ;
- генераторный параллельно с сетью (рекуперативного торможения) —  $M < 0$ ,  $\omega > \omega_0$  (участок II);
- короткого замыкания —  $M = M_{кз}$ ,  $\omega = 0$ ;
- генераторный последовательно с сетью (торможения противовключением) —  $M > M_{кз}$ ,  $\omega < 0$  (участок III).

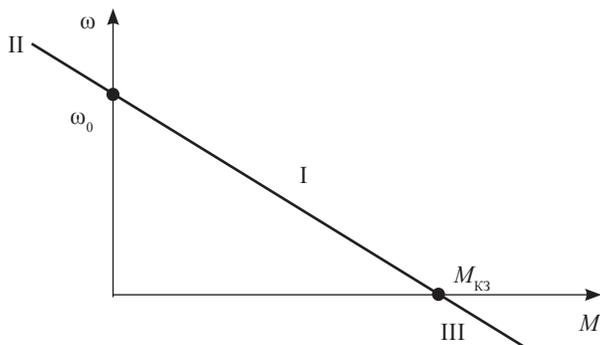


Рис. 1.8. Энергетические режимы работы ДПТ НВ

В двигательном режиме  $E < U$ , ток  $I = \frac{U - E}{R}$  совпадает по направлению с напряжением  $U$  и не совпадает с ЭДС, электрическая энергия поступает из сети, а механическая передается с вала электродвигателя исполнительному органу.

В режиме рекуперативного генераторного торможения  $\omega > \omega_0$ , поэтому  $E > U$ , ток и момент изменяют свои направления на противоположные. Двигатель преобразует механическую энергию рабочей машины в электрическую и отдает ее (рекуперировать) в сеть.

Режим короткого замыкания возникает при  $\omega = 0$  и  $E = 0$ . В этом режиме  $I = I_{кз} = \frac{U}{R}$ , электрическая энергия, поступающая из сети, рассеивается в виде теплоты в резисторах якорной цепи.

Торможение противовключением происходит при  $\omega < 0$ . ЭДС при изменении направления вращения изменяет полярность. При этом ток в якоре совпадает по направлению с напряжением и ЭДС и определяется как  $I = \frac{U + E}{R}$ . В результате этого электроэнер-

гия поступает из сети и вырабатывается самим двигателем за счет механической энергии рабочей машины, а затем рассеивается в виде теплоты на сопротивлении цепи якоря.

Схема включения ДПТ НВ в режиме динамического торможения (или автономного генератора) изображена на рисунке 1.9. Электромеханическая и механическая характеристики в этом режиме имеют соответственно следующий вид:

$$\omega = -\frac{(R_{\text{я}} + R_{\text{д.т}}) I}{k\Phi}; \quad \omega = -\frac{(R_{\text{я}} + R_{\text{д.т}}) M}{(k\Phi)^2}.$$

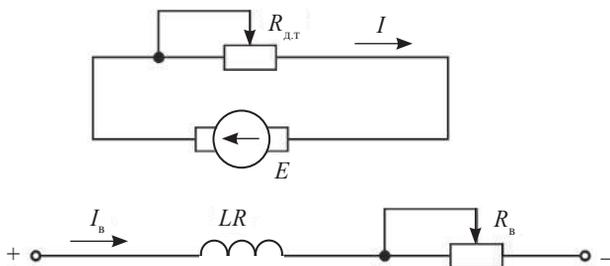


Рис. 1.9. Схема включения ДПТ НВ в режиме динамического торможения

Механические характеристики ДПТ НВ при двух различных сопротивлениях резисторов динамического торможения показаны на рисунке 1.10. В режиме динамического торможения двигатель работает как генератор независимо от сети. Ток в якоря совпадает по направлению с ЭДС, механическая энергия рабочей машины преобразуется в электрическую и рассеивается в виде теплоты на резисторах якорной цепи.

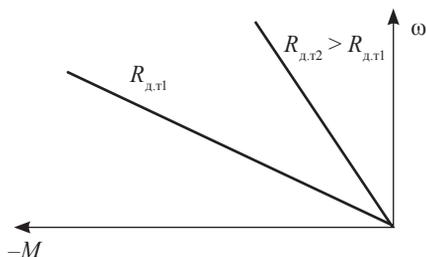


Рис. 1.10. Механические характеристики ДПТ НВ в режиме динамического торможения

Регулирование скорости ДПТ НВ можно осуществить путем изменений сопротивления цепи якоря, напряжения питания цепи якоря и магнитного потока. На рисунке 1.11 показаны искусственные механические характеристики ДПТ НВ, полученные при введении в цепь якоря добавочных резисторов. Этот способ прост и не требует больших затрат, но применяется при невысоких требованиях к показателям качества регулирования скорости. Из формулы (1.11) следует, что скорость идеального холостого хода  $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_{ном}}$  не зависит от  $R_{доб}$ , а наклон характеристик тем больше, чем больше  $R_{доб}$ . Диапазон регулирования скорости не превышает 3:1. Данный способ неэкономичен и применяется при кратковременной работе на пониженных скоростях.

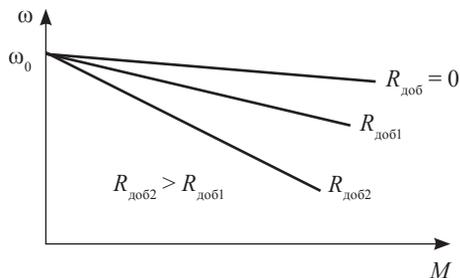


Рис. 1.11. Семейство механических характеристик ДПТ НВ при регулировании скорости с помощью добавочных резисторов в цепи якоря

Регулирование скорости ДПТ НВ изменением напряжения питания якоря используют при высоких требованиях к показателям качества регулирования. Якорь электродвигателя при этом способе регулирования питается от преобразователя, выходное напряжение которого регулируется и при необходимости может изменяться по полярности. Схема электропривода при питании двигателя от регулируемого выпрямителя показана на рисунке 1.12, где УВ — управляемый выпрямитель (преобразователь) с внутренним сопротивлением  $R_{УВ}$  и коэффициентом усиления

$$k_{УВ} = \frac{E_{УВ}}{U_{упр}};$$

$U_{упр}$  — входной сигнал управления;  $E_{УВ}$  — ЭДС УВ;  $I_я$  — ток якоря ДПТ НВ.

На выходе независимого возбуждения напряжение

$$U = E_{yB} - IR_{yB}. \quad (1.12)$$

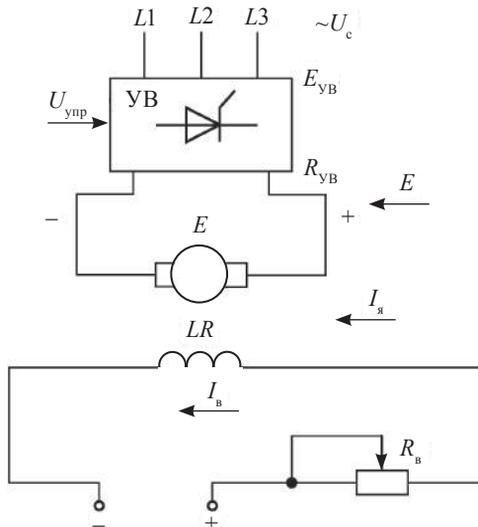


Рис. 1.12. Схема ДПТ НВ при регулировании напряжения якоря

Обмотка возбуждения ДПТ НВ питается от идеального источника постоянного тока. Формулы электромеханической и механической характеристик получим соответственно из формул (1.10) и (1.11) подстановкой в них выражения (1.12):

$$\omega = \frac{E_{yB}}{k\Phi} - \frac{I(R_{я} + R_{yB})}{k\Phi}; \quad (1.13)$$

$$\omega = \frac{E_{yB}}{k\Phi} - \frac{M(R_{я} + R_{yB})}{(k\Phi)^2}. \quad (1.14)$$

Из формул (1.13) и (1.14) видно, что при изменении  $E_{yB}$  пропорционально изменяется скорость идеального холостого хода  $\omega_0$ , а искусственные характеристики 2–4 (рис. 1.13), оставаясь линейными и параллельными между собой, имеют по сравнению с естественной характеристикой  $I$  больший наклон из-за влияния внутреннего сопротивления  $R_{yB}$  источника питания.

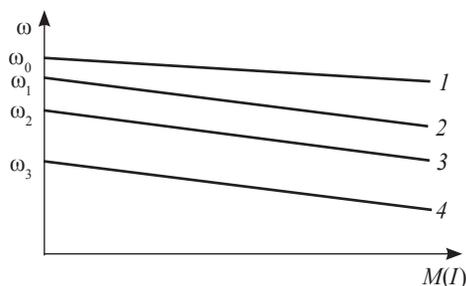


Рис. 1.13. Механические характеристики ДПТ НВ при регулировании напряжения якоря:

1 — при  $U < U_{\text{ном}}$ ; 2 — при  $U_1 < U_{\text{ном}}$ ; 3 — при  $U_2 < U_1$ ; 4 — при  $U_3 < U_2$

Основным типом преобразователей, применяемых в регулируемых электроприводах постоянного тока, являются полупроводниковые статические преобразователи, чаще всего тиристорные. Рассмотрим принцип действия и характеристики системы «тиристорный преобразователь — двигатель» (ТП — Д) на примере однофазного нереверсивного выпрямителя, выполненного по нулевой схеме (рис. 1.14). Преобразователь состоит из согласующего трансформатора  $TV$ , первичная обмотка которого подключена к сети напряжением  $U_c$ , двух тиристоров ( $VS1$  и  $VS2$ ), дросселя  $L$  и системы импульсно-фазового управления тиристорами (СИФУ). Регулирование напряжения на якоре электродвигателя происходит за счет изменения среднего значения ЭДС преобразователя  $E_{\text{ув}}$  с помощью СИФУ. При изменении управляющего напряжения  $U_{\text{упр}}$  на входе системы управления изменяется угол открывания тиристоров ( $\alpha$ ), который представляет собой угол задержки открытия тиристоров  $VS1$  и  $VS2$  относительно момента, когда напряжение на их анодах становится положительным. Обмотка возбуждения питается от отдельно взятого выпрямителя В.

Когда  $\alpha = 0$ , к якорию электродвигателя прикладывается полное напряжение. Если с помощью СИФУ подавать импульсы управления на управляющие электроды тиристоров с задержкой на угол  $\alpha \neq 0$ , то ЭДС преобразователя уменьшится и к якорию ДПТ будет подводиться меньшее среднее напряжение.

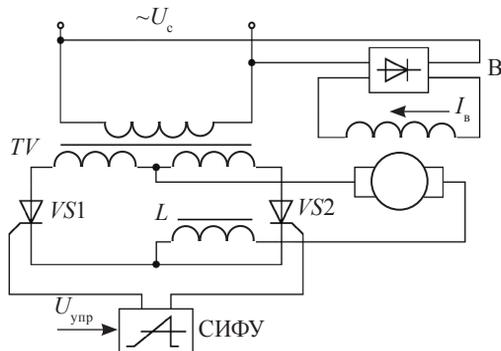


Рис. 1.14. Схема системы «тиристорный преобразователь – двигатель»

Зависимость среднего значения ЭДС многофазного тиристорного выпрямителя от угла управления тиристорами определяют по формуле

$$E_{\text{cp}} = E_{\text{max}} m \sin \frac{\pi}{m} \cos \frac{\alpha}{\pi} = E_0 \cos \alpha, \quad (1.15)$$

где  $E_{\text{max}}$  – амплитудное значение ЭДС преобразователя;  $m$  – число фаз;  $E_0$  – ЭДС преобразователя при  $\alpha = 0$ .

Дроссель  $L$  включается в цепь якоря ДПТ для сглаживания пульсаций тока якоря, так как ЭДС преобразователя имеет пульсирующий характер.

При питании якоря электродвигателя от трехфазного мостового выпрямителя пульсации существенно снижаются, а применения согласующего трансформатора не требуется.

Уравнения электромеханической и механической характеристик ДПТ НВ, питаемого от тиристорного преобразователя, имеют соответственно вид:

$$\omega = \frac{E_0 \cos \alpha}{k\Phi} - \frac{I(R_{\text{я}} + R_{\text{yB}})}{k\Phi};$$

$$\omega = \frac{E_0 \cos \alpha}{k\Phi} - \frac{M(R_{\text{я}} + R_{\text{yB}})}{(k\Phi)^2},$$

где  $R_{\text{yB}} = \frac{x_{\text{т}} m}{2\pi} + R_{\text{т}} + R_{\text{л}}$  – эквивалентное сопротивление преобразователя;  $x_{\text{т}}$ ,  $R_{\text{т}}$  – приведенные ко вторичной обмотке соответ-

ственно индуктивное сопротивление рассеяния и активное сопротивление обмоток трансформатора;  $R_L$  — активное сопротивление сглаживающего дросселя.

Механические характеристики ДПТ при питании его якоря от тиристорного преобразователя содержат нелинейные участки (рис. 1.15). Жесткость характеристик на этих участках уменьшается из-за режима прерывистых токов.

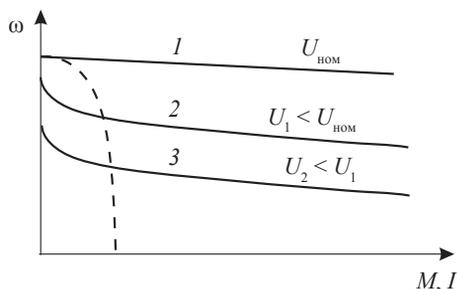


Рис. 1.15. Характеристики ДПТ НВ при питании якоря от управляемого выпрямителя

Достоинства системы ТП–Д: плавность регулирования скорости в большом диапазоне, высокий КПД электропривода, жесткость искусственных характеристик, простота эксплуатации.

К недостаткам следует отнести пульсирующий характер напряжения на якоре, наличие режимов прерывистых токов, снижение коэффициента мощности  $\cos \varphi$  с ростом диапазона регулирования ( $\cos \varphi \approx \cos \alpha$ ). Кроме того, тиристорный электропривод искажает форму тока и напряжение питающей сети, что ухудшает работу других электроприемников. Несмотря на указанные недостатки, система ТП–Д является основной для регулирования электропривода постоянного тока.

Регулирование скорости ДПТ НВ путем изменения магнитного потока экономично, так как осуществляется в маломощной цепи обмотки возбуждения (ОВ). Магнитный поток уменьшается по сравнению с номинальным за счет снижения силы тока возбуждения. Для регулирования силы тока в цепь ОВ включают дополнительный резистор  $R_b$  (рис. 1.16, а) или уменьшают напряжение питания с помощью управляемого выпрямителя (рис. 1.16, б).

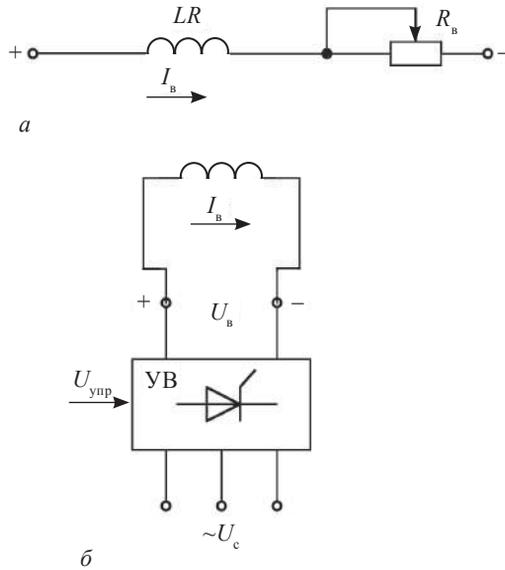


Рис. 1.16. Схемы регулирования тока возбуждения ДПТ НВ:  
*a* – включением в цепь обмотки возбуждения резистора; *б* – с УВ

Уменьшение магнитного потока приводит к увеличению скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ . Ток короткого замыкания  $I_{КЗ} = U / R_{я}$  от магнитного потока не зависит, а момент короткого замыкания при уменьшении магнитного потока будет снижаться. В результате электромеханические и механические характеристики имеют вид прямых (рис. 1.17).

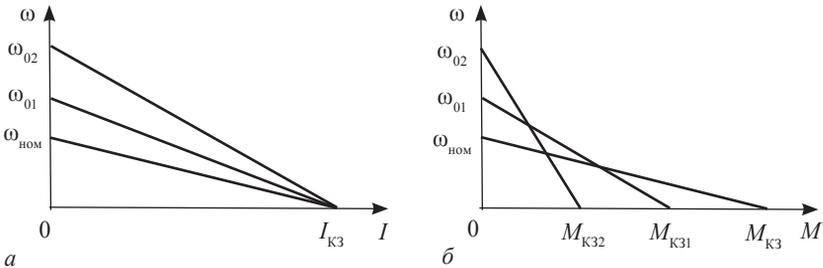


Рис. 1.17. Характеристики ДПТ НВ при ослаблении магнитного потока:  
*a* – электромеханические; *б* – механические

Диапазон регулирования скорости равен 4:1. Направление регулирования — вверх от естественной характеристики. Стабильность скорости снижается при уменьшении магнитного потока. Момент при уменьшении нагрузки снижается, но двигатель может быть номинально загружен. Это объясняется тем, что снижение момента при ослаблении магнитного потока сопровождается одновременным увеличением скорости, а механическая мощность остается постоянной. Таким образом, в случае работы ДПТ при искусственных характеристиках обеспечивается его полная загрузка.

Регулирование скорости ДПТ НВ в системе «источник тока — двигатель» (ИТ–Д) позволяет получать механические характеристики электропривода, обеспечивающие постоянный момент или постоянное натяжение на исполнительном органе рабочей машины.

Если источник питания якоря ДПТ НВ имеет свойства источника напряжения, т. е. источника с малым внутренним сопротивлением, в этом случае падение напряжения на таком источнике невелико, благодаря чему подаваемое на якорь напряжение также мало изменяется. Вольт-амперная характеристика идеального источника напряжения представляет собой горизонтальную линию (линия 1 на рис. 1.18). Преобразователи со свойствами источника тока характеризуются тем, что поддерживают в нагрузке мало изменяющийся (в идеале — неизменный) ток, не зависящий от сопротивления самой нагрузки (вертикальная линия 2).

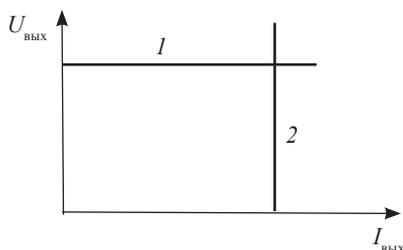


Рис. 1.18. Внешние характеристики идеальных источников напряжения и тока

Схема системы ИТ–Д показана на рисунке 1.19. Якорь двигателя подключен к источнику тока, а обмотка возбуждения питается от источника напряжения.

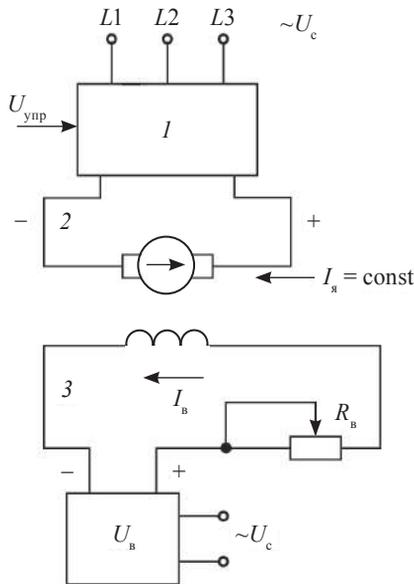


Рис. 1.19. Схемы системы ИТ–Д:

1 – источник тока; 2 – якорь; 3 – источник напряжения

Поскольку ток якоря  $I = \text{const}$ , электромеханическая характеристика электродвигателя будет иметь вид вертикальной прямой линии (рис. 1.20, а). При  $I = \text{const}$  момент двигателя определяется величиной магнитного потока  $\Phi$ , поэтому при различных значениях  $\Phi$  получают механические характеристики в виде прямых (рис. 1.20, б). Такие характеристики обеспечивают постоянство момента на валу электродвигателя при любой его скорости, причем момент можно изменять по цепи возбуждения.

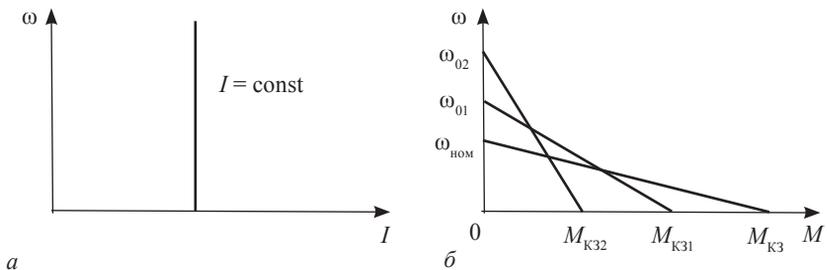


Рис. 1.20. Характеристики системы ИТ–Д:  
а – электромеханическая; б – механические

Импульсное регулирование скорости электропривода с ДПТ НВ получило распространение благодаря развитию силовой полупроводниковой техники. Этот способ позволяет регулировать скорость ДПТ НВ при питании его от неуправляемого источника постоянного тока (аккумуляторной батареи, нерегулируемого выпрямителя). Регулирование скорости осуществляется импульсным изменением напряжения, магнитного потока или сопротивления резистора в якорной цепи. Наиболее часто в качестве изменяемого параметра используют напряжение, подаваемое на якорь двигателя. В момент подключения якоря ДПТ к источнику питания с помощью управляемого ключа двигатель разгоняется, а во время отключения (паузы) тормозится.

Ключом  $I$  (рис. 1.21) якорь периодически подключается к источнику питания. При разомкнутом ключе под действием ЭДС самоиндукции, замыкаясь через диод  $VD$ , через якорь проходит пульсирующий ток. Работа ключа характеризуется коэффициентом заполнения  $\gamma$ , определенным отношением времени замкнутого состояния ключа  $t_3$  к периоду коммутации  $T_k$ :

$$\gamma = \frac{t_3}{T_k} = \frac{t_3}{t_3 + t_0}, \quad (1.16)$$

где  $t_0$  — время разомкнутого состояния ключа.

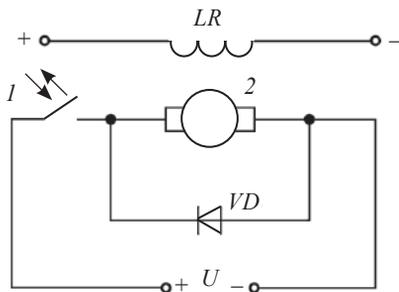


Рис. 1.21. Схема включения ДПТ НВ при импульсном регулировании скорости:

$I$  — ключ;  $2$  — якорь

Импульсное регулирование, при котором напряжение источника не изменяется, а изменяется коэффициент заполнения  $\gamma$  при постоянном периоде, называют широтно-импульсным. Регулируя коэффициент заполнения ключа, можно получать различные механические характеристики двигателя.

При  $\gamma = 1$  на якорь ДПТ постоянно подается напряжение источника питания, и двигатель работает на естественной характеристике 1 (рис. 1.22). Промежуточным значениям коэффициента заполнения  $0 < \gamma < 1$  соответствуют искусственные механические характеристики 2. При импульсном регулировании возможен режим прерывистых токов (при малых нагрузках); при этом существует область криволинейных характеристик (показана штриховой линией). В остальной области характеристики линейны и описываются выражением

$$\omega = \frac{\gamma U_c}{k\Phi} - \frac{MR_{я}}{(k\Phi)^2}.$$

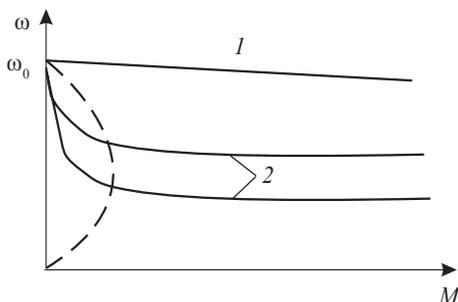


Рис. 1.22. Механические характеристики ДПТ НВ при импульсном регулировании скорости

В схемах импульсного регулирования электроприводов применяются транзисторные и тиристорные ключи.

Импульсный электропривод прост по исполнению, обладает высоким быстродействием и надежностью, но его энергетические показатели ниже по сравнению с показателями привода непрерывного регулирования. Это объясняется наличием в кривой тока якоря переменной составляющей, что приводит к дополнительным потерям энергии в двигателе. Электроприводы с импульсным управлением целесообразно применять при их питании от источников постоянного тока.

## 1.5. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В электроприводах электрического транспорта, некоторых подъемно-транспортных машин и в системах пуска двигателя внутреннего сгорания применяют ДПТ ПВ, основная схема включения которых приведена на рисунке 1.23. Поскольку обмотка якоря включена последовательно с обмоткой возбуждения, ток якоря одновременно является и током возбуждения.

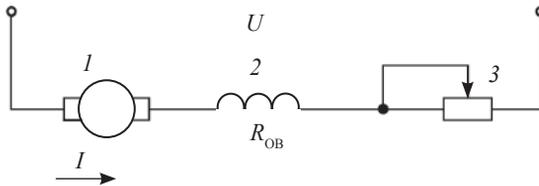


Рис. 1.23. Схема включения ДПТ ПВ:

1 – якорь; 2 – обмотка возбуждения; 3 – добавочный резистор

Электромеханическая и механическая характеристики двигателя выражаются соответственно следующими формулами:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{(R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{доб}})}{k\Phi(I)}, \quad (1.17)$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{(R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{доб}})}{k^2\Phi^2(I)} M. \quad (1.18)$$

Магнитный поток и ток связаны между собой кривой намагничивания  $\Phi(I)$  (рис. 1.24). При условии, что магнитная система двигателя не насыщена, кривую намагничивания можно аппроксимировать прямой  $\Phi = \alpha I$ . В этом случае зависимость магнитного потока от тока можно выразить следующим образом:

$$\Phi = \alpha I, \quad (1.19)$$

где  $\alpha = \text{tg } \varphi$ .

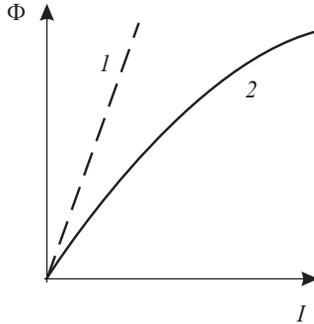


Рис. 1.24. Кривая намагничивания ДПТ ПВ

Момент при такой аппроксимации является квадратичной функцией тока:

$$M = k\Phi I = k\alpha I^2. \quad (1.20)$$

При подстановке соотношения (1.20) в (1.17) уравнения электромеханической и механической характеристик ДПТ ПВ будут иметь вид, соответственно,

$$\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R}{k\alpha}; \quad \omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R}{k\alpha}.$$

Графические зависимости  $\omega(I)$  и  $\omega(M)$  имеют гиперболический характер (рис. 1.25).

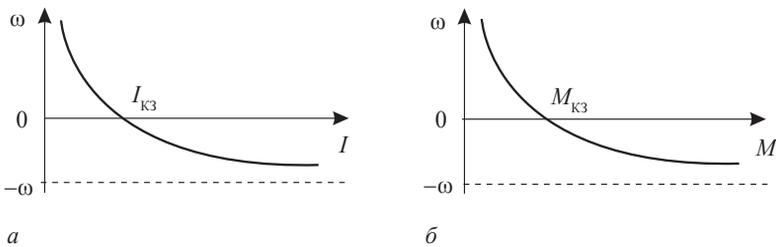


Рис. 1.25. Характеристики ДПТ ПВ:  
*a* – электромеханическая; *б* – механическая

При  $I \rightarrow 0$  и  $M \rightarrow 0$  угловая скорость вращения  $\omega \rightarrow \infty$ . Это означает, что ось скорости  $\omega$  является первой (вертикальной) асимптотой характеристик. При  $I \rightarrow \infty$  и  $M \rightarrow \infty$   $\omega \rightarrow -R / (k\alpha)$ , т. е. прямая с ординатой  $\omega_a = -R / (k\alpha)$  является второй (горизонтальной) асимптотой характеристик.

Таким образом, в основной схеме включения ДПТ ПВ не существуют режимы холостого хода и рекуперативного торможения. Это объясняется тем, что при  $I, M \rightarrow 0$  магнитный поток  $\Phi \rightarrow 0$ , а  $E \rightarrow U$ , т. е. при любой скорости ЭДС больше напряжения, вследствие чего отдача энергии в сеть происходить не может. Следует отметить, что из-за наличия в двигателе остаточного намагничивания  $\Phi_{\text{ост}}$  практически скорость холостого хода существует:  $\omega_0 = U / (k\Phi_{\text{ост}})$ . Остальные режимы ДПТ ПВ аналогичны режимам ДПТ НВ.

Двигательный режим имеет место при  $0 < \omega < \infty$ , режим короткого замыкания – при  $\omega = 0$ , а торможение противовключением имеет место в четвертом квадранте при  $\omega > 0$ .

Выпускаемые промышленностью электродвигатели работают в области насыщения магнитной системы, поэтому выражения (1.17), (1.18), полученные при условии линейной аппроксимации кривой намагничивания (см. рис. 1.24), дают большие погрешности при расчетах. Для точных практических расчетов используют так называемые универсальные характеристики ДПТ ПВ (рис. 1.26). Они представляют собой зависимости относительной скорости  $\omega^* = \omega / \omega_{\text{ном}}$  (кривые 1), относительного момента  $M^* = M / M_{\text{ном}}$  (кривая 2) и относительного тока  $I^* = I / I_{\text{ном}}$ .

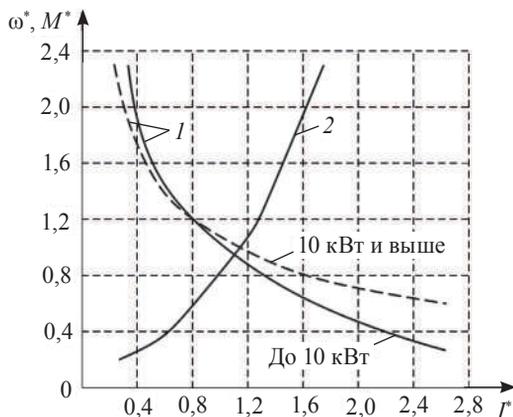


Рис. 1.26. Универсальные характеристики ДПТ ПВ

Регулирование скорости ДПТ ПВ в соответствии с выражениями (1.17) и (1.18) может осуществляться с помощью добавоч-

ных резисторов в цепи якоря и магнитного потока, изменением питающего напряжения.

Динамическое торможение ДПТ ПВ может быть осуществлено с независимым возбуждением и самовозбуждением. Динамическое торможение с независимым возбуждением реализуется по схеме, приведенной на рисунке 1.9. Динамическое торможение с самовозбуждением (рис. 1.27) осуществляется при последовательном соединении обмотки якоря, обмотки возбуждения и добавочного резистора (резистор может отсутствовать).

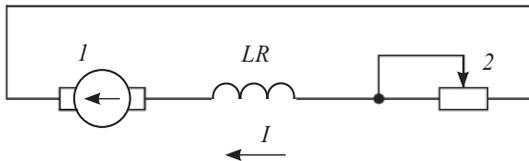


Рис. 1.27. Схема динамического торможения ДПТ ПВ с самовозбуждением:  
1 – якорь; 2 – добавочный резистор

Для возникновения режима самовозбуждения необходимо наличие в двигателе остаточного магнитного потока  $\Phi_{ост}$ . При вращении якоря в остаточном магнитном поле в его обмотке наводится ЭДС, под действием которой по якорю и обмотке возбуждения начинает проходить ток. Он создает основной магнитный поток  $\Phi$ , который, совпадая по направлению с  $\Phi_{ост}$ , приводит к увеличению ЭДС. В результате этого сила тока увеличивается. Такой процесс самовозбуждения будет продолжаться до тех пор, пока ЭДС не станет равной суммарному падению напряжения в цепи якоря. Характеристики ДПТ ПВ в этом режиме показаны на рисунке 1.28.

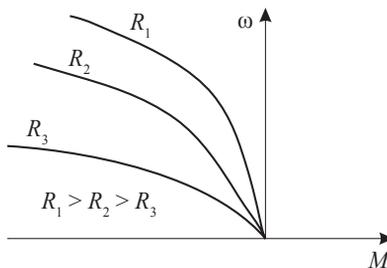


Рис. 1.28. Механические характеристики ДПТ ПВ при торможении с самовозбуждением

Торможение противовключением осуществляется изменением направления тока в обмотке возбуждения или в якоре. При этом меняется знак момента двигателя. Для ограничения силы тока в этом режиме в цепь двигателя вводится резистор (рис. 1.29).

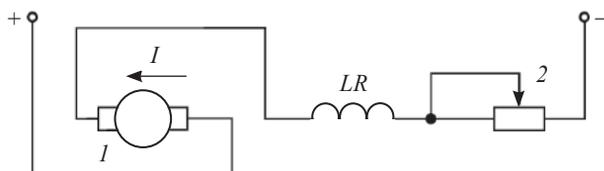


Рис. 1.29. Схема торможения ДПТ ПВ противовключением:  
 $I$  – якорь;  $2$  – добавочный резистор

До торможения двигатель работает в точке  $a$  на характеристике  $1$ , преодолевая момент сопротивления  $M_c$  (рис. 1.30). После изменения направления тока в якоре и ввода дополнительного резистора двигатель переходит в режим торможения противовключением; этому процессу соответствует участок  $bc$  характеристики  $2$ .

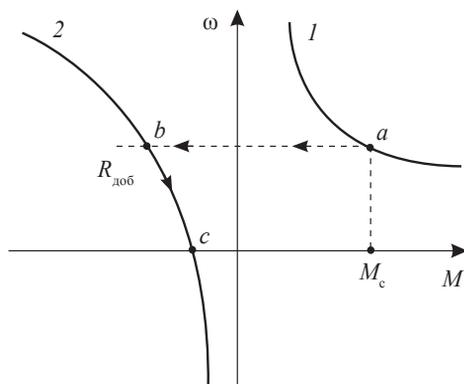


Рис. 1.30. Механические характеристики ДПТ ПВ при торможении противовключением

Торможение противовключением возникает также в том случае, если двигатель нагружен активным моментом  $M_c$ , превышающим момент короткого замыкания  $M_{кз}$ .

## 1.6. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДПТ СВ ПОСТОЯННОГО ТОКА СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Электропривод с ДПТ СВ имеет две обмотки: параллельную и последовательную (рис. 1.31). Вследствие этого магнитный поток двигателя состоит из потока, создаваемого параллельной обмоткой, и потока, создаваемого последовательной обмоткой. Зависимость этих потоков и суммарного потока от силы тока показана на рисунке 1.32 в виде штриховых линий 2 и сплошной линии 1. При силе тока якоря, стремящейся к  $-I_1$ , магнитный поток стремится к нулю и двигатель размагничивается.

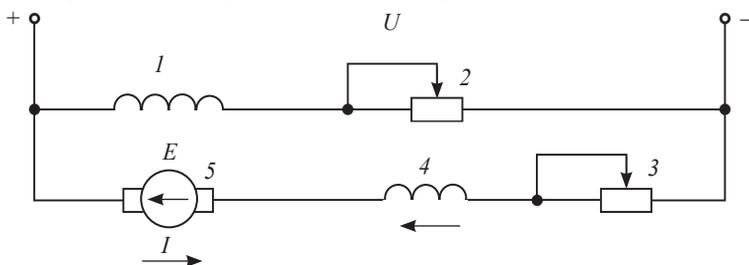


Рис. 1.31. Схема включения ДПТ СВ:

1 – параллельная обмотка возбуждения; 2 – регулировочный резистор; 3 – добавочный резистор; 4 – последовательная обмотка возбуждения; 5 – якорь

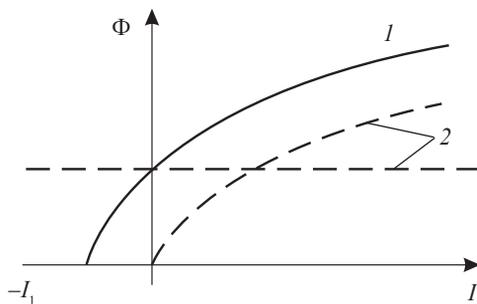


Рис. 1.32. Характеристики ДПТ СВ

Регулирование координат электропривода с ДПТ СВ может осуществляться изменением напряжения, магнитного потока и сопротивления добавочного резистора в цепи якоря. Двигатель обеспечивает режимы динамического торможения, торможения

противовключением и рекуперативного торможения. Наличие двух обмоток возбуждения существенно увеличивает расход материалов, габариты, массу и стоимость двигателя, что обуславливает его применение только при специфических требованиях к рабочей машине. Например, в электростартерах систем пуска тяжелых автомобилей используются электродвигатели смешанного возбуждения, что позволяет уменьшать частоту вращения якоря в режиме холостого хода.

## **1.7. ЭЛЕКТРОПРИВОД С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Общепромышленные трехфазные асинхронные двигатели (АД) применяются в станкостроении, деревообрабатывающей промышленности, сельском хозяйстве, строительной технике, системах промышленной вентиляции, на транспортерах, подъемниках, при комплектации промышленных насосов и иного насосного оборудования, в холодильных и вакуумных установках. Существует множество типов электрических двигателей: общепромышленные (АИР, А, 4А и т. д.), взрывозащищенные (ВР, ВА и т. д.), крановые (МТФ, МТН, МТКН и т. д.) и др.

Широкое распространение во всех отраслях народного хозяйства получили трехфазные асинхронные электродвигатели АИР (также называемые 4А, 4АМ) с короткозамкнутым ротором. Электродвигатель АИР имеет простую конструкцию, высокую ремонтпригодность и невысокую цену, поэтому он и востребован на рынке. Его используют для привода вентиляционного, насосного и компрессорного оборудования, станков, эскалаторов и многих других машин. Коэффициент полезного действия таких машин средней и малой мощности не превышает 87 %.

Трехфазные асинхронные двигатели INNOVARI MB – серия АД с короткозамкнутым ротором со встроенным устройством торможения вала двигателя. Электродвигатели предназначены для питания от трехфазной сети напряжения 230/400 В, 50 Гц, продолжительного (S1) и повторно-кратковременного (S4) режима работы при классе нагревостойкости изоляции F (фактическая температура до 155 °С).

В основном трехфазные асинхронные двигатели INNOVARI с тормозом предназначены для применения в промышленных

электрических приводах малой и средней мощности. Спектр применения: устройства промышленной автоматики, манипуляторы, транспортировочные устройства и конвейеры, лифты, краны, тельферы и подъемники – везде, где необходим быстрый останов или удержание вала двигателя в неподвижном состоянии при приложении внешних сил.

Преимущества применения трехфазных АД с короткозамкнутым ротором INNOVARI с тормозом:

- высокое качество изготовления и надежность в эксплуатации;
- удобное присоединение к редуктору и электрический монтаж;
- возможность работы от преобразователя частоты.

Импортные электродвигатели серии АИС изготавливают по немецким стандартам DIN. Электродвигатели АИР соответствуют российскому стандарту ГОСТ и при одинаковой с АИС частоте вращения отличаются от них меньшими размерами и большей мощностью (на 1–2 шага).

Взрывозащищенные трехфазные АД с короткозамкнутым ротором серии ВА предназначены для внутренних и наружных установок, применяемых на взрывоопасных видах производств химической, газовой, нефтеперерабатывающей и смежных отраслях промышленности. Двигатели серии ВА предназначены для работы от сети переменного тока частоты 50 Гц. Двигатели могут быть изготовлены на напряжение 380 или 660 В.

Крановые электродвигатели серий МТФ, МТН, ДМТФ, 4МТН, МТКФ, МТКН, ДМТКФ, а также крановые двигатели других серий предназначены для работы в электроприводах металлургических агрегатов и подъемно-транспортных механизмах всех видов и поставляются на комплектацию башенных, козловых, порталных, мостовых и других кранов.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором типов 5А, 5АМ в чугунном корпусе, 5АМХ в корпусе из алюминиевого сплава производят в Российской Федерации. Присоединительные размеры электродвигателей 5АМХ, 5А и 5АМ совпадают с размерами электродвигателей АИР, габаритные размеры могут отличаться.

### **1.7.1. Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя**

Асинхронный двигатель состоит из статора и ротора, который вращается на подшипниках, установленных в щитах (рис. 1,

вклейка). Магнитопроводы статора и ротора набирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35–0,50 мм. Пакет листов статора устанавливают в чугунном или алюминиевом корпусе, пакет листов ротора закрепляют на стальном валу. В пазы магнитопроводов статора и ротора укладывают обмотки.

Статор трехфазного АД содержит три обмотки (на каждую фазу по одной). Оси обмоток сдвинуты в пространстве на  $120^\circ$  относительно друг друга. Обмотка ротора может быть короткозамкнутой или трехфазной, как и статорная. Короткозамкнутую обмотку выполняют из алюминиевых стержней, концы которых замкнуты кольцами по краям пакета магнитопровода (рис. 2, а, вклейка).

Обмотка фазного ротора (рис. 2, б, вклейка) выполняется изолированным проводом, уложенным в пазы магнитопровода. Обмотки соединяются в звезду, а выводы подводятся к контактным кольцам, изолированным друг от друга и от вала. Принцип действия АД основан на электромагнитном взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с токами, наведенными этим полем в проводниках ротора (короткозамкнутого или фазного).

Наведение ЭДС в обмотке ротора возможно только при неравенстве частот вращения ротора  $n$  и магнитного поля статора  $n_0$ . Неравенство  $n_0$  и  $n$  является обязательным для создания электромагнитного момента АД. Характеристикой этого неравенства является скольжение  $s$ :

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (1.21)$$

где  $n_0 = 60f/p$  – частота вращения магнитного поля статора,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $f$  – частота напряжения питания, Гц;  $p$  – число пар полюсов статора.

Таким образом, ротор всегда вращается медленнее, чем магнитное поле статора. Отсюда и название «асинхронный электродвигатель». При отсутствии нагрузки на валу частота вращения  $n$  стремится к  $n_0$ , но никогда не достигает ее. Это объясняется тем, что при  $n_0 = n$  проводники ротора не пересекают поле и электромагнитный момент  $M = 0$ .

В паспорте электродвигателя указана частота вращения вала при номинальной (паспортной) мощности. При перегрузке двигателя частота вращения ротора уменьшается, а ток возрастает.

Статоры АД изготавливают с 2, 4, 6, 8, 10 и 12 полюсами и при частоте напряжения питания 50 Гц частоты вращения магнитного поля статора соответственно составляют 3000, 1500, 1000, 750, 600 и 500 мин<sup>-1</sup>.

### **1.7.2. Включение асинхронных двигателей в сеть**

В настоящее время встречаются две основные системы обозначения выводов обмоток электродвигателей:

- система в соответствии с ГОСТ 183–74, применяется на электродвигателях, разработанных до 1987 г.;
- система в соответствии с ГОСТ 26772–85, которая соответствует международным стандартам.

В соответствии с первой системой при соединении обмоток статора трехфазных машин переменного тока звездой приняты следующие обозначения начала обмоток: первая фаза – С1, вторая – С2, третья – С3. При шести выводах начало обмотки первой фазы – С1, второй – С2, третьей – С3; конец обмотки первой фазы – С4, второй – С5, третьей – С6.

У трехфазных АД с фазным ротором роторная обмотка первой фазы – Р1, второй – Р2, третьей – Р3. У многоскоростных АД выводы обмоток для четырех полюсов – 4С1, 4С2, 4С3; для 8 полюсов – 8С1, 8С2, 8С3 и т. п.

У однофазных АД начало главной обмотки – С1, конец – С2; начало пусковой обмотки – П1, конец – П2.

В соответствии с международными стандартами выводы обозначают латинскими буквами: первая фаза обмотки статора – U, вторая – V, третья – W. Начало и конец фазы обозначают цифрами: 1 и 2.

Фазные обмотки статора электродвигателя соединяются звездой или треугольником в зависимости от напряжения сети. Если в паспорте электродвигателя указано, что обмотки выполнены на напряжение 230/400 В, то при включении его в сеть с линейным напряжением 230 В обмотки соединяют треугольником, а при включении в сеть 400 В – звездой (рис. 1.33).

Статорная обмотка двигателя с фазным ротором включается так же, как и у короткозамкнутого электродвигателя. Обмотка ротора соединяется в звезду, а ее концы подключаются к контактными кольцам, изолированным друг от друга и от вала. По кольцам скользят медно-графитовые щетки, с помощью которых в цепь обмотки ротора вводятся дополнительные резисторы (рис. 1.34).

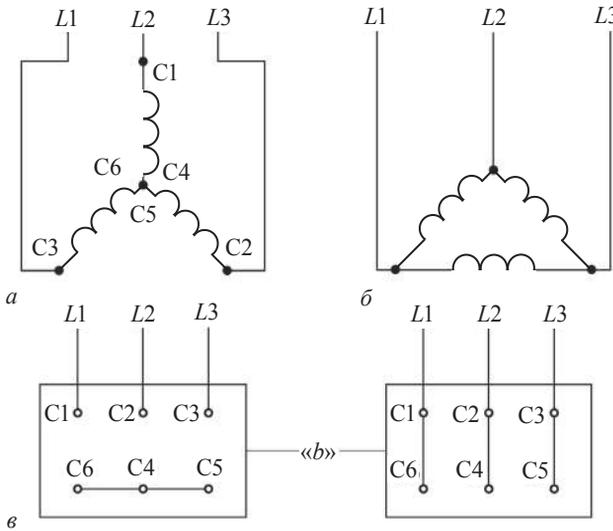


Рис. 1.33. Схемы соединения обмоток статора трехфазного АД:  
*a* – в звезду; *б* – в треугольник; *в* – в звезду  
и треугольник на клеммном щитке электродвигателя

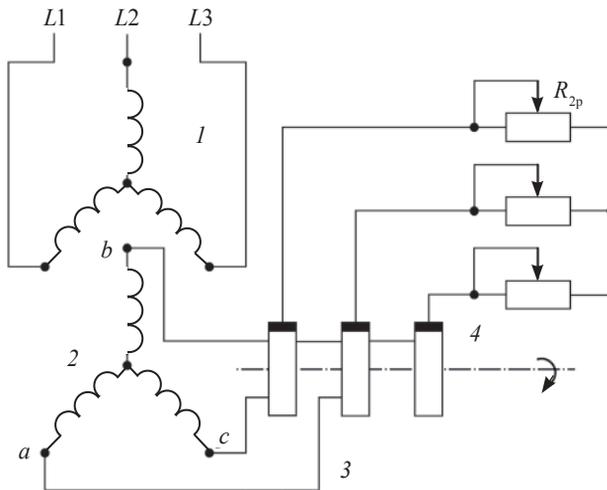


Рис. 1.34. Схема включения АД с фазным ротором:  
*1* – обмотка статора; *2* – обмотка ротора;  
*3* – контактные кольца; *4* – щетки;  $R_{2p}$  – резисторы

Для изменения направления вращения вала АД необходимо изменить направление вращения магнитного поля статора. Для этого достаточно поменять местами два любых провода, соединяющих обмотку статора с питающей сетью.

### 1.7.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Электромагнитный момент  $M$  АД пропорционален основному магнитному потоку  $\Phi$  и активной составляющей тока ротора  $I_2 \cos \varphi_2$ :

$$M = k\Phi I_2 \cos \varphi_2, \quad (1.22)$$

где  $k$  – конструктивный коэффициент;  $\Phi$  – магнитный поток;  $I_2$  – ток ротора.

Конструктивный коэффициент  $k$  определяют числом фаз, полюсов и витков в обмотках статора и ротора, основной магнитный поток  $\Phi$  – напряжением питания, практически он не зависит от скольжения  $s$ . Ток ротора  $I_2$  с увеличением  $s$  растет, так как увеличивается частота пересечения проводников ротора магнитным полем статора, а значит, и наводимая в роторе ЭДС:

$$I_2 = \frac{E_{2\text{неп}}}{\sqrt{X_{2\text{неп}}^2 + \left(\frac{R_2}{s}\right)^2}}, \quad (1.23)$$

где  $E_{2\text{неп}}$  – фазная ЭДС неподвижного ротора;  $X_{2\text{неп}}$  – индуктивное сопротивление неподвижного ротора;  $R_2$  – активное сопротивление ротора.

Сдвиг по фазе между ЭДС и током ротора  $\varphi_2$  с увеличением  $s$  также растет из-за увеличения частоты тока в роторе и индуктивного сопротивления обмоток:

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2\text{неп}})^2}}. \quad (1.24)$$

Зависимость электромагнитного момента от скольжения представлена на рисунке 1.35. Критическое скольжение  $s_{\text{кр}}$ , соответствующее максимальному моменту  $M_{\text{кр}}$ , определяют выражением

$$s_{\text{кр}} = \frac{R_2}{X_{\text{экр}}},$$

где  $R_2$  – активное сопротивление ротора;  $X_{\text{экв}}$  – эквивалентное индуктивное сопротивление, учитывающее индуктивность обмоток статора и ротора.

У трехфазных электродвигателей с короткозамкнутым ротором  $R_2$  невелико и  $s_{\text{кр}} \approx 0,1$ . Начальный пусковой момент  $M_{\text{пуск}}$  соответствует скольжению  $s = 1$ .

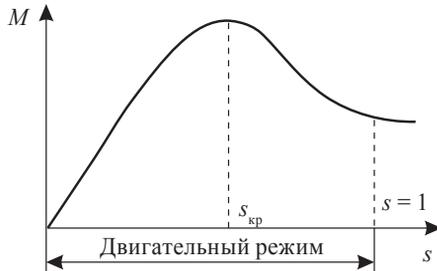


Рис. 1.35. Зависимость электромагнитного момента АД от скольжения

Если ротор вращается в сторону, противоположную магнитному полю статора, электромагнитный момент  $M$  направлен против направления вращения ротора и является тормозным. При этом скольжение  $s > 1$ . Потребляемая из сети энергия выделяется в обмотках в виде тепловой и электродвигатель работает в режиме электромагнитного тормоза (торможение противовключением). При построении механических характеристик АД используют упрощенное уравнение, полученное при условии, что активное сопротивление обмотки статора  $R_1 = 0$ :

$$M = \frac{2M_{\text{кр}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}, \quad (1.25)$$

где  $M_{\text{кр}}$  – критический или максимальный момент, соответствующий критическому скольжению  $s_{\text{кр}}$ .

Формула (1.25) удобна для практических расчетов, но дает большие погрешности в зоне малых частот вращения. Если в формулу (1.25) вместо текущих значений  $M$  и  $s$  подставить номинальные и обозначить  $M_{\text{кр}}/M_{\text{ном}}$  через  $\mu_{\text{кр}}$ , то получим

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left( \mu_{\text{кр}} + \sqrt{\mu_{\text{кр}}^2 - 1} \right) \approx 2\mu_{\text{кр}} s_{\text{ном}}.$$

Поскольку  $n = n_0(1 - s)$ , то формула (1.25) является формулой механической характеристики и по ней можно строить графики механических характеристик по паспортным данным двигателя. График механической характеристики трехфазного АД, построенный по формуле (1.25), представлен на рисунке 1.36.

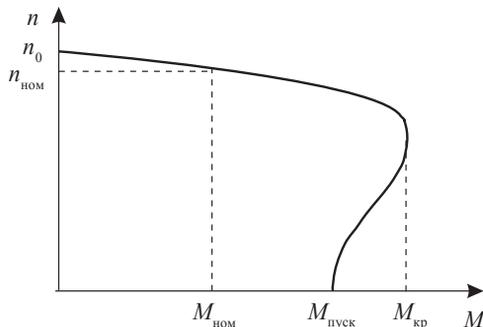


Рис. 1.36. Механическая характеристика АД в двигательном режиме

Номинальный ток электродвигателя определяют по формуле

$$I_{\text{ном}} = \frac{1000 P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}}},$$

где  $P_{\text{ном}}$  — номинальная мощность электродвигателя, кВт;  $U_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение сети, В;  $\cos \varphi_{\text{ном}}$  — коэффициент мощности;  $\eta_{\text{ном}}$  — номинальное значение КПД.

Рабочий ток электродвигателя возрастает при увеличении нагрузки на валу. В момент пуска действует пусковой ток

$$I_{\text{пуск}} = k_i I_{\text{ном}},$$

где  $k_i$  — кратность пускового тока (указывается в паспорте двигателя). Для асинхронных короткозамкнутых электродвигателей  $k_i$  находится в пределах 5–7.

Перегрузочная способность электродвигателя:

$$\mu_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}.$$

Большой пусковой ток при пуске мощных электродвигателей приводит к снижению напряжения в сети, что вредно сказывается на работе других, ранее включенных двигателей. При значительном снижении напряжения запуск двигателя может ока-

заться невозможным. Для уменьшения пусковых токов применяют пуск двигателя с переключением обмоток статора со звезды на треугольник. В момент пуска обмотки включены в звезду, а когда частота вращения двигателя достигает номинального значения, происходит переключение обмотки статора на треугольник (рис. 1.37). Этот способ снижения пускового тока применим, если электродвигатель предназначен для включения в сеть треугольником.

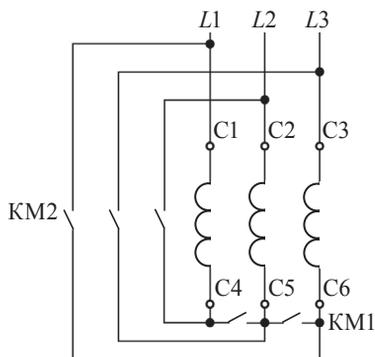


Рис. 1.37. Схема переключения обмоток статора АД со звезды на треугольник при пуске

При включении обмоток в звезду напряжение на каждой фазе уменьшается в  $\sqrt{3}$  раз, а фазные токи — в 3 раза. Мощность электродвигателя при пуске также снижается в 3 раза, что является недостатком данного способа, поскольку электродвигатель может быть пущен при нагрузке не более  $1/3$  от номинальной. Если для привода рабочей машины требуется электродвигатель мощностью более 10 кВт и она имеет большие маховые массы (пилорамы, дробилки кормов, мельницы), рекомендуется применять трехфазные АД с фазным ротором.

#### 1.7.4. Основные энергетические режимы трехфазного асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель может работать во всех возможных энергетических режимах, которые определяют величиной и знаком скольжения, а именно (рис. 1.38):

- $s = 0$ ,  $\omega = \omega_0$  — режим идеального холостого хода;
- $s = 1$ ,  $\omega = 0$  — режим короткого замыкания;

- $0 < s < 1, 0 < \omega < \omega_0$  – двигательный режим;
- $s < 0, \omega > \omega_0$  – генераторный режим параллельно с сетью (рекуперативное торможение);
- $s > 1, \omega < 0$  – генераторный режим последовательно с сетью (торможение противовключением).

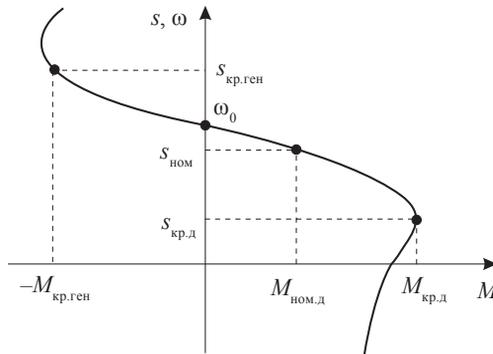


Рис. 1.38. Механическая характеристика АД

### 1.7.5. Торможение трехфазных асинхронных двигателей

Как следует из подпункта 1.7.4, АД могут работать в тормозных режимах. Рекуперативное торможение (или генераторное торможение с отдачей энергии в сеть) может быть осуществлено при  $n > n_0$ . Это возможно при раскручивании вала двигателя приводимым механизмом (например, при опускании груза).

Торможение противовключением осуществляется в том случае, когда магнитное поле статора и ротор вращаются в противоположных направлениях. При этом создается тормозной момент. Для получения такого режима следует на ходу переключить две любые фазы обмотки статора. Ротор по инерции будет вращаться некоторое время в прежнем направлении, уменьшая частоту вращения, а затем остановится. Если в этот момент двигатель не отключить от сети, произойдет реверс.

Реверс и быстрое торможение до полной остановки АД средней и большой мощности осуществляются одновременным включением в цепь ротора дополнительных сопротивлений для ограничения токов. Асинхронный двигатель может быть введен в режим торможения противовключением нагрузкой, момент со-

противления которой больше пускового момента (момента короткого замыкания). В этом случае также необходимо вводить дополнительные сопротивления в цепь ротора и статора электродвигателя одновременно.

Динамическое торможение осуществляется путем отключения статорной обмотки на ходу от сети переменного тока и присоединения ее к источнику постоянного тока. Постоянный ток, проходя по обмоткам статора, создает неподвижное в пространстве магнитное поле. При вращении ротора в его обмотках наводится ЭДС и возникает ток. Взаимодействие тока ротора и магнитного поля создает тормозной момент. Двигатель работает в режиме генератора независимо от сети переменного тока, преобразовывая механическую энергию движущихся частей электропривода и рабочей машины в электрическую, которая рассеивается в виде теплоты в обмотке ротора.

Схема включения АД в режиме динамического торможения приведена на рисунке 1.39. Для получения режима динамического торможения контакты КМ должны быть разомкнуты, а контакты КV замкнуты. Режим динамического торможения используют для плавной остановки двигателя.

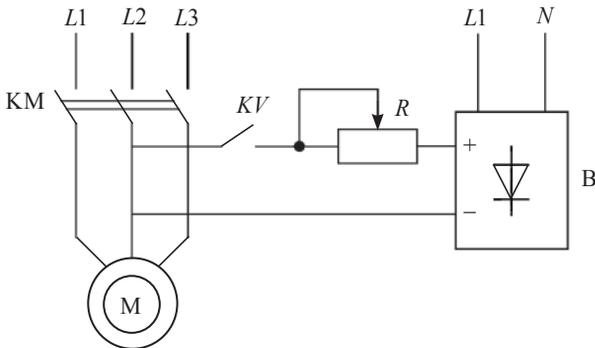


Рис. 1.39. Схема включения АД в режиме динамического торможения: В – выпрямитель; R – токоограничивающий резистор

### 1.7.6. Регулирование скорости асинхронного двигателя

Наиболее распространены способы регулирования скорости АД изменением дополнительного сопротивления цепи ротора,

изменением напряжения, подводимого к статору, изменением частоты питающего напряжения, а также переключением числа пар полюсов.

Введение резисторов в цепь ротора приводит к увеличению потерь мощности и снижению частоты вращения ротора за счет увеличения скольжения, поскольку  $n = n_0(1 - s)$ . При увеличении сопротивления в цепи ротора при том же моменте частота вращения вала двигателя уменьшается (рис. 1.40). Жесткость механических характеристик значительно снижается с уменьшением частоты вращения, что ограничивает диапазон регулирования до (2–3):1. Недостатком этого способа являются значительные потери энергии, которые пропорциональны скольжению. Такое регулирование возможно только для двигателя с фазным ротором.

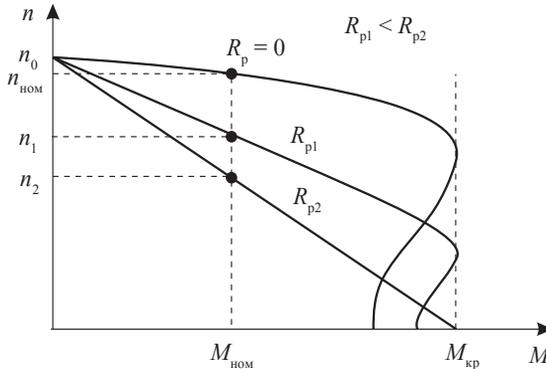


Рис. 1.40. Механические характеристики трехфазного АД при введении резисторов в цепь ротора

Изменение величины напряжения, подводимого к обмотке статора АД, позволяет регулировать скорость с помощью относительно простых технических средств и схем управления. Для этого между сетью переменного тока со стандартным напряжением  $U_{\text{норм}}$  и статором электродвигателя включен регулятор напряжения (рис. 1.41).

При регулировании частоты вращения АД изменением напряжения, подводимого к обмотке статора, критический момент АД  $M_{\text{кр}}$  изменяется пропорционально квадрату подводимого к двигателю напряжения  $U_{\text{рег}}$  (рис. 1.42), а скольжение от  $U_{\text{рег}}$  не зависит.

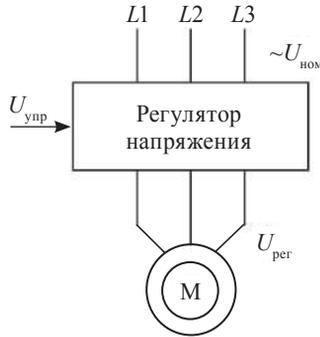


Рис. 1.41. Схема регулирования скорости АД путем изменения напряжения на статоре

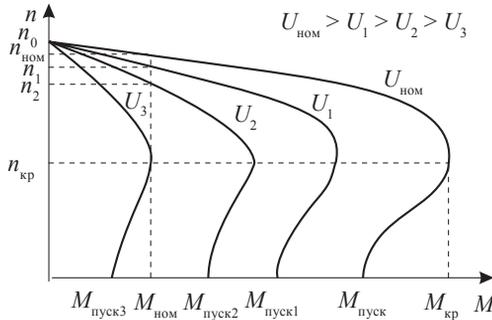


Рис. 1.42. Механические характеристики АД при изменении величины питающего напряжения, подводимого к обмотке статора

Если момент сопротивления рабочей машины больше пускового момента электродвигателя  $M_c > M_{\text{пущк}}$ , двигатель не будет вращаться, поэтому необходимо запустить его при номинальном напряжении  $U_{\text{ном}}$  или на холостом ходу. Регулировать частоту вращения короткозамкнутых АД таким способом можно только при вентиляторном характере нагрузки, кроме того, должны использоваться специальные электродвигатели с повышенным скольжением. Диапазон регулирования небольшой, до  $n_{\text{кр}}$ .

Для изменения напряжения применяют трехфазные автотрансформаторы и тиристорные регуляторы напряжения.

Так как частота вращения магнитного поля статора  $n_0 = 60f/p$ , то регулирование частоты вращения АД можно производить изменением частоты питающего напряжения  $f_c$ . Для эффективного использования электродвигателя при частотном регулировании не-

обходимо, чтобы с изменением частоты одновременно изменялось напряжение. Схема асинхронного электропривода приведена на рисунке 1.43, а механические характеристики асинхронного электродвигателя при частотном регулировании – на рисунке 1.44.

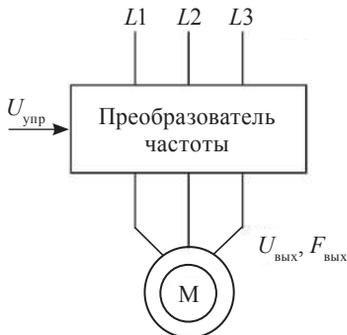


Рис. 1.43. Схема асинхронного электропривода при частотном регулировании

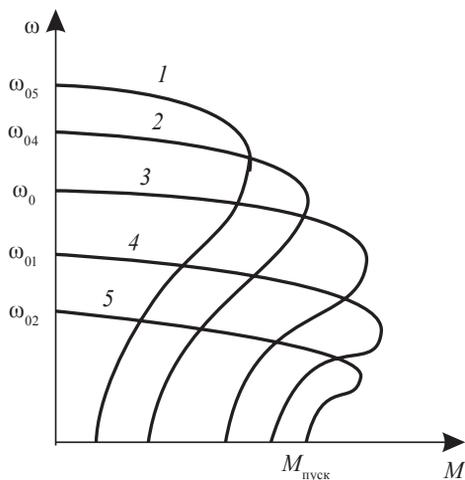


Рис. 1.44. Механические характеристики АД при частотном регулировании

С уменьшением частоты  $f$  критический момент несколько уменьшается в области малых частот вращения. Это объясняется возрастанием влияния активного сопротивления обмотки статора при одновременном снижении частоты и напряжения. Частотное регули-

рование позволяет изменять частоту вращения в диапазоне (20–30):1. Частотный способ является наиболее перспективным для регулирования АД с короткозамкнутым ротором. Потери мощности при таком регулировании невелики, так как потери скольжения минимальны.

Ступенчатое регулирование скорости можно осуществить, используя специальные многоскоростные АД с короткозамкнутым ротором. Из выражения  $n_0 = 60f/p$  следует, что при изменении числа пар полюсов  $p$  получаются механические характеристики с разной частотой вращения магнитного поля статора  $n_0$ . Так как значение  $p$  определяется целыми числами, то переход от одной характеристики к другой в процессе регулирования носит ступенчатый характер. Существуют два способа изменения числа пар полюсов. В первом случае в пазы статора укладываются две обмотки с разным числом полюсов. При изменении скорости к сети подключается одна из обмоток. Во втором случае обмотка каждой фазы составляется из двух частей, которые соединяют параллельно или последовательно. При этом число пар полюсов изменяется в 2 раза.

На рисунке 1.45 приведены схемы переключения с одинарной на двойную звезду и с треугольника на двойную звезду.

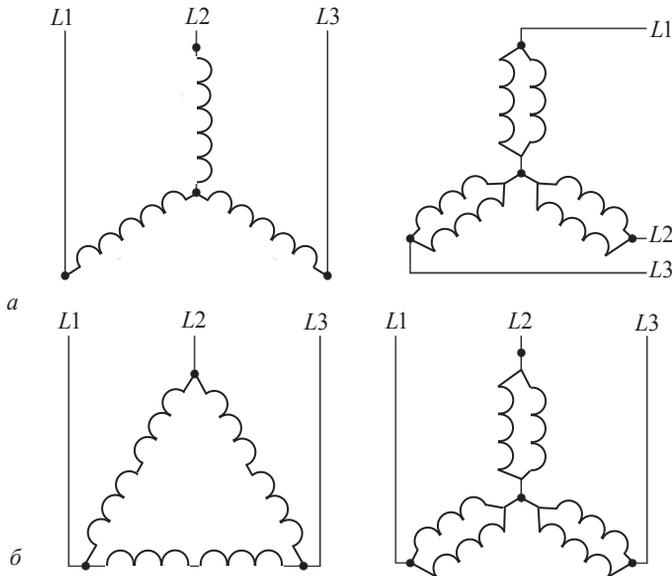


Рис. 1.45. Схемы переключения обмоток: *a* – с одинарной звезды на двойную; *б* – с треугольника на двойную звезду

Регулирование скорости изменением числа пар полюсов экономично, а механические характеристики сохраняют жесткость. Недостатком является ступенчатый характер изменения частоты вращения АД с короткозамкнутым ротором. Двухскоростные электродвигатели выпускают с числом полюсов 4/2, 8/4, 12/6, четырехскоростные – с полюсами 12/8/6/4, имеют две переключаемые обмотки.

### **1.7.7. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод**

Частотный преобразователь в комплекте с АД позволяет заменить электропривод постоянного тока. Системы регулирования скорости двигателя постоянного тока (ДПТ) достаточно просты, но слабым местом такого электропривода является электродвигатель. Он дорог и ненадежен. При работе происходит искрение щеток, под воздействием электроэрозии изнашивается коллектор. Такой электродвигатель не может использоваться в запыленной и взрывоопасной среде.

Асинхронные двигатели превосходят двигатели постоянного тока по многим параметрам: они просты по устройству и надежны, так как не имеют подвижных контактов; имеют меньшие по сравнению с ДПТ размеры, массу и стоимость при той же мощности; просты в изготовлении и эксплуатации.

Основной недостаток АД – сложность регулирования их скорости традиционными методами (изменением питающего напряжения, введением дополнительных сопротивлений в цепь обмоток). Управление АД в частотном режиме до недавнего времени было большой проблемой, хотя теория частотного регулирования была разработана еще в 30-е годы XX в. Развитие частотно-регулируемого электропривода сдерживалось высокой стоимостью преобразователей частоты. Появление силовых схем с IGBT-транзисторами, разработка высокопроизводительных микропроцессорных систем управления позволило различным фирмам Европы, США и Японии создать современные преобразователи частоты доступной стоимости.

Регулирование частоты вращения исполнительных механизмов можно осуществлять при помощи различных устройств: механических вариаторов, гидравлических муфт, дополнительно вводимыми в статор или ротор резисторами, электромеханическими и статическими преобразователями частоты.

Первые четыре устройства не обеспечивают высокого качества регулирования скорости, неэкономичны, требуют больших затрат при монтаже и эксплуатации. Статические преобразователи частоты являются наиболее совершенными устройствами управления асинхронным приводом в настоящее время.

Принцип частотного метода регулирования скорости АД заключается в том, что, изменяя частоту  $f_1$  питающего напряжения, в соответствии с выражением  $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ , при неизменном числе пар полюсов  $p$  можно изменять угловую скорость магнитного поля статора  $\omega_0$ . Данный способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, а механические характеристики обладают высокой жесткостью. При этом регулирование скорости не сопровождается увеличением скольжения АД, поэтому потери мощности при регулировании невелики.

Для получения высоких энергетических показателей АД – коэффициентов мощности, полезного действия, перегрузочной способности – необходимо одновременно с частотой изменять и подводимое напряжение. Закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки  $M_c$ . При постоянном моменте нагрузки  $M_c = \text{const}$  напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально частоте:  $U_1/f_1 = \text{const}$ . Для вентиляторного характера момента нагрузки это состояние имеет вид  $U_1/f_1^2 = \text{const}$ , а при моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости, –  $U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}$ . Таким образом, для плавного бесступенчатого регулирования частоты вращения вала АД преобразователь частоты должен обеспечивать одновременное регулирование частоты и напряжения на статоре АД.

Большинство современных преобразователей частоты построено по схеме двойного преобразования. Они состоят из следующих основных частей: звена постоянного тока (неуправляемого выпрямителя), силового импульсного инвертора и системы управления.

Звено постоянного тока состоит из неуправляемого выпрямителя и фильтра. Переменное напряжение питающей сети преобразуется в нем в напряжение постоянного тока.

Силовой трехфазный импульсный инвертор состоит из шести транзисторных ключей. Каждая обмотка электродвигателя подключается через соответствующий ключ к положительному и отрицательному выводам выпрямителя. Инвертор осуществляет

преобразование выпрямленного напряжения в трехфазное переменное напряжение нужной частоты и амплитуды, которое прикладывается к обмоткам статора электродвигателя.

В выходных каскадах инвертора в качестве ключей используют силовые IGBT-транзисторы. По сравнению с тиристорами, они имеют более высокую частоту переключения, что позволяет вырабатывать выходной сигнал синусоидальной формы с минимальными искажениями.

Преобразователь частоты (ПЧ) состоит из неуправляемого диодного силового выпрямителя В, автономного инвертора (АИН), системы управления импульсами (СУИ) ШИМ, системы автоматического регулирования (САР), дросселя  $L_B$  и конденсатора фильтра  $C_B$  (рис. 1.46).

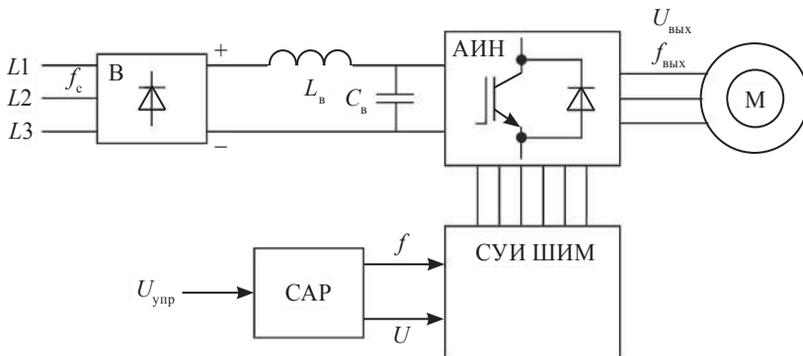


Рис. 1.46. Упрощенная схема автономного инвертора с ШИМ

Регулирование выходной частоты  $f_{\text{ВЫХ}}$  и напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  осуществляется в АИН за счет высокочастотного широтно-импульсного (ШИМ) управления. ШИМ характеризуется периодом модуляции, внутри которого обмотка статора электродвигателя подключается поочередно к положительному и отрицательному полюсам выпрямителя. Длительность этих состояний внутри периода ШИМ модулируется по синусоидальному закону. При высоких (обычно 2–15 кГц) тактовых частотах ШИМ в обмотках электродвигателя вследствие их фильтрующих свойств текут синусоидальные токи.

Таким образом, форма кривой выходного напряжения представляет собой высокочастотную двухполярную последовательность прямоугольных импульсов (рис. 1.47). Частота импульсов

определяется частотой ШИМ, длительность (ширина) импульсов в течение периода выходной частоты АИН промодулирована по синусоидальному закону. Форма кривой выходного тока (тока в обмотках АД) практически синусоидальна.

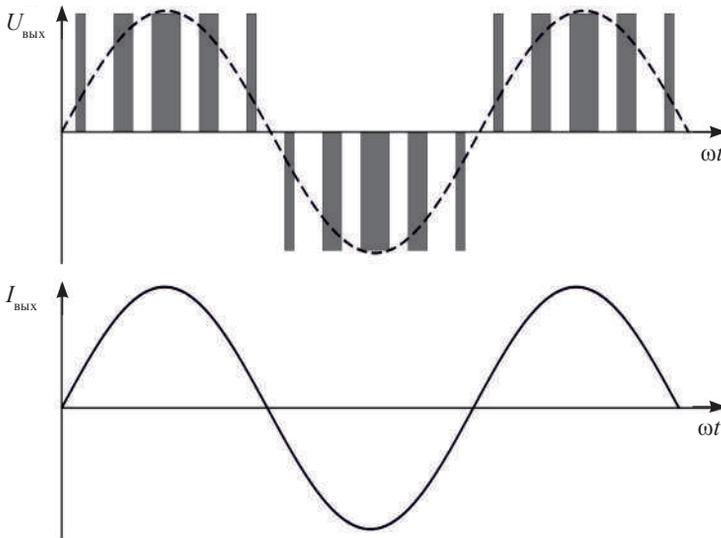


Рис. 1.47. Форма кривых напряжения и тока на выходе инвертора с широтно-импульсной модуляцией

Регулирование выходного напряжения АИН можно осуществить двумя способами: амплитудным (АР) за счет изменения входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  и широтно-импульсным (ШИМ) за счет изменения программы переключения вентилях  $V1-V6$  при  $U_{\text{вх}} = \text{const}$ . Второй способ получил распространение в современных преобразователях частоты благодаря развитию современной элементной базы (микропроцессоры, IGBT-транзисторы). При ШИМ-модуляции форма токов в обмотках статора АД получается близкой к синусоидальной из-за фильтрующих свойств самих обмоток. Такое управление позволяет получить высокий КПД преобразователя и эквивалентно аналоговому управлению с помощью частоты и амплитуды напряжения.

Современные инверторы выполняются на основе полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов — запираемых GTO-тиристоров, либо биполярных IGBT-транзисторов с

изолированным затвором. На рисунке 1.48 представлена трехфазная мостовая схема автономного инвертора на IGBT-транзисторах. Она состоит из входного емкостного фильтра  $C_\phi$  и шести IGBT-транзисторов  $V1-V6$ , включенных встречно-параллельно диодами обратного тока  $D1-D6$ . За счет поочередного переключения вентилях  $V1-V6$  по алгоритму, заданному системой управления, постоянное входное напряжение  $U_{вх}$  преобразуется в переменное прямоугольно-импульсное выходное напряжение. Через управляемые ключи  $V1-V6$  протекает активная составляющая тока АД, через диоды  $D1-D6$  – реактивная составляющая тока АД.

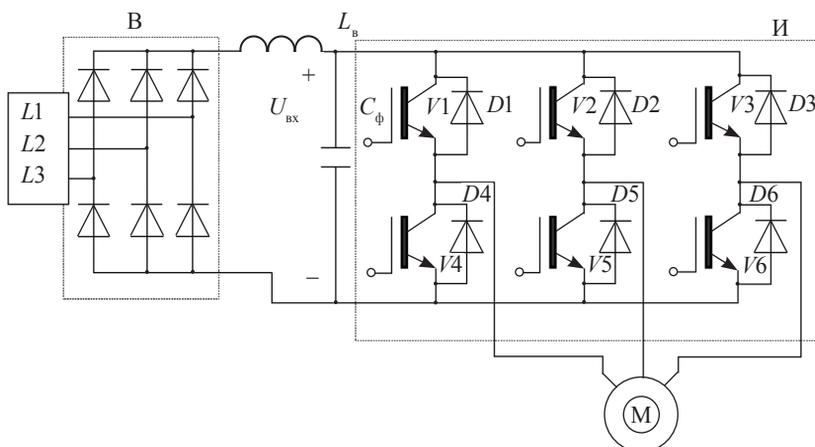


Рис. 1.48. Схема инвертора: В – трехфазный мостовой выпрямитель; И – трехфазный мостовой инвертор;  $C_\phi$  – конденсатор емкостного фильтра

Применение регулируемого электропривода обеспечивает энергосбережение и позволяет получать новые качества систем и объектов. Значительная экономия электроэнергии обеспечивается за счет регулирования какого-либо технологического параметра. Если это транспортер или конвейер, можно регулировать скорость его движения; если это насос или вентилятор, можно поддерживать давление или регулировать производительность; если это станок, можно плавно регулировать скорость подачи или главного движения.

Особый экономический эффект от использования преобразователей частоты дает применение частотного регулирования

на объектах, обеспечивающих транспортирование жидкостей. До сих пор самым распространенным способом регулирования производительности таких объектов является использование задвижек или регулирующих клапанов, но сегодня доступным становится частотное регулирование АД, приводящего в движение, например, рабочее колесо насосного агрегата или вентилятора. Перспективность частотного регулирования наглядно видна из рисунка 1.49, на котором представлены зависимости потребляемой электродвигателем насоса мощности от относительной подачи  $Q/Q_{\max}$ .

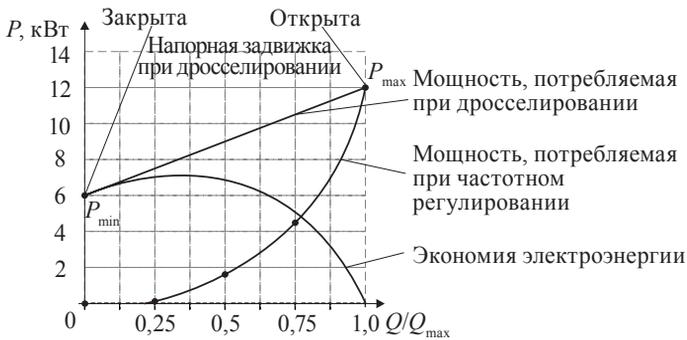


Рис. 1.49. Потребление мощности при различных способах регулирования скорости вращения насосов

При дросселировании поток вещества, сдерживаемый задвижкой или клапаном, не совершает полезной работы. При частотном регулировании наибольшая экономия энергии достигается в зоне работы насоса до половины производительности.

Применение регулируемого электропривода насоса или вентилятора позволяет задать необходимое давление или расход, что не только обеспечит экономию электроэнергии, но и снизит потери транспортируемого вещества.

## 1.8. ЭЛЕКТРОПРИВОД С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Основные достоинства синхронного двигателя (СД) — строгое постоянство скорости, определяемой числом пар полюсов и частотой сети, и независимость частоты вращения от нагрузки.

Механическая характеристика СД является абсолютно жесткой (см. рис. 1.2). Синхронные двигатели имеют высокий коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , близкий к 1, и опережающий. Способность СД работать с опережающим  $\cos \varphi$  и отдавать при этом в сеть реактивную мощность позволяет улучшать режим работы и экономичность системы электроснабжения. КПД современных СД составляет 96–98 %, что на 1–1,5 % выше КПД АД тех же габаритов и скорости.

Конструкция статора СД аналогична конструкции статора АД с трехфазной обмоткой. На роторе СД размещается обмотка возбуждения и пусковая короткозамкнутая обмотка в виде беличьей клетки. Конструктивно ротор может быть выполнен явно полюсным и неявно полюсным (в виде цилиндра).

В СД при подключении к сети переменного тока обмотка статора создает вращающееся магнитное поле. Обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока. Чаще всего таким источником является небольшой генератор постоянного тока (мощностью 0,3–3,0 % от мощности СД), называемый возбудителем, который устанавливается на одном валу с СД (рис. 1.50).

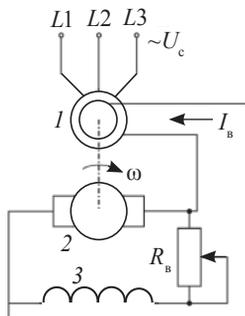


Рис. 1.50. Схема включения СД:  
1 — обмотка возбуждения СД; 2 — возбудитель;  
3 — обмотка возбуждения возбудителя

Регулирование тока возбуждения  $I_b$  осуществляется изменением сопротивления резистора  $R_b$ . В качестве источника питания обмотки возбуждения применяют также тиристорные регуляторы. При неподвижном роторе из-за его инерции вращающееся магнитное поле не успевает увлечь ротор за собой. В результате за один оборот поля вращающий момент, действующий на ротор, изменяет направление на обратное, а его среднее значение за период

будет равно нулю. Ротор остается неподвижным (или колеблется). Короткозамкнутая обмотка позволяет осуществлять асинхронный запуск СД, так как вращающееся магнитное поле индуцирует в ней ЭДС и токи, в результате чего создается электромагнитный момент, как у АД. При пуске обмотка возбуждения отключена от источника постоянного тока и замкнута на активное сопротивление. При достижении частоты вращения, близкой к синхронной, обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока и двигатель втягивается в синхронный режим работы.

Механическая характеристика СД  $\omega(M)$  (рис. 1.51) представляет собой горизонтальную линию с ординатой  $\omega_0$ . Превышение максимального момента  $M_{\max}$  приведет к выпадению СД из синхронизма, т. е. к нарушению синхронного вращения ротора и магнитного поля статора.



Рис. 1.51. Механическая характеристика СД

Для определения максимального момента  $M_{\max}$ , до которого сохраняется синхронная работа СД с сетью, служит угловая характеристика (рис. 1.52). Она отражает зависимость момента  $M$  от угла сдвига между векторами ЭДС статора  $\vec{E}$  и фазного напряжения сети  $\vec{U}_\phi$ .

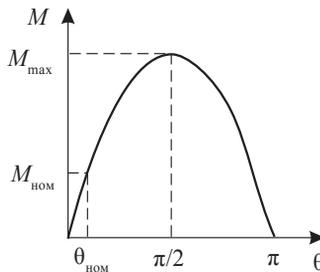


Рис. 1.52. Угловая характеристика СД

Момент СД представляет собой синусоидальную функцию угла  $\theta$ :

$$M = \frac{3\bar{U}_\phi E \sin \theta}{\omega_0 x_1} \approx M_{\max} \sin \theta,$$

где  $\omega_0$  — скорость вращения магнитного поля;  $x_1$  — индуктивное сопротивление фазы обмотки СД.

Максимального значения момент СД достигает при  $\theta = \pi/2$ . Эта величина характеризует перегрузочную способность СД. При больших углах  $\theta$  СД выпадает из синхронизма, при меньших углах работа его устойчива. Номинальная величина угла  $\theta$  составляет 25–30°; ему соответствует номинальный момент, а кратность максимального момента составляет 2,0–2,5.

## 1.9. ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотрим возможные области применения асинхронных двигателей, их преимущества и недостатки.

Импульсное регулирование сопротивления цепи выпрямленного тока ротора АД с фазным ротором применяется в приводах подъемников малой и средней мощности. Обеспечивает плавный пуск и торможение, диапазон регулирования скорости не превышает 1:5.

Система «тиристорный регулятор напряжения — асинхронный электродвигатель»: для АД с короткозамкнутым ротором применяется для привода машин центробежного типа; для АД с фазным ротором — в подъемно-транспортных механизмах, работающих в повторно-кратковременном режиме. В этом случае резистор в цепи ротора используют для расширения диапазона регулирования. Диапазон регулирования ограничен критическим скольжением АД.

Система «преобразователь частоты со звеном постоянного тока и с широтно-импульсной модуляцией — асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» — наиболее распространенный вид регулируемого электропривода переменного тока. Она обладает высокими технико-экономическими характеристиками, обеспечивает широкий диапазон регулирования скорости, ста-

бильность характеристик, особенно в режиме векторного управления, экономичность.

В регулируемых электроприводах машин, требующих быстрого действия и высокой точности, применяют синхронные электродвигатели с постоянными магнитами и вентильные электродвигатели с соответствующими системами управления.

Частотный преобразователь служит для преобразования переменного тока промышленной частоты в ток с необходимыми параметрами, например частотой от 1 до 400 Гц. Это позволяет плавно регулировать работу как синхронных, так и асинхронных электродвигателей различных мощностей, а также преобразовывать однофазное напряжение в трехфазное. Применение частотных преобразователей снижает потребление электроэнергии до 70 %. Кроме того, ПЧ обеспечивают защиту электродвигателя от перегрева, перегрузок и обрыва фаз; возможно управление несколькими электродвигателями одновременно от одного частотного преобразователя; возможен переход от существующего нерегулируемого электропривода к регулируемому, приобретающему в результате новые возможности и качества.

Основные области применения частотно-регулируемого электропривода: системы тепло- и водоснабжения (для плавного пуска, регулирования производительности и остановки насосного оборудования); вентиляторы, дымососы; транспортеры, конвейеры; мельницы, дробилки, мешалки, центрифуги; лифтовое, экскаваторное и крановое оборудование; привод буровых станков и др.

Для АД, подключенных к преобразователю частоты, существуют следующие основные методы управления:

1) скалярное:

- скалярное управление по вольт-частотной характеристике ( $U/f$ -управление);

- скалярное управление  $U/f$  с энкодером;

2) векторное:

- векторное управление с разомкнутым контуром;

- векторное управление с замкнутым контуром.

Все четыре метода используют широтно-импульсную модуляцию, которая изменяет ширину фиксированного сигнала путем изменения длительности импульсов для создания аналогового сигнала.

Скалярный метод управления АД переменного тока заключается в том, чтобы поддерживать постоянным отношение напряжение/частота ( $U/f$ ) во всем рабочем диапазоне скоростей, при этом контролируются только величина и частота питающего напряжения.

Отношение  $U/f$  – это единственный метод регулирования скорости АД, который позволяет регулирование нескольких электроприводов от одного ПЧ. Соответственно все машины запускают и останавливают одновременно, они работают с одной частотой.

Диапазон регулирования скорости при использовании метода  $U/f$  составляет 1:40. Например, если максимальное значение частоты 60 Гц, а диапазон составляет 1:40, то минимальное значение частоты составит 1,5 Гц.

При скалярном методе управления  $U/f$  с энкодером скорость АД контролируется установкой величины напряжения и частоты статора таким образом, чтобы магнитное поле в зазоре поддерживалось на нужной величине. Для поддержания постоянного магнитного поля в зазоре отношение  $U/f$  должно быть постоянным на разных скоростях.

Скалярное управление электродвигателями переменного тока – хорошая альтернатива для применений, где нет переменной нагрузки и отсутствуют высокие динамические нагрузки (вентиляторы, насосы). Для работы скалярного управления не требуется датчик положения ротора, а скорость ротора может быть оценена по частоте питающего напряжения. Когда используют скалярное управление, не требуется высокопроизводительный цифровой сигнальный процессор, как в случае с векторным управлением.

К недостаткам скалярного управления можно отнести то, что при скалярном управлении электродвигателем токи статора не контролируются напрямую.

**Векторное управление** – метод управления бесщеточными электродвигателями переменного тока, который позволяет независимо и практически безынерционно регулировать скорость вращения и момент на валу электродвигателя.

Главная идея векторного управления заключается в том, чтобы контролировать не только величину и частоту напряжения

питания, но и фазу. Другими словами, контролируются величина и угол пространственного вектора. Векторное управление в сравнении со скалярным обладает более высокой производительностью. Оно практически избавляет от всех недостатков скалярного управления.

Преимущества векторного управления:

- высокая точность регулирования скорости;
- плавный старт и плавное вращение двигателя во всем диапазоне частот;
- быстрая реакция на изменение нагрузки: при изменении нагрузки практически не происходит изменения скорости;
- увеличенный диапазон управления и точность регулирования;
- снижение потерь на нагрев и намагничивание, повышение КПД электродвигателя.

К недостаткам векторного управления можно отнести:

- необходимость задания параметров электродвигателя;
- большие колебания скорости при постоянной нагрузке;
- большую вычислительную сложность.

Механические характеристики АД при изменении частоты питающего напряжения приведены на рисунке 1.53.

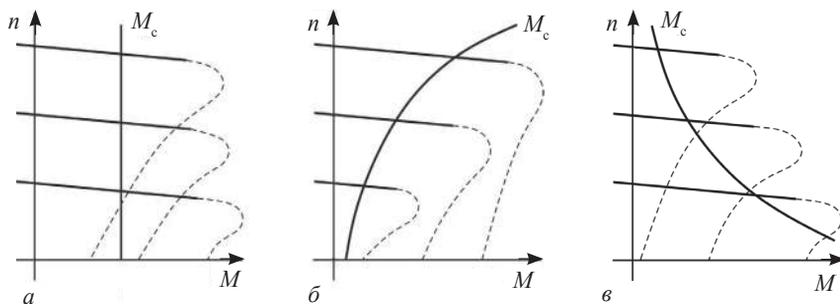


Рис. 1.53. Механические характеристики АД при изменении частоты питающего напряжения:

*a* – при  $U_s/f = \text{const}$ ; *б* – при  $U_s/f^2 = \text{const}$ ; *в* – при  $U_s = \text{const}$

Закон изменения напряжения на обмотке статора АД при одновременном изменении частоты (скалярное управление) зависит от характера изменения статического момента приводимого механизма. При моменте сопротивления  $M_c$ , не зависящем от ско-

рости (см. рис. 1.53, *a*), следует использовать закон  $U_s/f = \text{const}$ . В случае работы двигателя в вентиляторных установках и насосах, где  $M_c \sim \omega^2$ , используется закон регулирования  $U_s/f^2 = \text{const}$  (см. рис. 1.53, *б*); если  $M_c \sim 1/\omega$  (гиперболическая зависимость), питающее напряжение не изменяется (см. рис. 1.53, *в*), а мощность на валу постоянная.

Диапазон регулирования скорости в разомкнутых системах частотно-регулируемого асинхронного электропривода при скалярном управлении не превышает 1:10. Расширить этот диапазон до 20 можно путем компенсации скольжения (при соответствующей настройке преобразователя частоты). При использовании ПЧ в замкнутой структуре с обратной связью по скорости диапазон регулирования достигает 1:200.

Частотно-регулируемый асинхронный электропривод со скалярным управлением может быть и двухзонным, когда требуется повышением частоты выше номинальной соответственно увеличивать скорость двигателя. Напряжение на выходе ПЧ при этом ограничено номинальным значением. При частоте (скорости вращения) выше номинальной напряжение питания двигателя остается постоянным, равным номинальному напряжению (рис. 1.54). Длительно допустимый и кратковременно допустимый моменты двигателя в этом случае должны быть уменьшены на верхних скоростях (рис. 1.55).

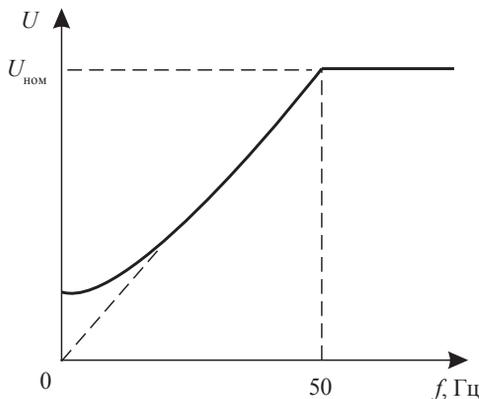


Рис. 1.54. Зависимость напряжения на выходе ПЧ при скалярном управлении

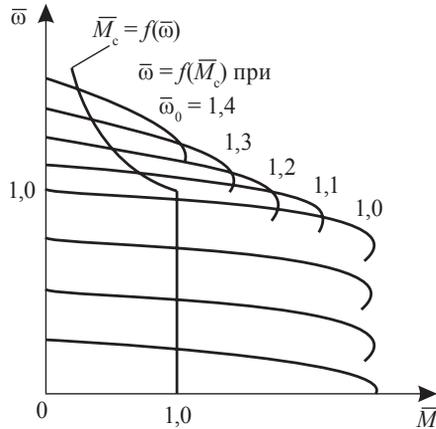


Рис. 1.55. Механические характеристики АД при двухзонном регулировании

Преобразователи частоты со скалярным управлением можно использовать в многодвигательных электроприводах для управления параллельно включенными двигателями.

Для систем регулируемых электроприводов при диапазоне регулирования скорости более 1:10 или с повышенными требованиями к динамике применяют системы векторного управления без датчиков скорости, но к выходу векторных преобразователей допускается подключать только один электродвигатель.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Из каких элементов состоит функциональная схема электропривода?
2. Приведите классификацию электроприводов.
3. Перечислите основные режимы работы электродвигателей.
4. Какие виды защит применяют в схемах электропривода?
5. В чем состоит назначение применяемых в электроприводе блокировок?
6. Для чего в схемах электроприводов применяют сигнализацию?
7. Назовите основные части, составляющие конструкцию асинхронного двигателя.
8. Укажите способы, которыми могут быть получены искусственные механические характеристики АД.

9. Перечислите достоинства и недостатки способа регулирования переменного асинхронного двигателя с помощью резисторов.
10. Раскройте сущность регулирования скорости двигателя за счет изменения частоты питающего напряжения.
11. С какой целью при частотном способе регулирования производится регулирование подводимого к двигателю напряжения?
12. Поясните принцип изменения числа пар полюсов многоскоростного двигателя.

## 2. СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

---

---

*Автоматика* — это наука об общих принципах действия и построения систем автоматического управления, т. е. систем, выполняющих поставленные цели без непосредственного участия человека.

Первые сведения об автоматических устройствах относятся к началу нашей эры. Герон Александрийский описал пневматические и механические автоматы для открывания дверей храма при зажигании жертвенного огня, автомат для продажи священной воды и др.

Автоматика как наука появилась во второй половине XIX в. сначала в виде теории регулирования. Широкое применение паровых машин вызвало потребность в регуляторах, т. е. в специальных устройствах, поддерживающих устойчивый режим работы паровой машины. Это дало начало научным исследованиям в области управления техническими объектами. В 1765 г. русский ученый И.И. Ползунов разработал поплавковый регулятор питания котла паровой машины, в 1784 г. английский механик Дж. Уатт получил патент на центробежный регулятор скорости паровой машины.

Автоматизации всегда предшествует процесс полной механизации — такого производственного процесса, в котором человек не затрачивает на выполнение операций физической силы. По мере развития техники функции управления процессами и машинами расширялись и усложнялись. Это привело к возникновению автоматизированного производства, при котором работники высвобождаются не только от физического труда, но и от функций контроля за машинами, оборудованием, производственными

процессами и операциями, а также управления ими. Во второй половине XX в. началось широкое внедрение систем автоматического управления вооружением, авиационной и космической техникой, а также во все отрасли промышленности и сельского хозяйства. В настоящее время с появлением микропроцессорных устройств управления и персональных ЭВМ системы автоматизации нашли массовое применение во всех сферах человеческой деятельности.

## **2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ**

Управление каким-либо объектом есть воздействие на него в целях достижения требуемых состояний или процессов. В качестве объекта управления может служить самолет, станок, электродвигатель и т. п. Под объектом управления (ОУ) в общем случае понимают совокупность взаимосвязанных технических средств и биологических объектов, которыми необходимо управлять для достижения цели. Управление объектом с помощью технических средств без участия человека называют *автоматическим управлением*. Управление, осуществляемое с помощью технических средств с участием человека, называется *автоматизированным управлением*.

Совокупность ОУ и технических средств автоматического управления представляет собой систему автоматического управления (САУ).

Основной задачей автоматического управления является поддержание определенного закона изменения одной или нескольких физических величин, характеризующих процессы, протекающие в ОУ без непосредственного участия человека. Эти величины называются управляемыми величинами. Так, если в качестве ОУ рассматривается хлебопекарная печь, то управляемой величиной будет температура внутри печи, которая должна изменяться по заданной программе в соответствии с требованиями технологии выпечки. Для этого надо соответствующим образом регулировать тепловую мощность нагревательного элемента, т. е. если нагревательный элемент электрический, то регулируется подаваемое на него напряжение. Техническое

устройство, с помощью которого можно изменять параметры управляемого процесса, называют регулирующим органом. Это может быть реостат, вентиль, заслонка и т. п.

Одномерными называют системы с одной управляемой величиной  $y$ , многомерными — системы с несколькими управляемыми величинами (рис. 2.1). Например, в генераторах переменного тока требуется одновременно регулировать величину генерируемого напряжения и его частоту, в паровых машинах — скорость вращения выходного вала и давление пара в котле. Многомерные объекты управления обычно имеют несколько регулирующих органов, для перемещения которых используют несколько одномерных систем регулирования.

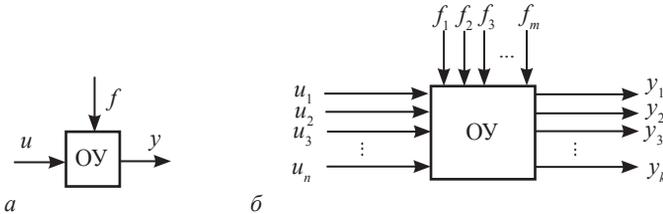


Рис. 2.1. Воздействия на одномерный (а) и многомерный (б) объекты управления

Воздействия — факторы, изменяющие течение технологического процесса в объекте управления. Они могут быть возмущающие и управляющие. Возмущающие воздействия  $f(t)$  носят случайный, трудно предсказуемый характер. Например, температура наружного воздуха, колебания напряжения в электросети и др. Управляющее воздействие  $u(t)$  — это воздействие на объект управления, организуемое устройством управления в целях компенсации влияния возмущающих воздействий и поддержания требуемых значений управляемой величины.

Задающим устройством (ЗУ) называют устройство, задающее программу изменения управляющего воздействия, т. е. формирующее задающий сигнал  $u_0(t)$ . В простейшем случае  $u_0(t) = \text{const}$ . ЗУ может быть выполнено в виде отдельного устройства, быть встроенным в управляющее устройство (УУ) или же вообще отсутствовать.

Принято различать три фундаментальных принципа управления: разомкнутого управления, компенсации и обратной связи.

### 2.1.1. Принцип разомкнутого управления

Для разъяснения принципа разомкнутого управления рассмотрим в качестве примера САУ температурой в хлебопекарной печи, принципиальная схема которой приведена на рисунке 2.2, а. В данной САУ для поддержания температуры на заданном уровне реостатом регулируется напряжение на нагревательном элементе. Для отображения фактического значения температуры в печи на индикаторном приборе (ИП), например на цифровом дисплее, температура измеряется с помощью помещенной в печь термопары.

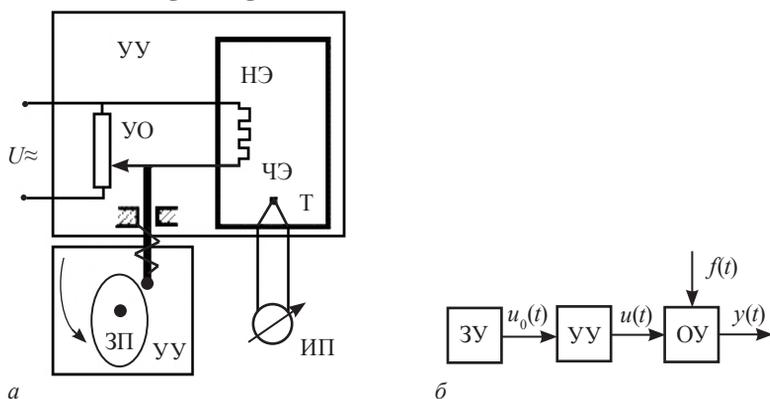


Рис. 2.2. Принципиальная схема САУ хлебопекарной печи

Техническое устройство, предназначенное для получения информации о состоянии объекта управления, а именно преобразующее управляемую физическую величину  $y$  в сигнал, удобный для измерения, передачи, хранения, обработки, регистрации, а иногда и для воздействия им на управляемые процессы (обычно — в электрический сигнал), называется датчиком.

Функциональная схема рассматриваемой САУ приведена на рисунке 2.2, б. Суть принципа разомкнутого управления состоит в том, что программа управления жестко задана ЗУ; управление не учитывает ни влияние возмущений на параметры процесса, ни значение управляемой величины  $y$ . Так, в данном случае ЗУ задаются мощность электронагревателя и продолжительность времени, в течение которого он будет работать. При этом не учитывается, какая масса теста загружена в печь, какова влажность теста, его начальная температура, температура окружающего воздуха в помещении и т. д.

В общем случае точность таких систем невелика. Тем не менее системы, построенные по этому принципу, из-за простоты реализации нашли широкое применение. Так, в рассматриваемом примере в хлебопекарную печь обычно загружается четко определенная масса теста определенной влажности и рецептуры. То есть можно говорить о достаточно строгой повторяемости технологического процесса и об отсутствии сколько-нибудь существенных возмущений. Поэтому для обеспечения требуемого качества выпечки достаточно опытным путем в процессе наладки на определенный вид выпекаемой продукции подобрать оптимальные значения мощности нагревателя, продолжительности его работы и в дальнейшем придерживаться этих значений.

### 2.1.2. Принцип компенсации

Если возмущающий фактор искажает выходную величину до недопустимых пределов, то применяют принцип компенсации, называемый также принципом управления по возмущению. Функциональная схема САУ, работающей по принципу компенсации, показана на рисунке 2.3.

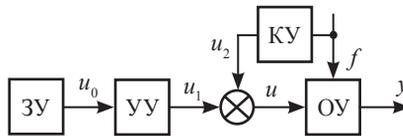


Рис. 2.3. Функциональная схема САУ, работающей по принципу компенсации

Принцип компенсации возмущающего воздействия состоит в том, что для уменьшения или устранения отклонения регулируемой величины  $y$  от заданного значения  $y_3$  измеряется основное возмущающее воздействие  $f$  и преобразуется компенсаторное управление (КУ) в управляющее воздействие  $u(t)$ , подаваемое на вход системы в целях компенсации вызванного возмущением отклонения регулируемой величины. Следовательно, в таких системах управляющее воздействие является функцией возмущающего воздействия.

Достоинством САУ с принципом управления по возмущению является быстрота реакции на возмущение, а также то, что они позволяют полностью компенсировать возмущающее воздействие. Такие САУ разомкнутые, поэтому, как в любой разомкнутой системе, здесь не возникает проблемы устойчивости. Если в системе действует несколько возмущающих воздействий, все

они могут быть скомпенсированы в отдельности таким же образом, если есть возможность их измерения. Однако при этом усложняется система. На практике компенсируются лишь возмущающие воздействия, наиболее резко влияющие на регулируемую величину и вызывающие значительные ее отклонения от требуемого значения. Такие возмущения называют основными. Второстепенными называют возмущения, вызывающие лишь незначительные отклонения регулируемой величины от заданного значения. Недостатком таких САУ является то, что они устраняют влияние только основных возмущений.

Принцип управления по возмущению применяют в системах, предназначенных для поддержания постоянства регулируемой величины. Примером такой системы может служить система централизованного парового отопления жилых зданий в осенне-зимний период. В этом случае температура теплоносителя, подаваемого в радиаторы, изменяется обратно пропорционально температуре воздуха на улице: чем холоднее снаружи, тем жарче радиаторы.

### 2.1.3. Принцип обратной связи

Наибольшее распространение в технике получил принцип обратной связи, называемый также принципом управления по отклонению. Функциональная схема САУ, работающей по принципу обратной связи, представлена на рисунке 2.4. Здесь управляющее воздействие  $u(t)$  корректируется в зависимости от изменений выходной величины  $y(t)$ . При этом не важно, какие возмущения действуют на ОУ. Если значение  $y(t)$  отклоняется от требуемого, происходит корректировка сигнала  $u(t)$  с целью уменьшить данное отклонение. Связь выхода ОУ с его входом называют главной обратной связью (ОС).

Задающее устройство формирует требуемое значение выходной величины  $y_3(t)$ , которое сравнивается с действительным значением на выходе САУ  $y(t)$ . Отклонение  $e(t) = y_3 - y$ , называемое также ошибкой регулирования, с выхода сравнивающего устройства подается на вход регулятора Р. Если  $e \neq 0$ , регулятор формирует управляющее воздействие  $u(t)$ , действующее до тех пор, пока не обеспечится равенство  $e = 0$ . Поскольку на регулятор подается разность сигналов, то обратная связь отрицательная. Такое управление в функции отклонения называют регулированием, а подобную САУ – системой автоматического регулирования (САР).

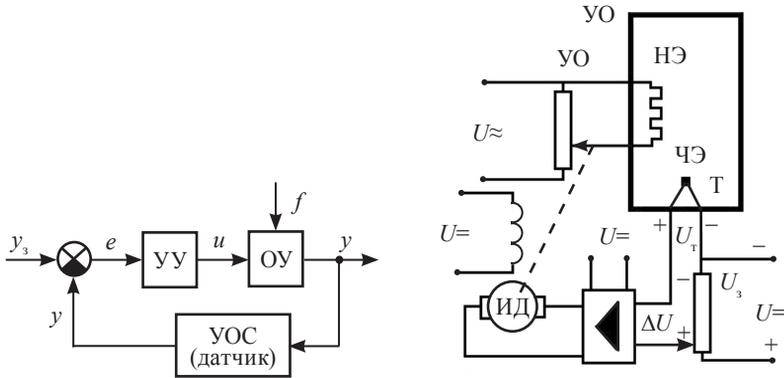


Рис. 2.4. Функциональная схема САР, работающей по принципу обратной связи

В качестве примера на рисунке 2.4 изображена упрощенная схема САР хлебопекарной печи. Роль ЗУ здесь выполняет потенциометр, напряжение на котором  $U_3$  сравнивается с напряжением на термопаре  $U_t$ . Их разность  $U$  через усилитель подается на исполнительный двигатель (ИД), регулирующий через редуктор положение движка реостата в цепи нагревательного элемента. Наличие усилителя говорит о том, что данная САР является системой непрямого регулирования, так как энергия для функций управления берется от посторонних источников питания, в отличие от систем прямого регулирования, в которых энергия берется непосредственно от ОУ, как, например, в САР уровня воды в баке (рис. 2.5).

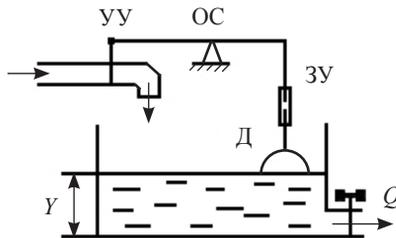


Рис. 2.5. Схема САР прямого регулирования

Недостаток принципа обратной связи – инерционность системы. Поэтому часто применяют комбинацию данного принципа с принципом компенсации, что позволяет объединить до-

стоинства обоих принципов: быстроту реакции на возмущение принципа компенсации и точность регулирования независимо от природы возмущений принципа ОС.

### 2.1.4. Основные виды систем автоматического управления

Различают основные виды САУ: системы стабилизации, программные, следящие и самонастраивающиеся, среди которых можно выделить экстремальные, оптимальные и адаптивные.

В системах стабилизации (см. рис. 2.4, 2.5) обеспечивает неизменное значение управляемой величины при всех видах возмущений, т. е.  $y(t) = \text{const}$ . Задающее устройство формирует эталонный сигнал, с которым сравнивается выходная величина. Как правило, ЗУ допускает настройку эталонного сигнала, что позволяет менять по желанию значение выходной величины.

В программных системах обеспечивается изменение управляемой величины в соответствии с программой, формируемой ПЗУ. К этому виду САУ можно отнести заводные игрушки, магнитофоны, проигрыватели и т. п. Различают системы с временной программой, обеспечивающие  $y = f(t)$ , и системы с пространственной программой, в которых  $y = f(x)$ , применяемые там, где на выходе САУ важно получить требуемую траекторию в пространстве, например в копировальном станке (рис. 2.6), закон движения во времени здесь роли не играет.

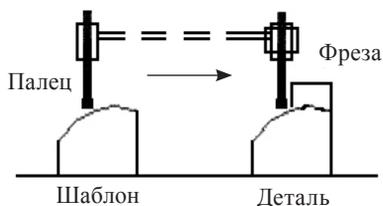


Рис. 2.6. Схема САУ с пространственной программой управления

Следящие системы отличаются от программных лишь тем, что программа  $y = f(t)$  или  $y = f(x)$  заранее неизвестна. В качестве ЗУ выступает устройство, следящее за изменением какого-либо внешнего параметра. Эти изменения и будут определять изменения выходной величины САУ. Например, рука робота, повторяющая движения руки человека.

### 2.1.5. Режимы работы САУ

Существуют два режима работы САУ:

- статический (установившийся);
- динамический (переходной процесс).

Эти два режима отличаются друг от друга характером поведения ОУ. В статическом режиме изменение состояния ОУ, а также его параметров не происходит. В динамическом режиме состояние САУ соответственно изменяется. Другими словами, динамический режим – это режим перехода из одного статического состояния в другое.

При приложении воздействия к какому-либо объекту (элементу или системе автоматикки) из-за инерционности объекта возникает переходный процесс, который через некоторое время заканчивается. После окончания переходного процесса объект работает в режиме, который называется установившимся. Например, если на электродвигатель подать напряжение питания, то после его разгона (переходного процесса) установится определенная частота  $\omega_d$  вращения его вала – установившийся режим (рис. 2.7).

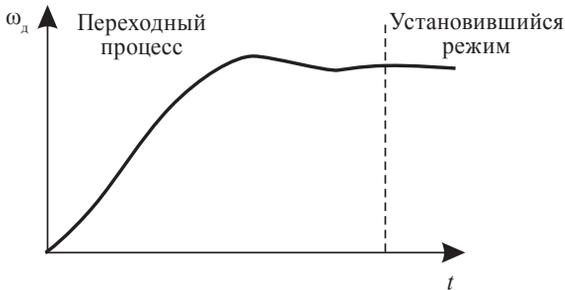


Рис. 2.7. Переходный процесс и установившийся режим работы электродвигателя после подачи на него напряжения питания

Если после окончания переходного процесса выходная величина объекта остается постоянной при постоянном воздействии, такой установившийся режим является статическим. Статический режим отражает статическая характеристика объекта.

Статической характеристикой называют зависимость между постоянным входным воздействием и постоянной выходной величиной объекта в установившемся режиме (после окончания переходного процесса). Например, для электродвигателя посто-

янного тока статическая характеристика представляет собой зависимость между напряжением  $U_{\text{я}}$ , подаваемым на якорь, и выходной величиной — частотой  $\omega_{\text{д}}$  вращения ротора (рис. 2.8).

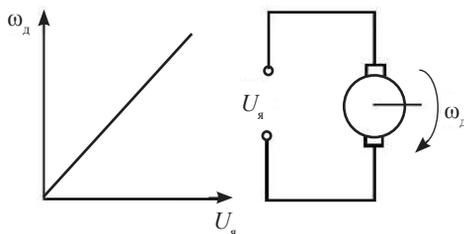


Рис. 2.8. Статическая характеристика электродвигателя и соответствующая схема включения

Динамические установившиеся режимы могут возникать при постоянном воздействии на объект и воздействиях, изменение которого носит установившийся характер. Примерами установившихся динамических режимов при постоянных воздействиях являются автоколебания, возникающие в нелинейных системах.

### **2.1.6. Общие сведения о системах автоматического управления электроприводами (САУЭП) и их классификация**

Функции управления электроприводами: осуществление пуска, регулирование скорости, торможение, реверсирование рабочей машины, поддержание ее режима работы в соответствии с требованиями технологического процесса, управление положением рабочего органа машины. Кроме основных функций, системы управления электроприводами могут выполнять дополнительные функции, к которым относятся сигнализация, защита, блокировки и пр. Обычно системы управления одновременно выполняют несколько функций.

Системы управления электроприводами делят на различные группы в зависимости от главного признака, положенного в основу классификации.

**По способу управления** различают системы ручного, полуавтоматического (автоматизированного) и автоматического управления.

*Ручным* называют управление, при котором оператор непосредственно воздействует на простейшие аппараты управления. Недостатками такого управления являются необходимость расположения аппаратов вблизи электропривода, обязательное присутствие оператора, низкая точность и быстродействие системы управления. Поэтому применение ручного управления ограничено.

Управление называют *полуавтоматическим*, если его осуществляет оператор путем воздействия на различные автоматические устройства, выполняющие отдельные операции. При этом обеспечиваются высокая точность управления, возможность дистанционного управления, снижается утомляемость оператора. Однако при таком управлении ограничено быстродействие, так как оператор может затрачивать время на принятие решения о требуемом режиме управления в зависимости от изменившихся условий работы.

Управление называют *автоматическим*, если все операции управления осуществляются автоматическими устройствами без непосредственного участия человека. В этом случае обеспечиваются наибольшие быстродействие и точность управления системы автоматического управления. По мере развития средства автоматизации получают все большее распространение.

***По роду выполняемых в производственном процессе основных функций*** системы полуавтоматического и автоматического управления электроприводами можно разделить на несколько групп.

К первой группе относят системы, обеспечивающие автоматические пуск, остановку и реверсирование электропривода. Скорость таких приводов не регулируется, поэтому их называют *нерегулируемыми*. Такие системы применяют в электроприводах насосов, вентиляторов, компрессоров, конвейеров, лебедок вспомогательных механизмов и т. п.

Ко второй группе относят системы управления, которые кроме выполнения функций, обеспечиваемых системами первой группы, позволяют регулировать скорость электроприводов. Подобного рода системы электроприводов называют *регулируемыми*, их применяют в грузоподъемных устройствах, транспортных средствах и пр.

К третьей группе относят системы управления, обеспечивающие, кроме вышеуказанных функций, возможность регулиро-

вания и поддержания определенной точности, постоянства различных параметров (скорости, ускорения, тока, мощности и т. д.) при изменяющихся производственных условиях. Такие системы автоматического управления, содержащие обычно обратные связи, называют *системами автоматической стабилизации*.

К четвертой группе относят системы, обеспечивающие слежение за сигналом управления, закон изменения которого заранее не известен. Такие системы управления электроприводами называют *слеящими системами*. Параметры, за которыми обычно осуществляется слежение: линейные перемещения, температура, количество воды или воздуха и пр.

К пятой группе относят системы управления, обеспечивающие работу отдельных машин и механизмов или целых комплексов по заранее заданной программе, называемые *программными системами*.

Первые четыре группы систем управления электроприводами обычно входят как составные части в систему пятой группы. Кроме того, эти системы снабжаются программными устройствами, датчиками и другими элементами.

К шестой группе относят системы управления, которые обеспечивают не только автоматическое управление электроприводами, включая системы первых пяти групп, но и автоматический выбор наиболее рациональных режимов работы машин. Такие системы называют *системами оптимального управления* или *самонастраивающимися*. Они обычно содержат вычислительные машины, которые анализируют ход технологического процесса и вырабатывают командные сигналы, обеспечивающие наиболее оптимальный режим работы.

На рисунке 2.9 изображена принципиальная электрическая схема дистанционного управления АД с короткозамкнутым ротором, позволяющая включать и выключать его из двух мест. Пуск двигателя производится нажатием кнопки *SB1* или *SB3*, остановка – нажатием кнопки *SB2* или *SB4*. Перед пуском электродвигателя *M* включают автоматический выключатель *QF*, в результате чего на схему управления подается напряжение. При нажатии кнопки *SB1* или *SB3* ток идет по катушке магнитного пускателя *KM*, кроторый срабатывает и замыкает свои силовые контакты в цепи электродвигателя и блок-контакты, шунтирующие кнопки пуска *SB1*, *SB3*. При отпуске кнопки пуска

ее контакт размыкается, но катушка КМ остается включенной через блок-контакт КМ.

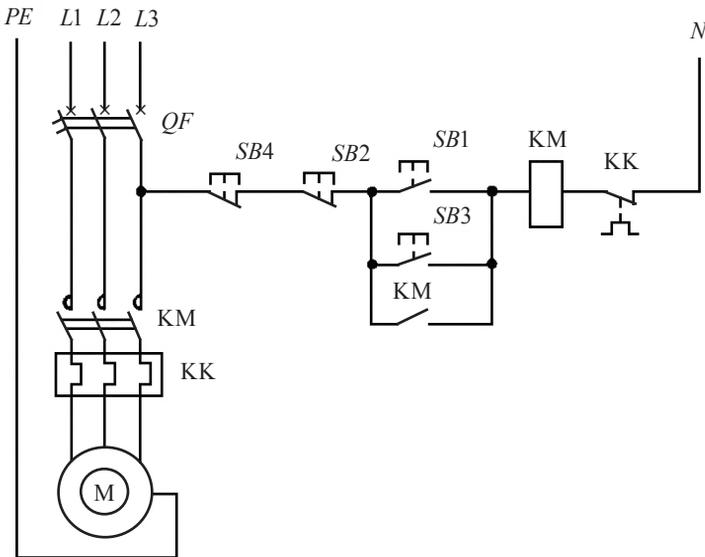


Рис. 2.9. Схема управления трехфазным АД (неревверсивная)

В цепь электродвигателя включены нагревательные элементы теплового реле КК, которое конструктивно объединено с электромагнитным пускателем и служит для защиты электродвигателя от длительных перегрузок. Размыкающий контакт теплового реле включен в цепь катушки КМ. Если сила тока в цепи электродвигателя превысит уставку теплового реле, то в результате нагрева элементов КК произойдет размыкание контакта КК в цепи катушки КМ и электродвигатель отключится магнитным пускателем. Повторный пуск электродвигателя будет возможен только после возврата контакта теплового реле КК в замкнутое состояние нажатием кнопки на тепловом реле (после его охлаждения). Защита от коротких замыканий в силовой цепи осуществляется автоматическим выключателем *QF*.

Схема на рисунке 2.9 обеспечивает так называемую нулевую защиту. При исчезновении напряжения в сети или его значительном снижении эта защита обеспечивает отключение электродвигателя и предотвращает его самопроизвольное включение (самозапуск) после восстановления напряжения.

В реверсивной схеме управления, изображенной на рисунке 2.10, используют электромагнитные пускатели КМ1, КМ2. Пуск двигателя «Вперед» и «Назад» осуществляется нажатием соответственно кнопки *SB1* или *SB3*, а останов – нажатием кнопки *SB2* или *SB4*. При включении пускателя КМ1 ротор электродвигателя вращается в прямом направлении, при включении пускателя КМ2 на обмотку статора подается питание с обратным порядком чередования фаз (меняются местами *L2* и *L3*). Магнитное поле АД, а следовательно, и ротор изменяют направление вращения. Во избежание короткого замыкания, которое может возникнуть при одновременном нажатии кнопок *SB1* и *SB3*, размыкающий контакт пускателя КМ1 включен последовательно с катушкой КМ2, а размыкающий контакт КМ2 – последовательно с катушкой КМ1. В некоторых конструкциях электромагнитных пускателей предусматривается механическая блокировка в виде рычажной системы, предотвращающей втягивание магнитной системы одного пускателя, если включен другой.

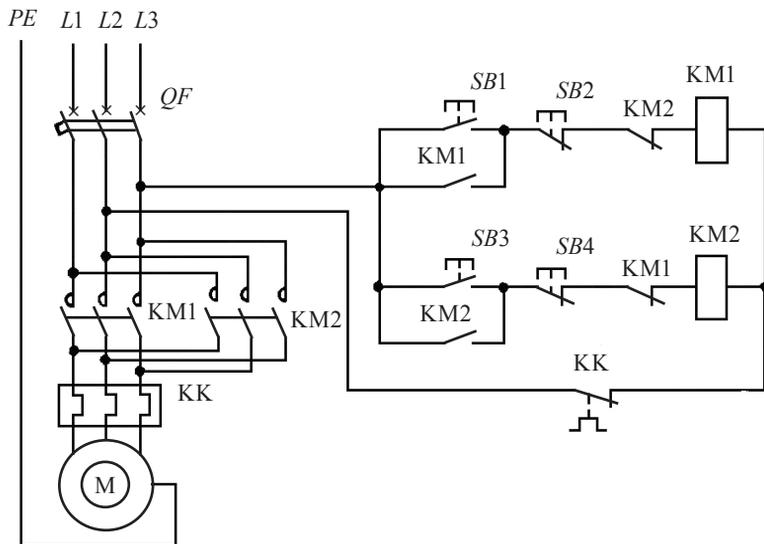


Рис. 2.10. Реверсивная схема управления трехфазным АД

На рисунке 2.11 показана схема управления АД с ограничением пусковых токов с помощью токоограничивающих резисторов *R1*, *R2*, *R3*. При нажатии на кнопку *SB1* включается

пускатель КМ1, силовые контакты которого подключают обмотку статора двигателя к сети через резисторы  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ . По мере разгона электродвигателя сила тока в его цепи снижается. Блок-контакт пускателя КМ1 одновременно с пуском двигателя включает реле времени КТ, контакт которого с выдержкой времени включает катушку пускателя КМ2. При срабатывании пускателя КМ2 размыкается его контакт в цепи катушки КМ1, замыкается блок-контакт КМ2, шунтирующий контакт реле времени КТ, и замыкаются силовые контакты КМ2 в цепи электродвигателя. В результате все контакты КМ1 размыкаются, а обмотка статора электродвигателя подключается в сеть напрямую через силовые контакты КМ2. Эта схема может применяться для включения электродвигателей с тяжелым затяжным пуском.

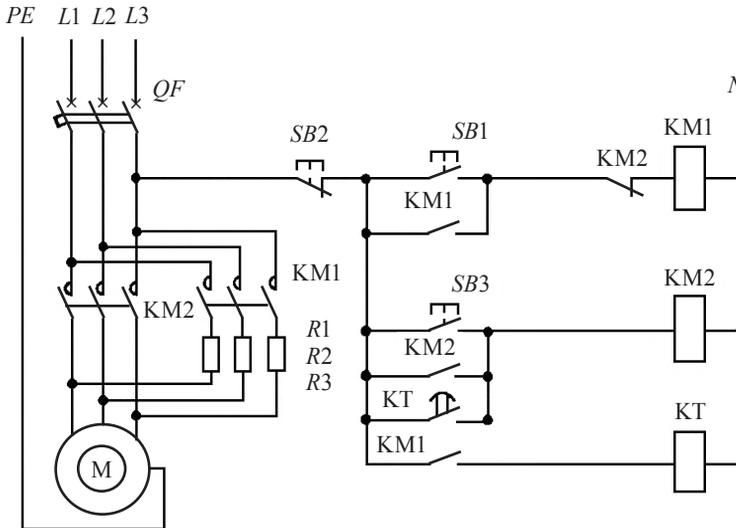


Рис. 2.11. Реверсивная схема управления трехфазным АД с ограничением пусковых токов

## 2.2. ДАТЧИКИ

Датчиком в системе автоматического контроля и регулирования называют специальное устройство, служащее для преобразования измеряемой величины в выходной электрический сигнал.

Датчик обычно состоит из двух взаимосвязанных блоков: чувствительного элемента, называемого также первичным преобразователем, и нормирующего преобразователя. Главным элементом датчика является чувствительный элемент, воспринимающий контролируемую величину и преобразующий ее в электрический сигнал. Состав и конструкция чувствительного элемента зависят от типа измеряемой величины, особенностей размещения датчика.

Чувствительные элементы по физическому принципу могут быть электрические, механические, акустические, оптические, тепловые, гидравлические, радиоактивные, электромагнитные и т. п.

Нормирующий преобразователь представляет собой электронную схему, которая усиливает выходной сигнал чувствительного элемента до величины, достаточной для передачи его на другие элементы системы, а также выполняет другие необходимые преобразования выходного сигнала: масштабирование, линеаризацию, преобразование в заданные единицы измерения, преобразование в цифровую форму, передачу сигнала по выделенным датчику линиям связи другим элементам системы. Текущие значения измеряемой величины в нормирующем преобразователе могут сравниваться с рядом заданных значений (уставок) и накапливаться в памяти.

К датчикам систем автоматик предъявляют следующие требования: определенная однозначная зависимость выходной величины от входной; стабильность характеристик во времени; высокая чувствительность; малая инерционность; отсутствие влияния датчика на технологический процесс и на измеряемую величину; удобство монтажа и обслуживания; соответствие требуемому диапазону изменения измеряемой величины; соответствие существующей измерительной аппаратуре и источникам питания; надежность работы и устойчивость к внешним воздействиям.

Исключительное многообразие датчиков, применяемое в современной автоматике, вызывает необходимость их классификации. Один из главных признаков классификации – измеряемая датчиком физическая величина. В соответствии с этим признаком выделяют датчики линейной и угловой скорости, линейного и углового перемещения, момента, положения, тока, напряжения, магнитного поля, температуры, давления, влажности, излучения и т. д.

Принципы действия датчиков также могут быть весьма различны. Бывают датчики оптические, индуктивные, емкостные, пьезоэлектрические, тензометрические, акустические, вибрационные, на основе эффекта Холла, электромеханические, фотоимпульсные, лазерные, контактные, потенциометрические, терморезистивные, фотодиодные и др.

Основная особенность современных датчиков – цифровая обработка сигналов, которая возможна вследствие использования в их нормирующих преобразователях микроконтроллеров и больших интегральных схем с программируемой логикой. Важным преимуществом цифровой формы представления сигналов датчиков является уменьшение влияния электромагнитных помех при передаче сигналов между элементами САУ.

### 2.2.1. Датчики температуры

Важнейшей разновидностью датчиков являются датчики температуры, поскольку многие технологические процессы требуют ее измерения. Эти датчики нужны для того, чтобы контролировать температуру в помещении, жидкости, твердого объекта или расплавленного металла.

Термопреобразователи сопротивления применяют в системах, где требуется измерять температуру и дистанционно передавать показания. Терморезистивные датчики температуры основаны на принципе изменения электрического сопротивления (полупроводника или металла) при изменении температуры (рис. 2.12). Основным элементом является терморезистор, элемент, изменяющий свое сопротивление в зависимости от температуры окружающей среды. В зависимости от того, возрастает или понижается электросопротивление датчика при понижении температуры, различают полупроводниковые датчики соответственно с положительным или отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Металлические датчики температуры из меди или платины всегда обладают положительным ТКС.

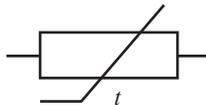


Рис. 2.12. Обозначение терморезистивного датчика температуры на принципиальной электрической схеме

Электрическое сопротивление металлических проводников изменяется согласно уравнению

$$R_1 = R_0(1 + \alpha(T_1 - T_0)), \quad (2.1)$$

где  $R_1$  – сопротивление при температуре  $T_1$ ;  $R_0$  – сопротивление при  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, значение которого равно для платины  $3,9 \cdot 10^{-3}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  и для меди  $4,3 \cdot 10^{-3}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

В настоящее время наиболее популярны металлические термосопротивления из меди и платины. Маркируются они следующим образом: медные – 50М и 100М, платиновые – 50П, 100П, Pt100, Pt500, Pt1000. В маркировке буква указывает на металл, из которого изготовлен чувствительный элемент: М – медь, П, Pt – платина; цифра соответствует значению сопротивления чувствительного элемента при  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .

В таблицах 2.1, 2.2 представлены типичные характеристики двух популярных термометров сопротивления.

Таблица 2.1

#### Градуировка платинового термометра сопротивления 50П

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$R, \text{ Ом}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$R, \text{ Ом}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$R, \text{ Ом}$
-200	8,654	-60	37,7	80	65,69
-180	12,99	-40	42,00	100	69,55
-160	17,28	-20	46,01	120	73,39
-140	21,50	0	50,0	140	77,21
-120	25,68	20	53,95	160	81,00
-100	29,81	40	57,89	180	84,77
-80	33,0	60	61,80	200	88,51

Таблица 2.2

#### Градуировка медного термометра сопротивления 50М

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$R, \text{ Ом}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$R, \text{ Ом}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$R, \text{ Ом}$
-50	39,24	20	54,28	120	75,67
-40	41,40	40	58,56	140	79,95
-30	43,56	60	62,9	160	84,21
-20	45,28	80	67,12	180	88,51
0	50,0	100	71,40	200	92,79

Термометр сопротивления представляет собой конструкцию, в которой проволока из платины или меди намотана на специ-

альный диэлектрический каркас, размещенный внутри герметичного защитного корпуса, удобного по форме для монтажа (рис. 3, вклейка). Жаропрочный корпус датчика призван защитить его от механических повреждений в процессе измерения температуры того или иного объекта. Конструкция термометра сопротивления схематически показана на рисунке 2.13.

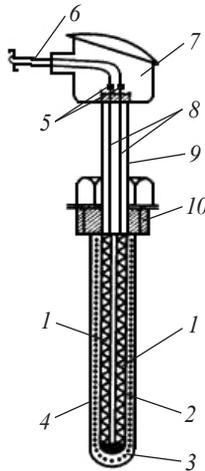


Рис. 2.13. Конструкция термометра сопротивления:  
 1 – чувствительный элемент из платиновой или медной проволоки в форме спирали, расположенный на керамическом стержне;  
 2 – пористый керамический цилиндр; 3 – керамический порошок; 4 – защитная наружная трубка из нержавеющей стали;  
 5 – клеммы для присоединения выводного провода; 6 – провод к фиксирующему прибору; 7 – головка термометра со съёмной крышкой; 8 – токопередающие выводы; 9 – наружная защитная трубка из нержавеющей стали; 10 – втулка с резьбой для установки в трубопровод, имеющий патрубки с внутренней резьбой

При измерении температуры с помощью термометра сопротивления на чувствительный элемент подается стабилизированный ток возбуждения. В результате на датчике возникает разность потенциалов, пропорциональная сопротивлению, а значит, и измеряемой температуре. Таким образом, измерение температуры сводится к измерению напряжения на чувствительном элементе. Поскольку чувствительный элемент подсоединяется к измерительному прибору соединительными проводами и имеет сопротивление, сравнимое с сопротивлением соединительных

проводов, то сопротивление соединительных проводов будет вносить погрешность в результат измерения температуры. Поэтому необходимо исключить или уменьшить влияние этого дополнительного сопротивления на результаты измерения. Различают двух-, трех- и четырехпроводные схемы подсоединения термометров сопротивления к измерительному прибору.

При двухпроводной схеме включения (рис. 2.14, *a*) термометр сопротивления и сопротивление соединительных проводов последовательно включены в одну из ветвей измерительной схемы. Влияние сопротивления подводящих проводов не устраняется. Напряжение измеряется не только на чувствительном элементе (ЧЭ), но и на соединительных проводах. При этом нужно иметь в виду, что сопротивление соединительных проводов проявляет себя двумя способами. Во-первых, изменяется эквивалентное сопротивление датчика, что приводит к смещению в измерении температуры. Во-вторых, сопротивление соединительных проводов само по себе зависит от температуры окружающей среды. Двухпроводная схема может быть использована в случае, если не требуется высокой точности измерений и сопротивлением подводящих проводов ( $r_1, r_2$ ) можно пренебречь по сравнению с  $R_t$ :

$$U_{\text{изм}} = U_t + U_{r_1} + U_{r_2}. \quad (2.2)$$

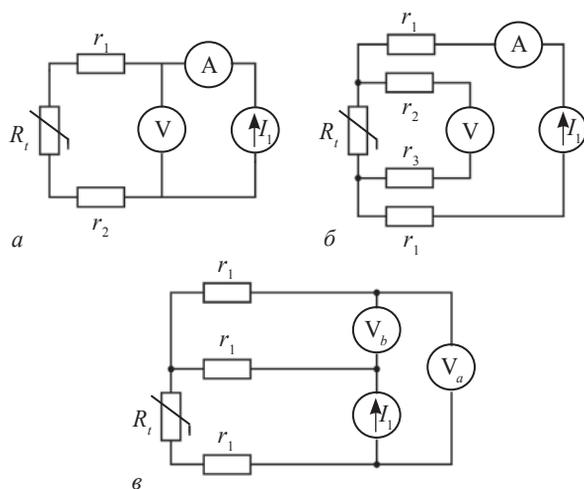


Рис. 2.14. Схемы подключения термометра сопротивления: *a* – двухпроводная; *б* – четырехпроводная; *в* – трехпроводная

В четырехпроводной схеме (рис. 2.14, б) питание ЧЭ током возбуждения производится с помощью одних проводов, а измерение разности потенциалов на ЧЭ – с помощью других. Если измерение напряжения производится высокоомным вольтметром (ток через  $r_2$  и  $r_3$  не течет), то влияние сопротивления всех проводов полностью исключается. Таким образом, четырехпроводная схема обеспечивает наивысшую точность измерения температуры термометром сопротивления за счет того, что сопротивление проводов не оказывает влияния на измерение величины сопротивления термометра. Это достигается использованием отдельной пары проводов для измерения напряжения на термометре и отдельной пары проводов для возбуждения термометра.

Компромиссом между двухпроводной и четырехпроводной схемой подключения датчика температуры  $R_t$  является трехпроводная схема (рис. 2.14, в). Вольтметр  $V_a$  измеряет сумму напряжений на  $R_t$  и на нижнем по схеме токоподводящем проводе. Вольтметр  $V_b$  измеряет падение напряжения только на верхнем по схеме проводе. Если оба провода будут иметь одинаковое сопротивление, то разница показаний вольтметра  $V_a$  и вольтметра  $V_b$  даст падение напряжения на датчике:

$$U_t = U_a - U_b. \quad (2.3)$$

Если сопротивления двух соединительных проводов точно идентичны, то рассчитанное напряжение будет точно соответствовать напряжению на датчике, и ошибки за счет паразитного сопротивления соединительных проводов не будет. Но любая разница в сопротивлении проводов тут же скажется на точности измерений. Таким образом, схема с тремя соединительными проводами уменьшает стоимость соединения (за счет экономии кабельной продукции по отношению к четырехпроводной схеме соединений), однако применение данной схемы соединений отрицательно сказывается на точности измерений.

При этом необходимо понимать, что в реальном применении термосопротивления с трехпроводной схемой соединений показывающие вольтметры не используют. На практике при использовании термосопротивления применяют аналоговые или цифровые схемы, которые определяют величины напряжений и выполняют необходимые расчеты, чтобы компенсировать падение напряжения на сопротивлении соединительных проводов. Вольтметры (см. рис. 2.14) служат только для того, чтобы ил-

люстрировать фундаментальные понятия, а не демонстрировать практические схемотехнические решения.

Полупроводниковые терморезисторы имеют чувствительный элемент из полупроводника, электрическое сопротивление которого зависит от температуры. Полупроводниковый чувствительный элемент получают методами порошковой металлургии, обрабатывая халькогениды, галогениды и оксиды определенных металлов, придавая им различные формы, например форму дисков или стержней различных размеров, больших шайб, средних трубок, тонких пластинок, маленьких бусинок, размерами от единиц микрон до десятков миллиметров (рис. 2.15, а).

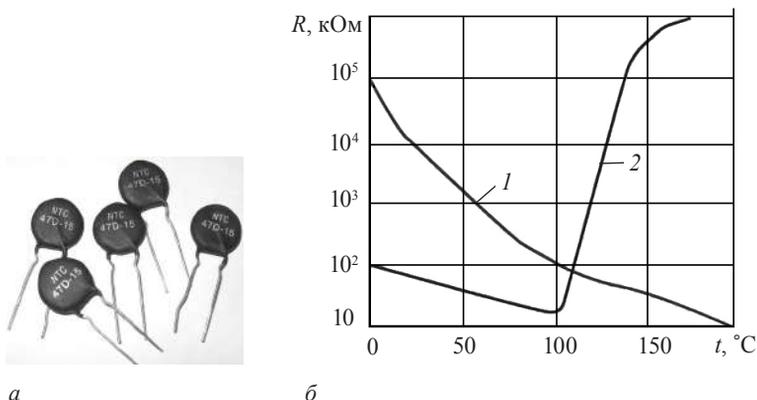


Рис. 2.15. Внешний вид (а) и зависимость от температуры (б) полупроводниковых терморезисторов:  
1 — термистора; 2 — позистора

Одним из преимуществ полупроводниковых терморезисторов по сравнению с металлическими является большое значение температурного коэффициента, т. е. значительное изменение сопротивления в зависимости от температуры (порядка 2–10 % на  $^{\circ}C$ , см. рис. 2.15, б). По виду зависимости сопротивления чувствительного элемента от температуры полупроводниковые терморезисторы разделяют на две группы: термисторы и позисторы. Первые изготовляют из смеси оксидов металлов (железа, марганца, никеля, меди, кобальта, хрома, титана и др.), вторые — из керамического титаната бария с примесями. Термисторы обладают отрицательным ТКС (по этой причине термисторы еще называют NTC-термисторами), а позисторы — положительным ТКС (поэтому их называют PTC-термисторами).

Наиболее простым вариантом подключения полупроводникового терморезистора является схема, приведенная на рисунке 2.16. При выборе номинала резистора  $R_A$ , примерно равного сопротивлению  $R_t$  в районе измеряемых температур, значения  $U$  будут изменяться ближе к линейным, что обеспечит бóльшую точность при интерполяции табличных значений.

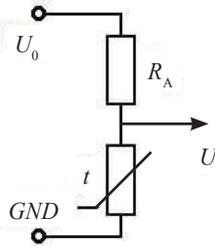


Рис. 2.16. Схема подключения термистора

Выбирая номиналы  $R_A$  и  $R_t$ , следует учесть, что протекающий через терморезистор ток вызывает его нагрев и, как следствие, искажение показаний. Желательно, чтобы мощность на терморезисторе не превышала 1 мВт. А значит, при напряжении  $U_0 = 5\text{В}$   $R_A$  должен быть, как минимум, 10 кОм. Сопротивление терморезистора в измеряемом диапазоне должно иметь примерно тот же порядок.

Термоэлектрические контактные датчики – термопары – работают в интервале температур от  $-200$  до  $+2500$  °С и выше. В основе работы термопар лежит термоэлектрический эффект, который заключается в том, что если последовательно соединить друг с другом два разнородных металлических проводника, образуя таким образом замкнутую электрическую цепь, и в одном месте соединения проводников произвести нагрев, то в цепи возникает ЭДС (рис. 2.17). Данную электродвижущую силу называют термоЭДС. Под действием термоЭДС в замкнутой цепи начинает протекать электрический ток. Место нагрева обычно называют горячим спаем. Место, где нет нагрева, – холодный спай. Если в разрыв цепи подключить гальванометр или микровольтметр, можно измерить величину термоЭДС, которая будет составлять несколько милли- или микровольт. Значение термоЭДС будет зависеть от величины нагрева в месте соединения проводников и от величины температуры в месте соединения проводников, где нагрев не происходит. То есть значение термоЭДС зависит от разности температур между холодным и горячим спаем.

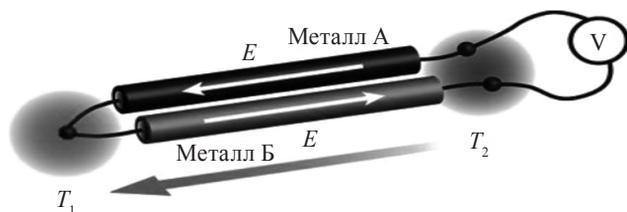


Рис. 2.17. Принцип работы термопары на основе термоэлектрического эффекта

Подключив термопару, являющуюся в данном случае чувствительным элементом, к измерительному преобразователю, возникающую разность потенциалов можно преобразовать в определенное цифровое значение температуры в месте соединения проводников термопары.

### 2.2.2. Датчики (реле) времени

При построении схем управления электроприводом по принципу времени в качестве датчиков используются различные реле времени: электромагнитные, моторные, электронные и механические.

Электромагнитное реле времени (рис. 2.18) — устройство, состоящее из неподвижной части магнитопровода 2, на котором установлена катушка 1; подвижной части магнитной системы — якоря 6 с контактами 8 и 9. При отсутствии напряжения на катушке якорь с помощью пружины 4 удерживается в поднятом положении.

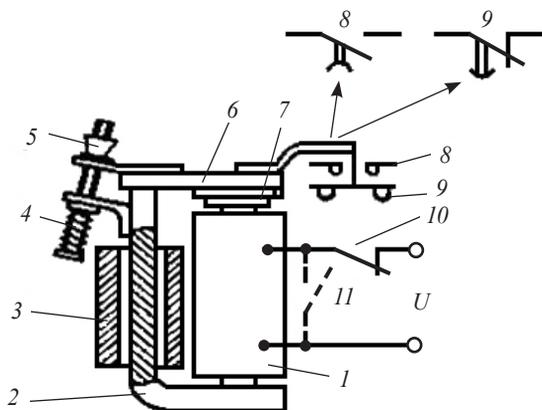


Рис. 2.18. Устройство электромагнитного реле времени

Особенностью конструкции реле времени является наличие в магнитопроводе массивной медной трубки 3 (гильзы), которая обеспечивает выдержку времени при отключении катушки реле от источника питания. Рассмотрим этот процесс подробнее.

Реле времени включается, как и обычное электромагнитное реле, подачей напряжения на катушку при замыкании контакта 10. При этом якорь, притягиваясь к сердечнику, осуществляет без выдержки времени переключение контактов 8 и 9. Необходимая выдержка времени обеспечивается замедлением возврата якоря в исходное положение, так как при снятии с катушки напряжения спадающий магнитный поток создает в гильзе вихревые токи, которые (правило Ленца) своим магнитным потоком поддерживают основной поток. Другими словами, наличие гильзы замедляет (демпфирует) спад магнитного потока, а значит, и перемещение якоря и контактной системы в исходное (отключенное) положение. Таким образом обеспечивается выдержка времени при размыкании замыкающего контакта 8 и замыкании размыкающего контакта 9.

Выдержка времени может регулироваться ступенчато за счет латунной немагнитной прокладки 7 определенной толщины, устанавливаемой на якорь (уменьшение толщины прокладки вызывает увеличение выдержки реле и наоборот), или плавно за счет изменения натяжения пружины 4 с помощью гайки 5.

Выдержку времени электромагнитного реле можно обеспечить без установки гильзы 3, закорачивая катушку после отключения ее от сети. В таком случае замкнутый контур, образованный катушкой и замыкающим ее контактом 11, будет играть роль электромагнитного демпфера. Однако выдержка времени в этом случае получается меньше, чем при использовании гильзы. Реле серии РЭВ обеспечивают выдержку времени от 0,25 до 5,5 с.

*Моторное (электрохимическое) реле времени* состоит из специального низкоскоростного двигателя и редуктора с большим передаточным числом, на выходном валу которого имеется рычаг, устанавливаемый в начальное положение по шкале уставок времени (рис. 4, вклейка). Рычаг управляет работой вспомогательных контактов, которыми включается выходное электромагнитное реле. Работает моторное реле времени следующим образом. Начало отсчета времени соответствует подаче напряжения на двигатель, который, включившись, начинает вращаться и

медленно поворачивать рычаг на валу редуктора. Через заданное время, определяемое начальным положением, рычаг доходит до вспомогательных контактов и замыкает их, что приводит к включению выходного реле, которое одним из своих контактов отключает двигатель, завершая отсчет выдержки времени.

В *электронных реле времени* (рис. 5, вклейка) обычно используются различные полупроводниковые элементы (чаще всего транзисторные) и конденсаторы, время разряда или заряда которых и определяет выдержку времени. В исходном положении реле (рис. 2.19) внешний управляющий контакт  $S$  замкнут и на базу транзистора  $VT1$  подается отрицательный потенциал источника питания  $GB$ . Данный транзистор при этом открыт, а потенциал базы транзистора  $VT2$  положительный по отношению к его эмиттеру, и транзистор закрыт. В результате выходное реле  $KV$  отключено. В исходном положении конденсатор  $C$  заряжен с показанной на рисунке полярностью обкладок. Команда на начало отсчета времени подается при размыкании внешнего управляющего контакта  $K$ . После этого начинается разряд конденсатора  $C$  через резистор  $R2$  и переход «эмиттер – база» транзистора  $VT1$ . В результате разряда конденсатора транзистор  $VT1$  закроется, на базе транзистора  $VT2$  появится отрицательный потенциал и транзистор откроется. При этом по обмотке реле  $KV$  начнет протекать ток, реле сработает и переключит свои контакты. Отсчет времени закончится.

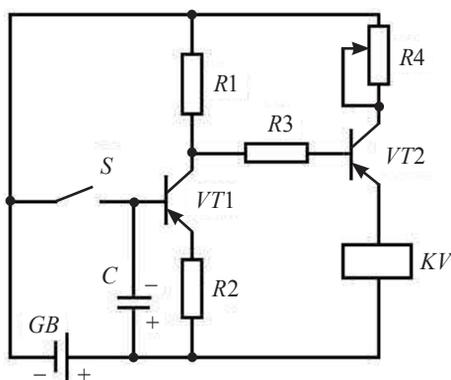


Рис. 2.19. Принципиальная электрическая схема электронного реле времени

Выдержка времени такого реле определяется временем разряда конденсатора  $C$ , которое зависит от его емкости и сопротивления резистора  $R2$ . Регулируя эти величины, можно установить требуемую выдержку времени реле. Электронные реле времени обеспечивают выдержку времени от 0,1 с до 10 мин.

Различают немало алгоритмов работы реле времени, ниже на схемах будут рассмотрены наиболее часто применяемые. На соответствующих схемах (рис. 2.20) на верхнем графике показано напряжение питания, подаваемое на реле, на нижнем – выходное напряжение, идущее от реле на исполнительное устройство (на нагрузку). Стрелками показываются диапазоны установленной задержки срабатывания  $T$ .

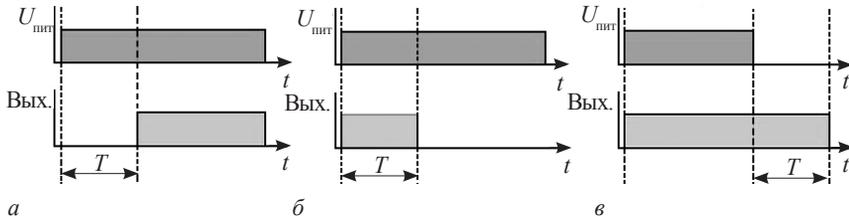


Рис. 2.20. Алгоритмы работы реле времени:

$a$  – с задержкой включения;  $b$  – с генерированием выходного сигнала заданной длительности;  $в$  – с задержкой выключения

Алгоритм 1 – реле времени с задержкой включения (см. рис. 2.20,  $a$ ). После включения питания выходной сигнал будет передан на нагрузку по истечении установленной паузы  $T$ .

Алгоритм 2 – выходной сигнал в данном варианте передается на нагрузку сразу после включения питания. Однако через установленный интервал  $T$  прерывается (см. рис. 2.20,  $b$ ).

Алгоритм 3 – с задержкой выключения (см. рис. 2.20,  $в$ ). Включение нагрузки происходит одновременно с подачей общего питания. Однако выключение производится после выдержки паузы  $T$  с момента снятия напряжения питания реле.

Эти алгоритмы можно назвать базовыми, из которых, как из «кирпичиков», могут выстраиваться куда более сложные схемы, реализованные в реле различных конструкций и моделей. Показанные на рисунке 2.20 графические схемы называют *функциональными диаграммами реле*, их обычно указывают на корпусе прибора (см., например, рис. 5, вклейка) или в технической до-

кументации. То есть при выборе требуемого изделия для определенных нужд, умея читать такие диаграммы, можно отыскать подходящую модель.

### 2.2.3. Датчики перемещения

Дискретные датчики перемещения (положения), называемые также конечными выключателями, регистрируют наличие или отсутствие наблюдаемого объекта в определенной точке пространства. Эта точка именуется точкой настройки или точкой срабатывания датчика. Сигнал на входе датчика может принимать только два значения – «объекта в точке настройки нет» и «объект в точке настройки есть». Выходом датчика является участок электрической цепи. В зависимости от входного сигнала ситуация в выходной цепи может быть двух видов – «выходная цепь разомкнута» и «выходная цепь замкнута». Как правило, эти датчики регистрируют переход объектом границы опасной зоны или окончание рабочего хода объекта. Отсюда второе распространенное название дискретных датчиков положения – конечные выключатели. Непосредственно с датчиком контактируют управляющие элементы, крепящиеся к наблюдаемому объекту. Если объект в точке настройки прекращает движение (работает «в упор»), то управляющий элемент именуется упором (рис. 2.21, *а*). Если объект после контакта с датчиком может продолжить перемещение (работает «на проход»), управляющий элемент называется линейкой (рис. 2.21, *б*).



Рис. 2.21. Рабочие головки и рычаги дискретных контактных датчиков перемещения: *а* – плунжерная; *б* – неселективная роликовая

Конструкция выключателя приведена на рисунке 2.22, *а*. Плунжер 1 сменной рабочей головки 2 связан с ползуном 3 контактного мостика 6 через герметичную мембрану 4. Ползун снабжен возвратной пружиной 10. Во избежание поломки кон-

тактов при большом ходе плунжера контактный мостик снабжен компенсаторной пружиной 11. В зависимости от положения плунжера контактный мостик может замыкать цепь или между нормально замкнутыми 5, или между нормально разомкнутыми 7 контактами. Все элементы, за исключением рабочей головки, размещаются в герметичном корпусе из силуминового сплава 12. Корпус снабжен тремя резьбовыми гнездами. При монтаже ненужные гнезда закрываются заглушками 9, а в остальные вворачиваются герметичные сальниковые вводы проводов 8. Так как электрическая часть выключателя полностью герметична, выключателю присвоена категория размещения УЗ (под открытым небом, в умеренном климате). В нормальном состоянии выключателя контактный мостик замыкает контакты 5. При нажатии управляющим упором на плунжер сначала размыкаются контакты 5, а при продолжении хода плунжера замыкаются контакты 7. Свободный ход поглощается пружиной 11.

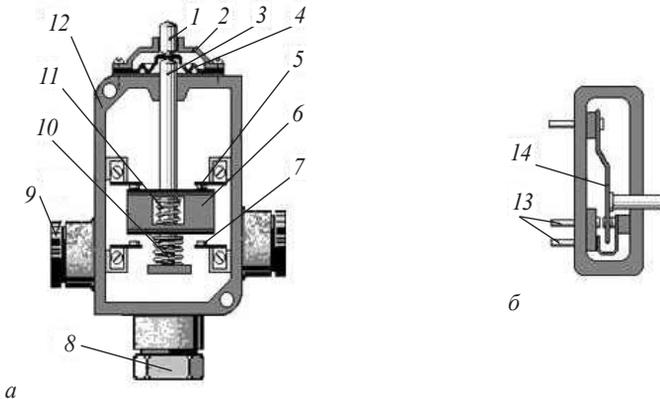


Рис. 2.22. Дискретные контактные датчики перемещения:  
*а* – конечный выключатель ВПК 211; *б* – микропереключатель типа МП; 1 – плунжер; 2 – рабочая головка; 3 – ползун; 4 – мембрана; 5 – нормально замкнутые контакты; 6 – контактный мостик; 7 – нормально разомкнутые контакты; 8 – сальниковый ввод; 9 – заглушка; 10 – возвратная пружина; 11 – компенсаторная пружина; 12 – корпус; 13 – выходные клеммы; 14 – контактный мостик

Конструкция типового микропереключателя приведена на рисунке 2.22, *б*. Как правило, микропереключатели обладают от-

крытыми выходными клеммами 13 под пайку или болтовое присоединение проводов. Электромеханическая часть микропереключателя не герметична. Возвратной пружиной часто является выполненный в виде рессоры из пермаллоя (железно-никелевый сплав, обладающий хорошими механическими, магнитными и электрическими свойствами) контактный мостик 14. Компенсаторные пружины, как правило, отсутствуют. В результате микропереключатели особенно чувствительны к точности установки управляющих элементов.

Общее достоинство контактных дискретных датчиков перемещения прямого действия — относительная простота конструкции.

Недостатком дискретных датчиков перемещения прямого действия является зависимость срока службы датчика от скорости перемещения управляющего элемента. Так, для путевого контактного выключателя ВПК-2112-БУ2 при скорости перемещения управляющего элемента более 0,5 м/с наработка на отказ с вероятностью 95 % составляет  $20 \cdot 10^6$  циклов срабатывания. При меньшей скорости наработка на отказ уменьшается до  $10^6$  циклов. Дело в том, что при малых зазорах между контактами возникает электрический пробой воздушного слоя — искрение. При медленном расхождении контактов искрение происходит относительно длительное время, что приводит к выгоранию контактов.

Искрение контактов возможно только в воздушной среде, содержащей кислород. В среде инертных газов (например, аргон, гелий) и в вакууме электрический разряд не происходит. При этом значительно уменьшаются размеры контактов, а срок службы становится практически неограниченным (по паспорту — до  $10^9$  циклов срабатывания). Это удалось реализовать в герметичных контактных группах — герконах. Герконы являются составной частью герконового датчика положения и реле.

*Герконовые датчики положения* могут быть магнитозамыкающие (рис. 2.23, а) и магнитозамкнутые (рис. 2.23, б). Геркон представляет собой миниатюрную стеклянную ампулу, заполненную инертным газом, чаще всего аргоном. Ранее выпускали герконы с вакуумными ампулами. В них впаяны упругие нормально разомкнутые контакты из пермаллоя. Управляющим элементом магнитозамыкающего герконового датчика является постоянный магнит. При отсутствии магнита контакты за счет собственной

упругости разомкнуты. При приближении магнита контакты, притягиваясь к нему, замыкаются.

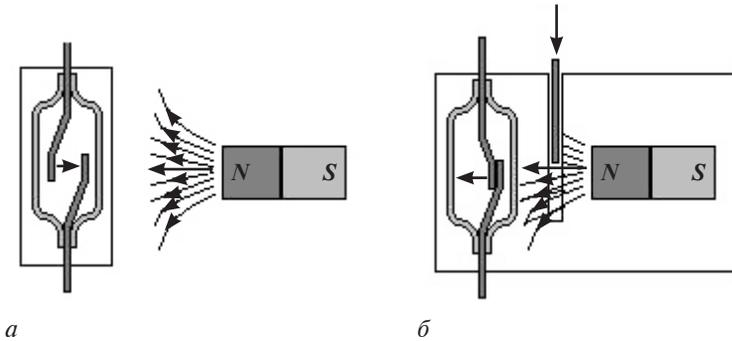


Рис. 2.23. Герконовые датчики положения:  
а – магнитозамыкающий; б – магнитозамкнутый

У магнитозамкнутого герконового датчика магнит смонтирован в одном корпусе с герконом, постоянно замыкая его контакты. Управляющим элементом является экран, вводимый в зазор между магнитом и герконом. Магнитная связь при этом нарушается, и контакты размыкаются.

Герконовые датчики положения обладают многими достоинствами. Они надежны (долговечность их ограничивается только усталостной изгибной выносливостью контактов), миниатюрны, удобны в монтаже. Вместе с тем вибрация и удары могут привести к ложному срабатыванию. Последнее резко ограничивает сферу их применения. Так, отечественные промышленные роботы первоначально комплектовались преимущественно датчиками такого типа. Но удары в конце хода плохо демпфированных приводов приводили к частым ложным срабатываниям, что заставило отказаться от их применения. Распространение герконовые датчики положения получили в автоматизированном металлорежущем оборудовании, охранной сигнализации, клавиатуре ЭВМ.

*Индуктивные датчики* служат для бесконтактного получения информации о перемещениях рабочих органов машин, механизмов, роботов и преобразования этой информации в электрический сигнал. Простейший индуктивный датчик (однотактный) представляет собой катушку индуктивности 1 с железным сердечником 2 и подвижным якорем 3, отделенным от сердечника воздушным зазором (рис. 2.24, а).

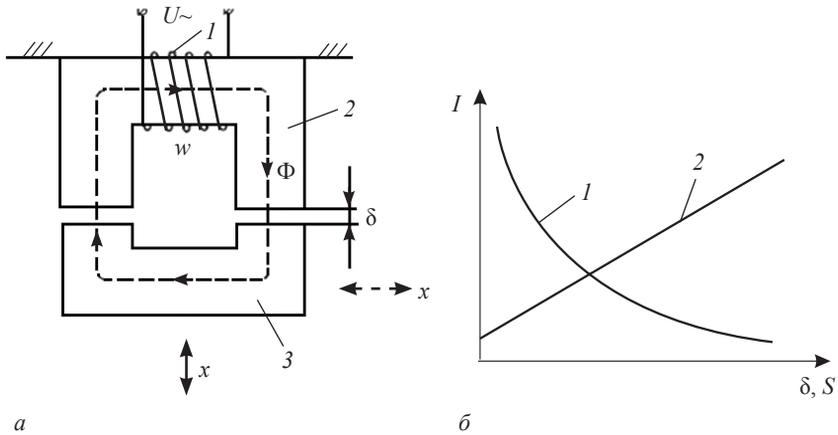


Рис. 2.24. Принцип действия (а) и статическая характеристика (б) индуктивных датчиков:

1 – с изменяющимся зазором  $\delta$ ; 2 – с изменяющейся площадью сечения зазора  $S$

Катушка индуктивности с сердечником, называемая статором датчика, закрепляется неподвижно, а якорь соединяется механически с подвижной частью ОУ, перемещение которой нужно преобразовывать в электрический сигнал. При перемещении якоря изменяется сопротивление магнитной цепи датчика вследствие изменения воздушного зазора  $\delta$  между статором и якорем (при вертикальном движении якоря) или площади воздушного зазора  $S$  (при горизонтальном движении якоря).

Если пренебречь магнитным сопротивлением стали, потоками рассеяния и выпучивания, то индуктивность обмотки

$$L = w^2 \frac{\mu_0 S}{2\delta}, \quad (2.4)$$

где  $w$  – число витков обмотки;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\delta$  – величина зазора, м;  $S$  – площадь сечения зазора, м<sup>2</sup>.

Таким образом, индуктивность обмотки  $L$  и протекающий по ней ток  $I$  могут изменяться за счет изменения зазора  $\delta$  или его площади  $S$ . Формула (2.4) устанавливает функциональную связь между перемещением якоря индуктивного датчика (при перемещении изменяется или  $\delta$ , или  $S$ ) и индуктивностью катушки датчика.

У индуктивных датчиков с изменяющимся воздушным зазором статическая характеристика  $L = f(\delta)$  нелинейная (рис. 2.24, б, кривая 1) и при больших зазорах ( $\delta > 1$  мм) чувствительность датчика уменьшается. Такие датчики используют при ограниченном диапазоне перемещения якоря — до 1 мм, а начальная рабочая точка выбирается в области характеристики, где она имеет наибольшую крутизну и приближается к линейной. Чувствительность датчиков с изменяющимся воздушным зазором высокая — до 0,2 мкм.

У индуктивных датчиков с изменяющейся площадью воздушного зазора статическая характеристика  $L = f(S)$  линейная, диапазон перемещения якоря шире — до 8 мм, но чувствительность меньше — до 0,3 мкм (рис. 2.24, б, кривая 2).

Изменение индуктивности катушки датчика  $L$  приводит к изменению ее индуктивного сопротивления:

$$X_L = \omega L, \quad (2.5)$$

где  $\omega$  — круговая частота питающего напряжения, рад/с.

Следовательно, происходит и изменение полного сопротивления катушки:

$$Z = \sqrt{R_a^2 + X_L^2}, \quad (2.6)$$

где  $R_a$  — активное сопротивление катушки датчика, Ом.

Ток  $I$ , протекающий в катушке датчика под действием приложенного переменного напряжения  $U$ , также изменяется при перемещении якоря и может служить выходным сигналом датчика (выходной характеристикой). Условно принцип работы индуктивных датчиков можно представить в виде цепи преобразований, происходящих при перемещении якоря датчика (для датчиков с изменяющимся воздушным зазором):

$$x \uparrow \rightarrow \delta \uparrow \rightarrow \Phi \downarrow \rightarrow L \downarrow \rightarrow X_L \downarrow \rightarrow Z \downarrow \rightarrow I \uparrow.$$

Однотактные индуктивные датчики имеют высокую чувствительность и надежность, практически неограниченный срок службы, большую мощность выходного сигнала (до нескольких ватт). К недостаткам индуктивных датчиков следует отнести нереверсивность характеристики, небольшой диапазон перемещений якоря, наличие тока холостого хода и электромагнитной силы притяжения между якорем и статором, влияние колебаний амплитуды и частоты напряжения питания.

### 2.2.4. Датчики скорости

Наиболее распространенными датчиками скорости вращения являются аналоговые датчики – тахогенераторы и дискретные датчики – преобразователи скорости вращения в частоту импульсов.

Тахогенераторы постоянного тока служат для измерения частоты вращения (скорости вращения) по значению выходного напряжения, а также для получения электрических сигналов, пропорциональных частоте вращения вала в схемах автоматического регулирования. Тахогенератор постоянного тока представляет собой генератор малой мощности с электромагнитным независимым возбуждением (рис. 2.25, а) или с возбуждением постоянными магнитами.

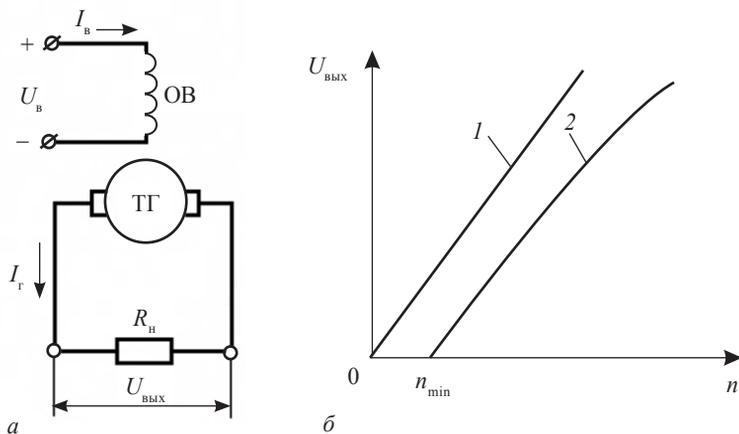


Рис. 2.25. Принципиальная схема (а), выходная характеристика (б) тахогенератора постоянного тока

Обмотка возбуждения  $OB$  подключается к источнику постоянного напряжения  $U_{в}$ . При этом тахогенератор приходит в состояние возбуждения, и если его якорь приводится в движение с некой частотой, на выходе он начнет выдавать постоянное напряжение  $U_{вых}$ . Так как ЭДС, наводимая в обмотках ротора, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока в обмотках в соответствии с законом Фарадея, то и выходное напряжение тахогенератора, снимаемое со щеток коллектора, оказывается прямо пропорциональным скорости вращения ротора  $n$ :

$$U_{\text{вых}} = c_U n, \quad (2.7)$$

где  $c_U$  — крутизна выходной характеристики, В/(об/мин).

Наибольшая крутизна у выходной характеристики, соответствующей режиму холостого хода тахогенератора, когда обмотка якоря разомкнута ( $R_n = \infty$ ). С ростом тока нагрузки (уменьшением  $R_n$ ) крутизна выходной характеристики уменьшается (рис. 2.25, б). У современных тахогенераторов постоянного тока  $c_U = (6 \dots 260) \cdot 10^{-3}$  В/(об/мин).

Наиболее точная работа тахогенератора соответствует прямолинейной выходной характеристике (см. рис. 2.25, б, кривая 1). Однако в реальных тахогенераторах выходная характеристика не прямолинейна (кривая 2), и к тому же она выходит не из начала осей координат. Основная причина криволинейности характеристики — реакция якоря, поэтому уменьшению криволинейности выходной характеристики способствует включение на выход тахогенератора приборов с большим внутренним сопротивлением, так как при уменьшении тока якоря ослабляется действие реакции якоря. В современных тахогенераторах отклонение выходной характеристики от прямолинейной составляет 0,5–3,0 %.

Принцип работы простейших дискретных датчиков скорости вращения заключается в счете числа оборотов  $n$  в единицу времени. В простейшем оптическом датчике скорости вращения (рис. 2.26) используется диск  $I$  с  $K$  отверстиями (прорезями). Этот диск монтируется на вал, скорость вращения которого требуется измерить. По одну сторону диска устанавливается источник света  $2$ , по другую — приемник света  $3$ , в качестве которого может быть использован фотодиод или фототриод. При вращении вала, а вместе с ним и диска свет, попадающий на приемник, прерывается  $K$  раз за один оборот, и частота следования импульсов от фотоприемника будет равна

$$f_{\text{имп}} = Kn, \quad (2.8)$$

где  $n$  — измеряемая скорость вращения.

Эти импульсы от фотоприемника воспринимаются электронной схемой, усиливаются и формируются в виде потока однородных импульсов напряжения или тока.

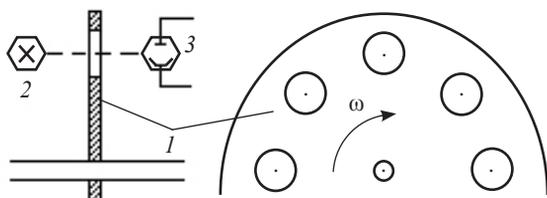


Рис. 2.26. Устройство оптического датчика скорости вращения

Магниторезистивные датчики скорости вращения преобразуют измеряемую неэлектрическую величину в изменение сопротивления ферромагнитных материалов. Принцип действия основан на магниторезистивном эффекте. Этот эффект заключается в том, что некоторые ферромагнитные материалы изменяют свое электрическое сопротивление при воздействии магнитного поля. Для применения магниторезистивного датчика скорости вращения на вал устанавливают зубчатое колесо с  $K$  зубцами или используют имеющуюся на объекте шестерню из магнитного материала. На некотором расстоянии от этого зубчатого колеса монтируют магнит с полюсными наконечниками так, чтобы расстояние по дуге между ними было кратно шагу зубчатого колеса (рис. 2.27).

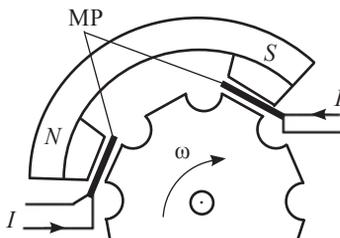


Рис. 2.27. Устройство магниторезистивного датчика скорости вращения

На полюсных наконечниках магнита устанавливают магниторезисторы, сопротивление которых увеличивается при совпадении зубцов колеса с полюсами магнита. За один оборот колеса или шестерни количество таких совпадений будет равно  $K$ . При питании постоянным током  $I$  магниторезистора (MP) возникнет  $K$  импульсов напряжения, которые затем могут быть усилены и из них сформируются импульсы одинаковой формы. Частота импульсов равна  $f_{\text{имп}} = K\omega$ .

### 2.2.5. Датчики тока

Точность измерения электрического тока и напряжения является важным условием надежности и безопасности функционирования электронной аппаратуры. Существует множество методов измерения тока, однако в промышленности наиболее широко применяют три: резистивный, на основе эффекта Холла и трансформатора тока.

Самый простой способ измерения тока – применить резистивный датчик тока, состоящий из резистора с незначительным сопротивлением – шунта, включенного последовательно с нагрузкой, где падение напряжения будет пропорционально протекающему току. Резистор должен быть низкоомным и высокоточным, чтобы не вносить дополнительные потери мощности в нагрузку и не ухудшать инструментальную погрешность измерений. Шунт представляет собой сопротивление  $R_{ш}$ , включаемое последовательно в цепь измеряемого тока  $I_{изм}$  (рис. 2.28). Падение напряжения на шунте  $U_{ш}$  подается на измерительный прибор (вольтметр) или на усилитель (измерительную схему). В данной схеме включения шунт используют как преобразователь тока в напряжение, которое при условии  $R_{ш} \ll R_{вх}$  определяют по формуле

$$U_{ш} = R_{ш} I_{изм}, \quad (2.9)$$

где  $U_{ш}$  – выходное напряжение на шунте, В;  $R_{ш}$  – сопротивление шунта, Ом;  $I_{изм}$  – измеряемый ток, А.

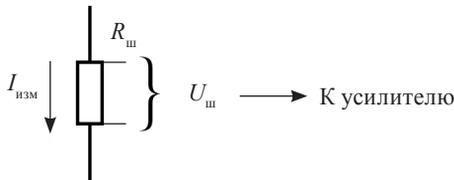


Рис. 2.28. Схема включения шунта

В зависимости от сопротивления в качестве шунта могут быть использованы медный провод на катушке, металлическая пластина либо нормализованный (стандартный) резистор с малым допуском отклонения сопротивления.

Наиболее совершенным и оптимальным по стоимости решением этой задачи является применение датчиков тока и напряжения на основе эффекта Холла. Такие датчики позволяют обе-

спечить высокую точность и скорость измерений. Их применяют для организации обратной связи в электроустановках, для контроля параметров электрических цепей, а также позволяют организовать гальваническую развязку в промышленных приводах, преобразователях напряжения, сварочной аппаратуре, системах электроснабжения и прочей аппаратуре.

Эффект Холла заключается в возникновении поперечной разности электрических потенциалов  $U_x$  в проводнике с постоянным током  $I$ , находящимся под воздействием магнитного поля  $B$  (рис. 2.29).

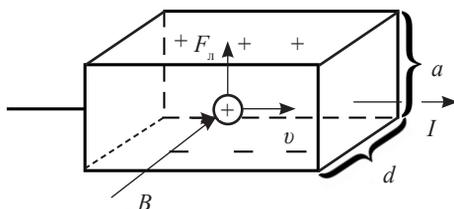


Рис. 2.29. Явление эффекта Холла

Если проводящую пластину с током  $I$  поместить в поперечное ( $\vec{B} \perp \vec{I}$ ) однородное магнитное поле, то между гранями, параллельными направлению тока и магнитной индукции, возникает разность потенциалов (холловская).

На положительные носители действует сила Лоренца, вызывающая отклонение носителей к верхней грани пластины. Под действием этой силы на верхней грани будет скапливаться положительный заряд, а на нижней — отрицательный. В итоге между этими гранями возникнет электрическое поле с разностью потенциалов  $U_x$ , препятствующее такому движению частиц. Экспериментально было установлено, что разность потенциалов  $U_x$  пропорциональна силе тока  $I$ , магнитной индукции  $B$  и обратно пропорциональна ширине  $d$  пластины:

$$U_x = R_x \frac{IB}{d}, \quad (2.10)$$

где  $R_x$  — постоянная Холла.

Этот эффект в 1879 г. обнаружил американский физик Эдвин Герберт Холл. В отличие от трансформаторов тока, датчики тока с элементом Холла измеряют как постоянный, так и переменный ток.

Принцип работы датчика тока на основе эффекта Холла замкнутого контура показан на рисунке 2.30. Первичный проводник  $A$  проходит через магнитопроводное кольцо  $B$ , в котором при этом создается магнитное поле. Для детектирования магнитного поля, создаваемого током в проводнике, в ферритовом кольце сделан зазор, в который помещен датчик Холла  $C$ . Это позволяет измерять величину создаваемого электромагнитного поля. На основании полученных данных можно делать вывод о том, есть ли сейчас ток в проводнике и какой он величины.

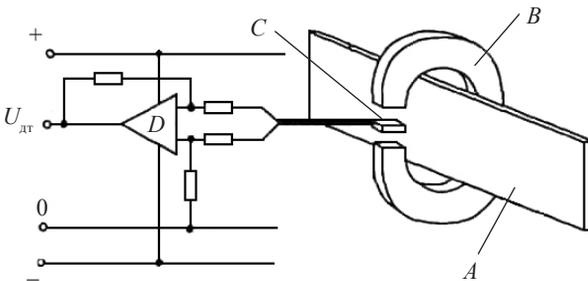


Рис. 2.30. Принцип работы датчика тока на основе эффекта Холла:  
 $A$  – проводник;  $B$  – незамкнутое магнитопроводное кольцо;  
 $C$  – аналоговый датчик Холла;  $D$  – усилитель сигнала

В электроустановках переменного напряжения для измерения силы тока применяют токовые трансформаторы. Применение трансформатора тока повышает безопасность работы с контрольно-измерительными приборами, так как высоковольтные и низковольтные цепи имеют гальваническую развязку. Трансформатор тока имеет замкнутый магнитопровод и две обмотки – первичную и вторичную (рис. 2.31).

Первичная обмотка трансформатора включается последовательно в цепь измерения. Через силовую первичную обмотку с числом витков  $w_1$  протекает ток  $I_1$ , преодолевая ее полное сопротивление  $Z_1$ . Вокруг этой катушки формируется магнитный поток  $\Phi_1$ , который улавливается магнитопроводом, расположенным перпендикулярно направлению вектора  $I_1$ . Такая ориентация обеспечивает минимальные потери электрической энергии при ее преобразовании в магнитную. Пересекая перпендикулярно расположенные витки обмотки  $w_2$ , поток  $\Phi_1$  наводит в них электродвижущую силу  $E_2$ , под влиянием которой во вторичной обмотке возникает ток  $I_2$ , преодолевающий полное сопротивление

катушки  $Z_2$  и подключенной выходной нагрузки  $Z_n$ . При этом на зажимах вторичной цепи образуется падение напряжения  $U_2$ . Вторичная обмотка подключается к электронной схеме нормирующего преобразователя датчика.

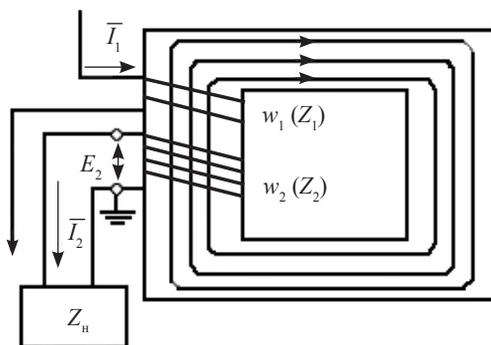


Рис. 2.31. Принцип работы первичного преобразователя (чувствительного элемента) трансформатора тока

Клещи токоизмерительные представляют собой прибор, основным назначением которого является измерение электрического тока без разрыва электрической цепи и нарушения ее функционирования. В соответствии с измеряемыми величинами электроизмерительные клещи делят на амперметры, вольтметры, ваттметры, фазометры, ампервольтметры. К самым распространенным относятся клещевые амперметры для измерения переменного тока, получившие название токоизмерительных клещей. С их помощью можно быстро измерить ток в проводнике, не разрывая и не отключая электрическую цепь.

В состав токоизмерительных клещей любой модификации входят следующие основные части (рис. 6, вклейка): клещи-магнитопровод, переключатель диапазонов и функций, дисплей, выходные разъемы, кнопка фиксации измерений.

В работу простейших токоизмерительных клещей переменного тока положен принцип действия одновиткового трансформатора тока (рис. 2.32). Его первичная обмотка представляет не что иное, как провод или шину, в которой измеряется ток. Вторичная обмотка, имеющая большее количество витков, намотана на разъемный магнитопровод и находится в самих клещах. К вторичной обмотке подключен амперметр. Измерив ток, который протекает во вторичной обмотке с учетом известного

коэффициента трансформации измерительного трансформатора, можно получить величину тока, измеряемую в проводнике.

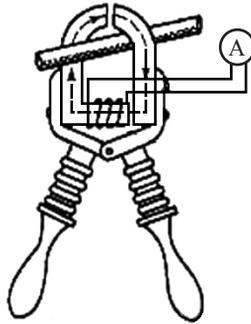


Рис. 2.32. Принцип действия одновиткового трансформатора

### 2.2.6. Датчики напряжения

Простейший датчик напряжения, наиболее широко применяемый в регуляторах постоянного тока, состоит из двух резисторов, соединенных по схеме делителя (рис. 2.33, а). На вход поступает контролируемое напряжение  $U_{\text{вх}}$ , а выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  пропорционально входному:

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{\text{вх}}. \quad (2.11)$$

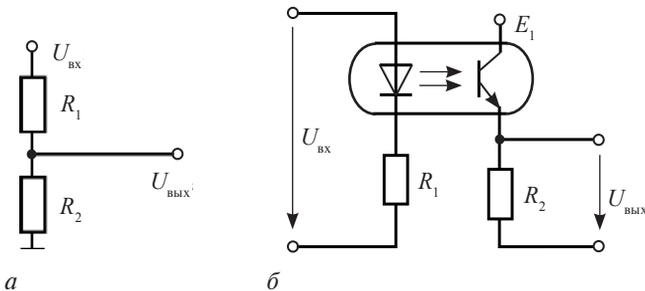


Рис. 2.33. Схема датчика напряжения на основе резистивного делителя напряжения (а) и на основе оптопары (б)

Основные достоинства датчика на основе делителя — простота, надежность, линейность характеристики и безынерционность. Однако часто возникает необходимость обеспечения гальванической

развязки между контролируемой цепью и системой управления. В частности, гальваническая развязка может обеспечиваться оптоэлектронной парой, состоящей из светоизлучающего и фотоприемного элементов. В схеме датчика с опторазвязкой (рис. 2.33, б) интенсивность свечения светодиода пропорциональна входному напряжению, а значение выходного напряжения определяют фототранзистором, который управляется световым потоком светодиода. Основным недостатком этого датчика заключается в том, что характеристика оптопары является нелинейной.

В настоящее время в датчиках широко применяют интегральные оптопары, содержащие в одном корпусе светоизлучатель и фотоприемник, разделенные светопрозрачным материалом с высокой изоляционной способностью.

Датчики напряжения эффекта Холла созданы на основе датчиков тока с замкнутым контуром. Если измеряемое напряжение цепи превратить в ток (для этого достаточно использовать токозадающее сопротивление), величина такого тока будет пропорциональна напряжению в измерительной цепи. Именно этот принцип лежит в основе работы датчиков напряжения, а наличие в их конструкции датчика Холла обеспечивает гальваническую развязку силовых цепей и цепей контроля. Внутри датчика напряжения в первичную цепь включен резистор. При непосредственном приложении измеряемого напряжения  $U_p$  к входным контактам датчика первичный ток  $I_p$ , протекающий через резистор  $R_p$  и первичную обмотку и пропорциональный измеряемому напряжению  $U_p$ , создает в магнитопроводе магнитный поток и таким образом преобразуется во вторичный ток  $I_s$ , пропорциональный первичному напряжению  $U_p$  (рис. 2.34).

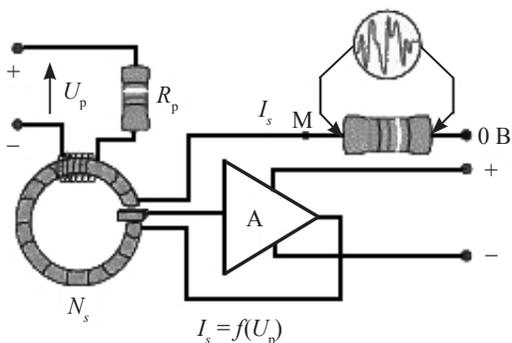


Рис. 2.34. Принцип работы датчика напряжения на основе эффекта Холла с замкнутым контуром

## 2.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

Аппараты управления и защиты относятся к коммутационным устройствам, которые делят на аппараты управления силовыми цепями и аппараты для цепей управления. Их различают величиной коммутируемого тока. Кроме того, все электрические аппараты подразделяют на аппараты ручного и дистанционного управления.

### 2.3.1. Аппараты ручного управления

К аппаратам ручного управления относят силовые коммутационные аппараты: рубильники, кулачковые контроллеры и пакетные выключатели, а также маломощные устройства – кнопки и ключи управления.

*Рубильник* представляет собой простейший коммутационный аппарат, предназначенный для нечастого замыкания и размыкания силовых цепей постоянного и переменного тока напряжением до 600 В. В установках напряжением выше 1000 В подобные устройства называются разъединителями и предназначаются для коммутации высоковольтных цепей без нагрузки (для отключения холостого хода высоковольтных линий и трансформаторов). Рубильники предназначены для коммутации электрических цепей, уже защищенных от сверхтоков другими коммутационными аппаратами.

Рубильники, или разъединители, используют для создания видимого разрыва, который отделяет выводимое в ремонт оборудование от токоведущих частей, находящихся под напряжением. Таким образом, рубильники предназначены для безопасного производства электротехнических работ.

Рубильники могут быть одно-, двух- и трехполюсные. Рубильники с боковой рукояткой (РБ), с боковым рычажным приводом (РПБ), с центральным рычажным приводом (РПЦ) предназначены для коммутации электрических цепей под нагрузкой в пределах 50–100 % номинального тока.

Первая цифра после буквенного обозначения определяет количество полюсов (1, 2, 3), вторая – номинальный ток рубильника: 1 (100 А), 2 (250 А), 4 (400 А), 6 (600 А). Например, РПЦ 22 означает: рубильник с центральным рычажным приводом, двухполюсный, номинальный ток 250 А.

Рубильники бывают открытого и закрытого исполнения.

Открытые рубильники (рис. 7, вклейка), представляют собой электрический коммутационный аппарат с ручным управлени-

ем, предназначенный для включения, отключения и переключения электрических цепей либо под нагрузкой (при напряжениях до 230 В на постоянном токе и до 400 В на переменном), либо при отсутствии тока. Он отличается характерной формой подвижных контактов (ножевидные или «рубящие»).

Закрытые рубильники (рис. 8, вклейка) представляют собой электрический коммутационный аппарат с ручным управлением, предназначенный для включения, отключения и переключения электрических цепей либо под нагрузкой (при напряжениях до 220 В на постоянном токе и до 380 В на переменном), либо при отсутствии тока.

*Пакетные выключатели и переключатели* применяют в качестве коммутационных аппаратов в электроустановках постоянного тока напряжением до 220 В и переменного тока напряжением до 380 В. Обозначение пакетного выключателя, например, ПВМ3-100 расшифровывается следующим образом: П – пакетный; В – выключатель; М – малогабаритный; 3 – трехполюсный; 100 – номинальный ток 100 А. Для включения, отключения и реверсирования короткозамкнутых АД используют пакетно-кулачковые переключатели ПКП и выключатели ПВ или ПКВ на номинальные токи 10, 25, 63, 100 и 160 А. На рисунке 9 (вклейка) показан пакетный выключатель типа ПВ2, который широко применяется в различных шкафах и пультах управления.

Рубильники и переключатели выбирают по номинальному напряжению, номинальному току, числу полюсов, конструктивному и климатическому исполнению.

*Кулачковые контроллеры* – это многопозиционные и многоцепные аппараты ручного управления, предназначенные для изменения схем соединений силовых цепей электродвигателей напряжением до 500 В либо для изменения величины включенных в эти цепи сопротивлений. Размыкание и замыкание контактов производится смонтированными на барабане кулачками, которые обеспечивают нужную последовательность коммутации электрических цепей.

*Автоматические выключатели* применяют для нечастых ручных включений и отключений электроприемников, а также для автоматического отключения цепей при перегрузках и коротких замыканиях. В электроустановках используют автоматические выключатели серии АП, АЕ, АВ, А, ВА (рис. 10, вклейка).

Автоматические выключатели выбирают по номинальному напряжению, номинальному току, предельному отключаемому току,



### 2.3.2. Аппараты дистанционного управления

Электрические аппараты дистанционного управления являются двухпозиционными коммутационными аппаратами с самовозвратом, переключение контактов которых происходит при протекании тока по катушке управления. К ним относятся контакторы, электромагнитные пускатели и реле.

**Контакторы.** Они представляют собой аппарат с электромагнитным приводом, предназначенный для частых (до 1500 в 1 ч) коммутаций силовых цепей электродвигателей.

Контакторы постоянного тока изготавливаются с одним и двумя полюсами на токи главных контактов от 4 до 2500 А. Контакторы переменного тока выпускают на токи от 63 до 1000 А и содержат два-пять главных контакта. Катушки выполняют на напряжения от 36 до 600 В. Кроме главных контактов, предназначенных для коммутации силовых цепей, контакторы содержат дополнительные маломощные контакты, предназначенные для выполнения переключений в цепях управления, блокировки и сигнализации.

**Электромагнитные пускатели.** Предназначены для дистанционного управления АД. Они совмещают в себе функции аппарата управления и защиты. В комплекте с тепловыми реле пускатели выполняют защиту электродвигателей от перегрузки. При исчезновении напряжения или при его снижении на 40–60 % от номинального силовые контакты размыкаются (осуществляется нулевая защита). В названии «электромагнитный пускатель» заложены сразу два принципиальных действия:

- срабатывание в качестве электромагнита от прохождения электрического тока по обмотке катушки;
- запуск в работу электродвигателя силовыми контактами.

Конструктивно любой магнитный пускатель состоит из стационарно закрепленной части и подвижного якоря, перемещающегося по полозьям (рис. 2.36).

Очень упрощенно пускатель можно представить как одну кнопку, на корпусе которой расположены клеммы с подключенными силовыми цепями и стационарными контактами. На подвижной части смонтирован контактный мостик. Его назначение:

- обеспечение двойного разрыва силовой цепи для отключения питания электродвигателя;
- надежное электрическое соединение приходящего и отходящего проводов при включении схемы в работу.

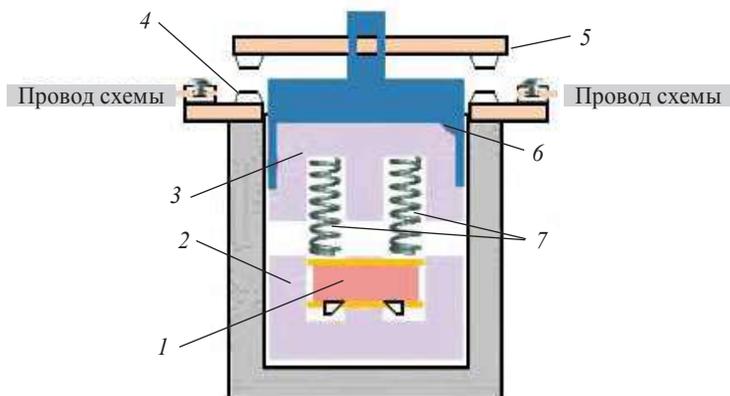


Рис. 2.36. Устройство магнитного пускателя:

1 – катушка с обмоткой и выводом; 2 – магнитопровод со стационарным сердечником; 3 – магнитопровод с подвижным сердечником; 4 – стационарные контакты; 5 – подвижный контактный мостик якоря; 6 – подвижный якорь; 7 – пружины

При ручном надавливании на якорь хорошо ощущается усилие сжатия встроенных пружин, которое необходимо преодолеть магнитным силам. При отпуске якоря эти пружины отбрасывают контакты в отключенное положение.

Такой способ ручного управления пускателем при работе схемы не используется, его применяют при проверках. В процессе эксплуатации пускатели управляются только дистанционно за счет действия электромагнитных полей. С этой целью внутри корпуса размещена обмотка катушки с намотанными на нее витками. Она подключается к источнику напряжения. При пропускании тока через витки вокруг катушки образуется магнитный поток. Для улучшения его прохождения создан шихтованный стальной магнитопровод, разрезанный на две части:

- стационарно закрепленную в корпусе устройства нижнюю половину;
- подвижную, входящую в состав якоря.

В обесточенном состоянии обмотки магнитного поля вокруг катушки нет, якорь отбрасывается энергией пружин от стационарной части вверх. Под действием магнитных сил, возникающих после прохождения электрического тока по обмотке, якорь двигается вниз. В нижнем притянутом положении создается надежный ужим контактной системы.

Схема включения электродвигателя магнитным пускателем показана на рисунке 2.37.

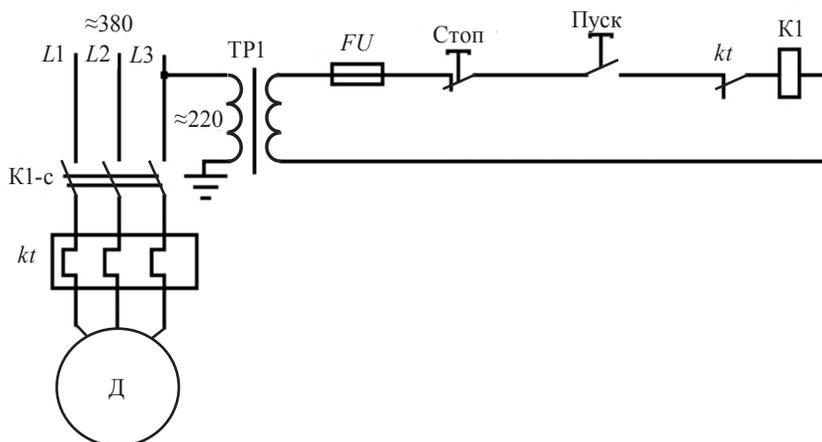


Рис. 2.37. Схема управления электродвигателем на основе магнитного пускателя: TP1 – разделительный или понижающий трансформатор; FU – предохранитель; K1 – обмотка магнитного пускателя; K1-с – силовые контакты магнитного пускателя; kt – тепловое реле; Д – трехфазный АД

Трехфазное питание  $\approx 380$  через силовые контакты K1-с подводится на электродвигатель, температура обмоток которого контролируется тепловым реле *kt*. Система управления питается от любой фазы и нуля. Вполне допустимо заменить рабочий ноль контуром заземления. В целях повышения электробезопасности применяют разделительный или понижающий трансформатор TP1. Его вторичную обмотку заземлять нельзя.

Простейший предохранитель *FU* защищает схему управления от возможных коротких замыканий. При нажатии оператором на кнопку «Пуск» в цепи управления создается цепь для протекания тока через обмотку пускателя K1, который одновременно замыкает свои силовые контакты K1-с. Сколько времени рабочий жмет на кнопку, столько двигатель и работает. Для удобства человека такие кнопки монтируют курковым механизмом.

Работающий электродвигатель при нажатой кнопке может быть выключен:

- снятием питания на распределительном силовом щите;
- нажатием кнопки «Стоп»;

- работой теплового реле  $kt$  при перегреве двигателя;
- перегоранием предохранителя.

Подобные схемы применяют там, где по условиям технологии требуется держать руки постоянно на оборудовании и не отвлекаться от производственного процесса. Примером может служить работа с прессом.

Контакты пускателя замкнуты только тогда, когда на катушку подается напряжение. Пульты управления такими приборами обычно оборудованы кнопками без фиксации. Это значит, что пускатель будет включен только тогда, когда кнопка удерживается в нажатом положении.

Если для некоторых схем это хорошо (например, для лебедки и других грузоподъемных механизмов), то для двигателей, работающих в длительном режиме, это никак не подойдет (представьте схему управления насосом, который должен работать без остановки). В таких случаях используют кнопки «Старт» и «Стоп» на пульте и схему с самоподхватом через блок-контакты.

Схема с удержанием кнопки контактом пускателя показана на рисунке 2.38. Добавление в предыдущую схему (см. рис. 2.37) всего одного замыкающего контакта пускателя К1-у позволяет ставить кнопку «Пуск» на блокировку этим дополнением и избавляет от ее постоянного нажатия. В остальной схеме полностью повторяет предыдущий алгоритм.

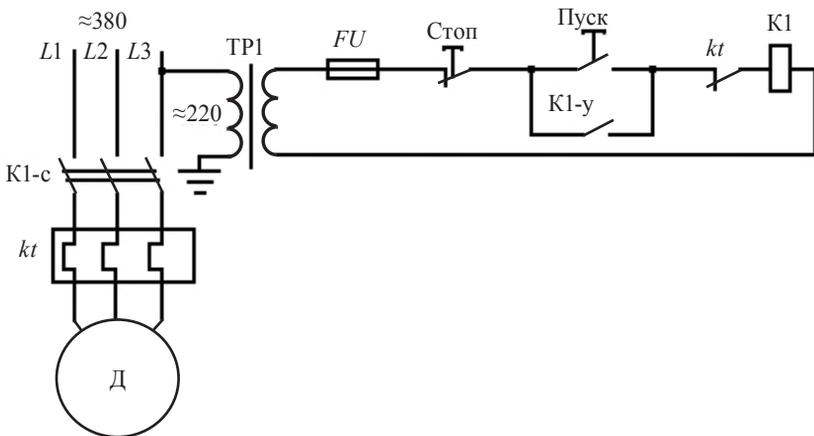


Рис. 2.38. Схема с удержанием кнопки контактом пускателя:  
K1-у – контакт управления магнитного пускателя

**Схема с реверсом.** Многие приводы станков требуют при работе изменять направление вращения ротора двигателя. Делается это сменой фаз чередования силовой цепи – переключением мест подключения двух любых обмоток на отключенном двигателе. На рисунке 2.39 меняются местами обмотки фаз  $L2$  и  $L3$ . Фаза  $L1$  не меняется.

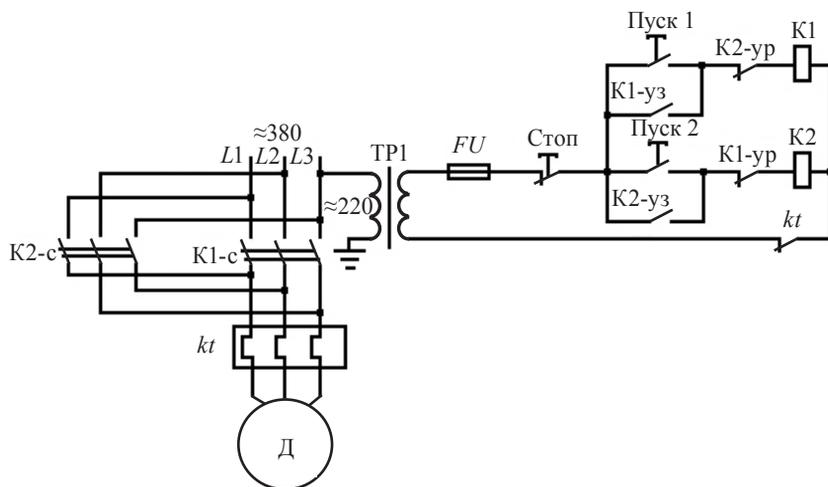


Рис. 2.39. Схема с электродвигателем с реверсом на основе магнитного пускателя:

$K1$  – обмотка магнитного пускателя (МП1);  $K1-c$  – силовые контакты МП1;  $K1-уз$  – контакт управления замыкающим МП1;  $K1-ур$  – контакт управления размыкающим МП1;  $K2$  – обмотка МП2;  $K2-c$  – силовые контакты МП2;  $K2-уз$  – контакт управления замыкающим МП2;  $K2-ур$  – контакт управления размыкающим МП2

В схему включены уже два магнитных пускателя МП1 и МП2. Двигатель может вращаться только от одного из них по часовой стрелке или в обратном направлении. Для этого в цепочку управления каждой обмотки  $K1$  и  $K2$  введен размыкающий контакт управления пускателя противоположного вращения. Он блокирует одновременное подключение обоих пускателей.

Для смены направления вращения двигателя оператору необходимо:

- нажать кнопку «Стоп». Образованный ею разрыв размыкает цепь управления и прерывает прохождение тока через работаю-

щий пускатель. При этом пружины откидывают якорь, а силовые контакты отключают напряжение питания с электродвигателя;

- дождаться остановки вращения ротора и нажать кнопку «Пуск» очередного пускателя. Ток потечет через его катушку, кнопка встанет на удержание замыкающим контактом, а цепь обмотки пускателя обратного вращения разорвется размыкающим контактом.

**Особенности современных магнитных пускателей и их применение.** На лицевой части современного магнитного пускателя (рис. 11, вклейка), как правило, находятся четыре пары контактов. Три из них с маркировкой типа 1L1 и 2T1 – это силовые контакты для подключения нагрузки к трехфазной электросети. Контакты с пометкой «L» служат для подключения источника питания, а «T» – для подключения потребителя.

Вообще можно подключать сеть как с верхней стороны (L), так и с нижней (T). Однако соблюдение маркировки и подключения описанного в первом способе сделает цепь более наглядной и упростит ее обслуживание другими электромонтерами, которые будут с ней работать. Принято заводить питание с верхней стороны.

Главным отличием у современных контакторов является маркировка клемм. Необходимо запомнить, что клеммы с маркировкой «L» и «T» служат для подключения силовых линий – питания и нагрузки. Контакты с маркировкой NO и NC служат для реализации самоподхвата и других функций схем. При этом NC – нормально-закрытые (замкнутые), а NO – нормально-открытые (разомкнутые).

Нормальным состоянием контактов называют такое состояние, при котором на кнопку или пускатель не оказывается внешнего воздействия, т. е. когда на кнопку НЕ нажимают, а в случае с пускателем отсутствует напряжение на катушке и он выключен.

При подключении пускателя внимательно уточните, на какое напряжение рассчитана катушка. Дело в том, что катушки в основном встречаются на напряжение 220 и 380 В, об этом говорит соответствующее обозначение на его корпусе (см. рис. 11, вклейка).

Контакты катушки помечены, как A1 и A2.

На передней панели или сбоку может быть нанесена схема с расположением контактов. Схему контактов выполняют в виде,

показанном на рисунке 2.40. На ней подписаны названия клемм и их положение в нормальном состоянии (отключенной катушке).

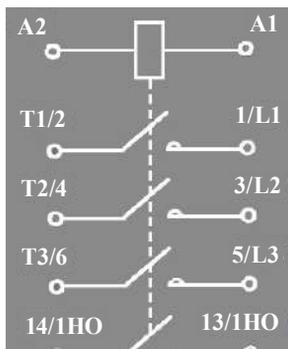


Рис. 2.40. Изображение схемы контактов на корпусе магнитного пускателя

**Электромагнитные реле.** *Реле* – электрический аппарат, предназначенный для коммутации электрических цепей (скачкообразного изменения выходных величин) при заданных изменениях электрических или неэлектрических входных величин. Электромагнитные реле постоянного и переменного тока применяют в схемах управления в качестве промежуточных элементов для коммутации слаботочных цепей и для размножения контактов.

Реле обычно состоит из трех основных функциональных элементов: воспринимающего, промежуточного и исполнительного.

*Воспринимающий (первичный) элемент* воспринимает контролируемую величину и преобразует ее в другую физическую величину. Воспринимающий элемент в зависимости от назначения реле и рода физической величины, на которую он реагирует, может иметь различные исполнения, как по принципу действия, так и по устройству. Например, в реле максимального тока или реле напряжения воспринимающий элемент выполнен в виде электромагнита, в реле давления – в виде мембраны или сильфона, в реле уровня – в виде поплавка и т. д.

*Промежуточный элемент* сравнивает значение этой величины с заданным значением и при его превышении передает первичное воздействие на исполнительный элемент.

*Исполнительный элемент* осуществляет передачу воздействия от реле в управляемые цепи. Все эти элементы могут быть явно выраженными или объединенными друг с другом.

Работа электромагнитных реле основана на использовании электромагнитных сил, возникающих в металлическом сердечнике при прохождении тока по виткам его катушки (рис. 2.41). Детали реле монтируются на основании и закрываются крышкой. Над сердечником электромагнита установлен подвижный якорь (пластина) с одним или несколькими контактами. Напротив них находятся соответствующие парные неподвижные контакты.

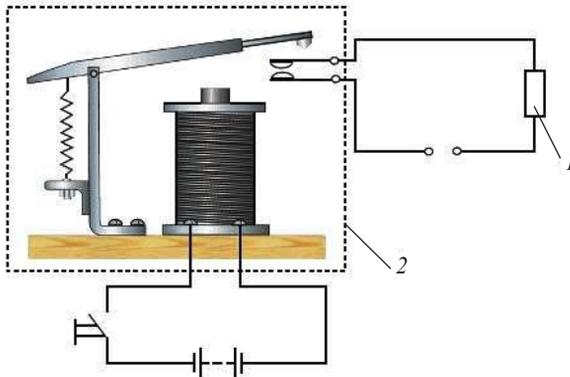


Рис. 2.41. Устройство электромагнитного реле:  
1 – исполнительный орган; 2 – реле

В исходном положении якорь удерживается пружиной. При подаче напряжения электромагнит притягивает якорь, преодолевая ее усилие, и замыкает или размыкает контакты в зависимости от конструкции реле. После отключения напряжения пружина возвращает якорь в исходное положение. В некоторые модели могут быть встроены электронные элементы. Это резистор, подключенный к обмотке катушки для более четкого срабатывания реле, или (и) конденсатор, параллельный контактам для снижения искрения и помех.

Управляемая цепь электрически никак не связана с управляющей, более того, в управляемой цепи величина тока может быть намного больше, чем в управляющей. То есть реле по сути выполняют роль усилителя тока, напряжения и мощности в электрической цепи.

Реле переменного тока срабатывают при подаче на их обмотки тока определенной частоты, т. е. основным источником энергии является сеть переменного тока. Конструкция реле переменного тока напоминает конструкцию реле постоянного тока, толь-

ко сердечник и якорь изготовляют из листов электротехнической стали, чтобы уменьшить потери на гистерезис и вихревые токи.

Различают следующие основные характеристики реле.

1. Величина срабатывания реле  $X_{\text{ср}}$  — значение параметра входной величины, при которой реле включается. При  $X < X_{\text{ср}}$  выходная величина равна  $Y_{\text{min}}$ , при  $X > X_{\text{ср}}$  величина  $Y$  скачком изменяется от  $Y_{\text{min}}$  до  $Y_{\text{max}}$  и реле включается. Величину срабатывания, на которую отрегулировано реле, называют *уставкой*.

2. Мощность срабатывания реле  $P_{\text{ср}}$  — минимальная мощность, которую необходимо подвести к воспринимающему органу для перевода его из состояния покоя в рабочее состояние.

3. Управляемая мощность  $P_{\text{упр}}$  — мощность, которой управляют коммутирующие органы реле в процессе переключений. По мощности управления различают реле цепей малой мощности (до 25 Вт), средней мощности (до 100 Вт) и повышенной мощности (свыше 100 Вт), которые относят к силовым реле и называют *контакторами*.

4. Время срабатывания реле  $t_{\text{ср}}$  — промежуток времени от подачи на вход реле сигнала  $X_{\text{ср}}$  до начала воздействия на управляемую цепь. По времени срабатывания различают нормальные, быстродействующие, замедленные реле и реле времени. Обычно для нормальных реле  $t_{\text{ср}} = 50 \dots 150$  мс.

Типовая практика применения мощных электромагнитных реле — это коммутация нагрузок на переменном токе 220 В или на постоянном токе от 5 до 24 В при токах коммутации до 10–16 А. Обычными нагрузками для контактных групп мощных реле являются нагреватели, маломощные электродвигатели (например, вентиляторы и сервоприводы), лампы накаливания, электромагниты и прочие активные, индуктивные и емкостные потребители электрической мощности в диапазоне от 1 Вт до 2–3 кВт.

**Кнопки управления** (рис. 12, вклейка) используют для дистанционного управления контакторами, пускателями и другими аппаратами. Кнопки управления, смонтированные в общем корпусе или на панели, называют кнопочной станцией. Кнопочные посты могут находиться на рабочем месте работника, образуя своеобразный пульт для выполнения производственных задач, которые связаны с работой оборудования на заводе.

Кнопочные посты изготовляют в корпусах разной формы и с разным числом кнопок в зависимости от выполняемых ими функций. Особенностью кнопок является то, что они не применяются в схемах с высоким напряжением. Однако кнопочными

постами можно управлять оборудованием с высоким напряжением, подключая их в цепи управления на переменном токе до 600 В и на постоянном токе до 400 В. Через кнопки управления проходит не рабочий силовой ток, а ток управления. Также работают и кнопочные посты. Силовую цепь замыкает пускатель, который работает от кнопочного поста.

Число кнопок бывает разным и зависит от числа объектов нагрузки. Кнопочные посты бывают двух- и многокнопочными. Самый простой кнопочный пост имеет в своем составе две кнопки: «Пуск» и «Стоп».

Кнопки – основная деталь кнопочного поста. Их конструкции разделяются на два типа: с фиксацией и самовозвратные. Кнопки с фиксацией размыкают контакты и возвращаются в исходное положение только при повторном нажатии. Самовозвратный вариант исполнения кнопок действует путем выталкивания кнопки пружиной в первоначальное состояние, т. е. при нажатии одной кнопки вторая выталкивается автоматически, и наоборот.

### **2.3.3. Электрические аппараты защиты**

Электрические аппараты защиты служат для отключения электрических цепей в аварийных режимах.

Для защиты проводок и электрооборудования от токов коротких замыканий применяют плавкие предохранители и автоматические выключатели без выдержки времени, а для защиты от перегрузок – автоматические выключатели с выдержкой времени и электротепловые реле магнитных пускателей.

*Плавкие предохранители* включаются в каждую фазу электродвигателя или другого электроприемника. Основными элементами предохранителя являются плавкая вставка, контактная система и корпус с дугогасительным устройством. При аварийном увеличении тока отключение электрической цепи происходит за счет расплавления калиброванной плавкой вставки.

*Автоматические выключатели* предназначены для коммутации электрических цепей, а также для их защиты от перегрузок и коротких замыканий. Контактная система автоматического выключателя замыкается и размыкается вручную с помощью рукоятки или кнопок; для отключения цепей при коротких замыканиях служит максимальное токовое реле прямого действия, для отключения при перегрузках – тепловое реле прямого действия (электромагнитный и тепловой расцепители).

Применяемые для коммутации и защиты силовых и осветительных сетей автоматические выключатели типов А3700, АЕ2000, ВА и другие различаются между собой количеством контактов (полюсов), номинальными значениями токов и напряжений, отключающей способностью, временем отключения. Диапазон их номинальных токов 10–10 000 А, а предельно коммутируемых токов – до 100 кА. Время срабатывания электромагнитного расцепителя 0,02–0,7 с, время срабатывания теплового расцепителя зависит от тока перегрузки и изменяется от нескольких секунд до десятков секунд. Некоторые типы автоматических выключателей содержат дистанционный расцепитель, позволяющий производить отключение по внешнему сигналу тока или напряжения. Существуют автоматические выключатели с электромагнитным приводом, обеспечивающие дистанционное включение аппарата.

Защита электродвигателей от перегрузок может также осуществляться при помощи *электротепловых реле*. Электротепловые реле предназначены для защиты электродвигателей от перегрева при длительных перегрузках. Принцип их действия и устройство такие же, как и у тепловых расцепителей автоматических выключателей. Применяют электротепловые реле типов ТРН (двухполюсные), РТЛ (трехполюсные) и РТТ. Диапазон регулирования тока вставки тепловых реле  $0,75–1,25I_{ном}$ . Электротепловые реле используют вместе с электромагнитными пускателями. Реле типа ТРН применяют с пускателями ПМЕ и ПМ, реле РТЛ, РТТ – с пускателями ПМЛ.

#### **2.3.4. Защитно-отключающие устройства**

В сельскохозяйственных электроустановках применяют следующие виды защитно-отключающих устройств:

- встроенной температурной защиты;
- защиты электродвигателей и других потребителей трехфазного тока от работы на двух фазах и от асимметрии междуфазных напряжений;
- защиты от поражения электрическим током.

Большинство защитно-отключающих устройств выполнены с использованием элементов электроники, что повышает их чувствительность и обеспечивает более надежную защиту электрооборудования, электропроводок и обслуживающего персонала от аварийных режимов, чем плавкие предохранители, автоматические выключатели и тепловые реле.

**Устройства встроенной температурной защиты** предназначены для защиты от перегрева электродвигателей, в обмотки которых встроены датчики температуры. В качестве датчиков температуры чаще всего применяют полупроводниковые резисторы (позисторы) СТ14-15 или СТ14-1А, проводимость которых скачкообразно уменьшается при температурах соответственно 105 и 130 °С (рис. 2.42). Позисторы встраивают в лобовые части каждой фазной обмотки и соединяют последовательно.

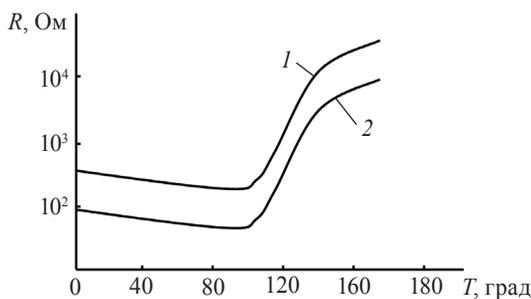


Рис. 2.42. Температурные характеристики позисторов:  
1 — СТ14Б; 2 — СТ14А

На рисунке 2.43 изображена схема устройства температурной защиты (УВТЗ), предназначенного для использования совместно с электромагнитными пускателями в трехфазных сетях 230/400 В.

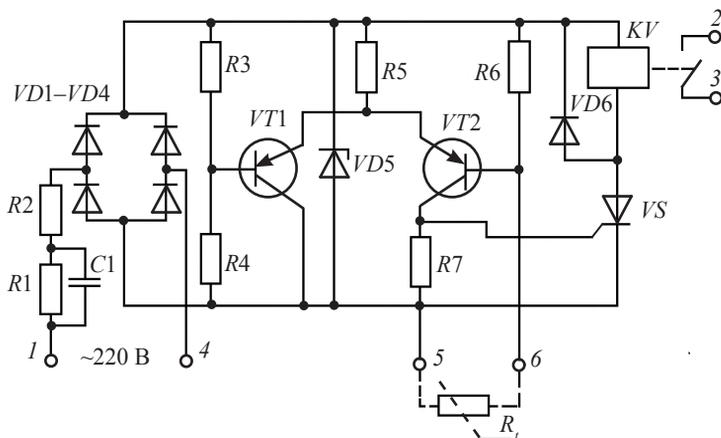


Рис. 2.43. Принципиальная электрическая схема УВТЗ:  
1-6 — номера контактов

При нагревании электродвигателя при его работе под нагрузкой нагреваются и позисторы  $R_p$ , при этом их сопротивление увеличивается. При температурах ниже 105–135 °С увеличение сопротивления  $R_p$  незначительно. Транзистор  $VT2$  при этом открыт,  $VT1$  закрыт, а на управляющем электроде тиристора  $VS$  будет положительный потенциал относительно катода. Тиристор откроется, сработает реле  $KV$ , которое своим контактом включает катушку магнитного пускателя, управляющего электродвигателем. При увеличении температуры обмоток электродвигателя выше допустимой сопротивление позисторов резко возрастает, в результате  $VT2$  закроется, а  $VT1$  откроется. Закрытый транзистор  $VT2$  отключит ток управления тиристора  $VS$ , и он закроется. Катушка реле обесточится, а контакты  $KV$  разорвут цепь питания катушки магнитного пускателя, который отключит электродвигатель. При обрыве цепи датчиков температуры устройство не позволит включить электродвигатель в сеть.

Устройства встроенной температурной защиты обеспечивают более эффективную защиту электродвигателей от перегрузки, чем тепловые реле, которые являются устройствами косвенного действия, и их настройка не всегда соответствует истинной температуре обмоток электродвигателя.

Устройства защиты электродвигателей и других потребителей трехфазного тока от неполнофазных режимов — *реле контроля фаз* — применяют для защиты электродвигателей, тиристорных преобразователей и других трехфазных потребителей. Эти устройства реагируют на обрыв одной фазы, на асимметрию междуфазных напряжений и обратное чередование фаз.

На рисунке 2.44 приведена функциональная схема реле ЕЛ-10. Устройство содержит пороговый блок (ПБ), включающий три пороговых элемента: логическую схему (ЛС), состоящую из триггеров  $T1$ ,  $T2$ ; логическую схему «И» и дифференцирующую  $RC$ -цепь; схему временной задержки СВЗ и выходного устройства, состоящего из транзистора  $VT$  и реле  $KV$ .

Если напряжения всех фаз на входе реле находятся в допустимых пределах, на выходах ПБ появляются последовательности импульсов, соответствующие частоте и порядку чередования фаз трехфазного напряжения. На выходе ЛС последовательность импульсов будет только в том случае, если на входы реле подано трехфазное напряжение с прямым порядком чередования фаз.

Импульсы с выхода ЛС поступают на схему временной задержки, на выходе которой включено выходное устройство с выходным реле  $KV$ .

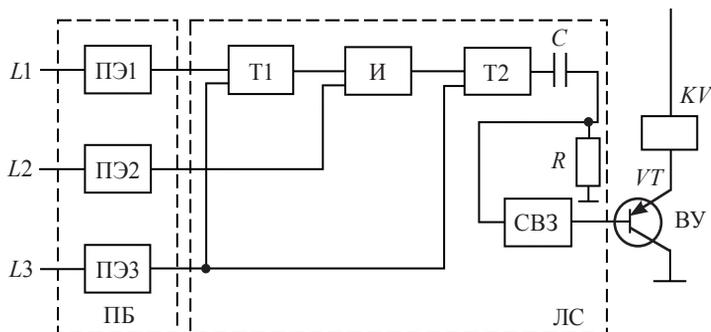


Рис. 2.44. Функциональная схема реле ЕЛ-10

При недопустимых отклонениях фазных напряжений, обрыве фазы, нарушении чередования фаз на выходе ЛС исчезает последовательность импульсов и по истечении выдержки времени элемент задержки выдаст сигнал на отключение выходного реле.

Преимущество реле ЕЛ-10 — простота включения в схемы защиты симметричных трехфазных электроприемников различной мощности. Недостаток — контроль неполнофазного режима обеспечивается только до места подключения реле, в то время как фазовая токовая защита реагирует на исчезновение тока в любом месте питания трехфазного потребителя.

**Устройство защитного отключения (УЗО)** предназначено для защиты людей от поражения при контакте с токопроводящими частями электроустановок и для предотвращения возгораний, пожаров, возникающих вследствие длительного протекания токов утечки и развивающихся из них токов короткого замыкания. Применяют УЗО для комплектации вводно-распределительных устройств (ВРУ), вводных и распределительных щитов, устанавливаемых в общественных, жилых, административных и производственных зданиях. К объектам, подлежащим оснащению УЗО, относят вновь строящиеся, реконструируемые, капитально ремонтируемые жилые дома, общественные здания, промышленные сооружения и хозпостройки независимо от форм собственности и ведомственной принадлежности.

Функционально УЗО можно определить как быстродействующий защитный выключатель, реагирующий на дифференциальный ток в проводниках, подводящих электроэнергию к защищаемой электроустановке. Структуру УЗО формируют из следующих основных функциональных блоков (рис. 2.45): датчика дифференциального тока; блока управления с пороговым элементом; исполнительного механизма; цепи тестирования.

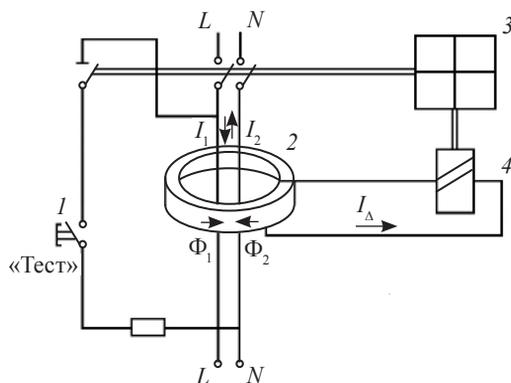


Рис. 2.45. Структура устройства защитного отключения:  
1 — цепь тестирования; 2 — дифференциальный трансформатор тока; 3 — исполнительный механизм; 4 — пороговый элемент

В абсолютном большинстве УЗО, применяемых в настоящее время, в качестве датчика дифференциального тока используют трансформатор тока (называемый иногда применительно к трехфазным цепям «трансформатором тока нулевой последовательности» — ТТНП). Пороговый элемент выполняют, как правило, на чувствительных магнитоэлектрических реле или электронных компонентах. Исполнительный механизм включает в себя сильноточную контактную группу с механизмом привода.

В нормальном режиме при протекании рабочего тока нагрузки и отсутствии дифференциального (разностного) тока (тока утечки  $I_{\Delta}$ ) токи в прямом и обратном проводниках, образующих встречно включенные первичные обмотки датчика дифференциального тока, равны по модулю ( $I_1 = I_2$ ) и наводят в магнитном сердечнике трансформатора тока равные модулю, но встречно направленные магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . В результате ток во

вторичной обмотке равен нулю и не вызывает срабатывания порогового элемента блока управления.

При возникновении дифференциального тока (например, тока утечки на землю или прикосновения человека к токоведущим частям) баланс токов, а следовательно, и магнитных потоков нарушается и во вторичной обмотке появляется трансформированный дифференциальный ток (ток небаланса), который вызывает срабатывание порогового элемента, воздействующего на исполнительный механизм. Исполнительный механизм воздействует на привод контактной группы, и защищаемая цепь обесточивается.

Цепь тестирования, искусственно создающая дифференциальный ток, предназначена для осуществления периодического контроля исправности устройства в целом путем нажатия кнопки «Тест».

## 2.4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Во многих электрических системах управления исполнительный элемент системы – электрический двигатель – соединяется с регулирующим органом производственного механизма через специальное соединительное устройство, называемое *муфтой* (рис. 2.46).

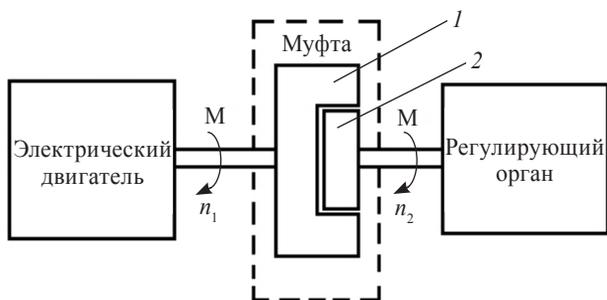


Рис. 2.46. Схема соединения муфтой двигателя с рабочим механизмом:  
1 – ведущая часть; 2 – ведомая часть

Муфта – устройство, служащее для сцепления двух валов, т. е. для передачи вращающего момента с одного вала (ведущего

го) на другой (ведомый). Ведущий вал вращается приводным двигателем, а ведомый вал связан с нагрузкой. Муфту называют электромеханической, если для передачи механического момента используются электрические явления.

Муфты бывают релейного действия, осуществляющие жесткое сцепление валов при подаче сигнала, и непрерывного действия, осуществляющие гибкое сцепление, когда скорость ведомого вала зависит от величины входного сигнала и эта зависимость может быть представлена плавной статической характеристикой «скорость ведомого вала – входной сигнал». Для автоматических систем основной интерес представляют муфты гибкого сцепления.

### 2.4.1. Электромеханические муфты сухого трения

Муфта сухого трения (рис. 2.47) состоит из двух половин 1 и 2 (полумуфта), на которых укреплены диски трения 3 из фрикционного материала. Одна полумуфта может перемещаться вдоль своего вала на шпонке, другая соединена со своим валом жестко. Если прижать обе половины муфты друг к другу, то неподвижный до этого ведомый вал станет вращаться заодно с ведущим, т. е. произойдет сцепление валов за счет силы трения, препятствующей проскальзыванию дисков трения относительно друг друга.

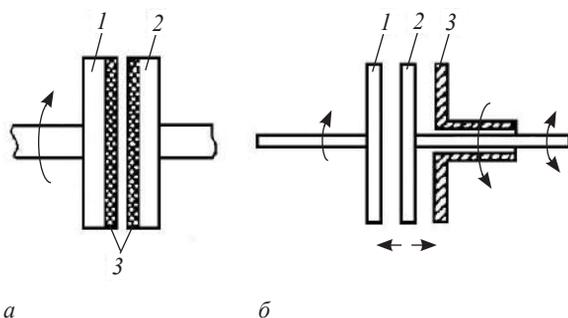


Рис. 2.47. Устройство муфты сухого трения:  
а – нереверсивной; б – реверсивной

Принцип действия реверсивной муфты трения позволяет изменять направление вращения ведомого вала. Она пред-

ставляет собой комбинацию двух простых нереверсивных муфт (см. рис. 2.47, *а*): ведомый диск 1 находится между двух ведущих дисков 2 и 3, вращающихся в разные стороны. Направление вращения ведомого диска можно менять, прижимая его то к одному, то к другому ведущему диску. Ведущие диски приводятся во вращение или двумя отдельными двигателями, или одним общим. В последнем случае один из дисков соединяется с двигателем через зубчатую передачу, изменяющую направление его вращения по сравнению с другим диском.

Если необходимо быстро тормозить, ведомый вал муфты трения комбинируют с тормозом. Такая комбинированная муфта выглядит как реверсивная (см. рис. 2.47, *б*), только второй ведущий диск в этом случае заменяется неподвижным диском, жестко укрепленным на основании муфты. Торможение ведомого диска осуществляется путем прижатия его к этому неподвижному диску.

Прижатие частей муфты друг к другу может осуществляться, например, с помощью гидравлического или пневматического сервомотора. Тогда мы имеем соответственно гидравлическую или пневматическую муфту трения с гидравлическим или пневматическим управлением. Если же части муфты сжимаются с помощью какого-либо электромеханического преобразователя, получается электромеханическая муфта трения.

Основное распространение получили электромеханические муфты трения с электромагнитным управлением, где для сцепления обеих половин муфты применяют электромагнит. Наиболее быстродействующие электромеханические муфты трения выполняют с магнитоэлектрическим управлением. В таком случае вместо электромагнита используют магнитоэлектрический преобразователь электрического сигнала в перемещение и силу.

### **2.4.2. Электромагнитные муфты**

Электромагнитные муфты применяют для замыкания и размыкания кинематических цепей без прекращения вращения, например в коробках скоростей и передач, а также для пуска, реверсирования и торможения приводов станков. Применение муфт позволяет разделить пуск двигателей и механизмов, уменьшить время пускового тока, устранить удары как в электродвигателях,

так и в механических передачах, обеспечить плавность разгона, устранить перегрузки, проскальзывания и др. Резкое уменьшение пусковых потерь в двигателях снимает ограничение по допустимому числу включений, что очень важно при цикличной работе двигателя.

Электромагнитная муфта является индивидуальным регулятором скорости, представляет собой электрическую машину, служащую для передачи вращающего момента от ведущего вала к ведомому при помощи электромагнитного поля, и состоит из двух основных вращающихся частей: якоря (в большинстве случаев представляет собой массивное тело) и индуктора с обмоткой возбуждения. Якорь и индуктор механически жестко не связаны между собой. Как правило, якорь соединяется с приводным двигателем, а индуктор – с рабочей машиной.

Существует большое количество конструкций муфт, основанных на различных физических принципах. Широкое применение в системах автоматизации и управления получили муфты с электромагнитным управлением, когда соединение ведущей и ведомой частей происходит не жестко механически, а за счет упругих сил электромагнитного поля. Это позволяет подключать двигатель к механизму без механических ударов, осуществлять передачу движения в изолированных друг от друга средах (например, ввод движения в вакуумную среду), а в ряде случаев – и регулировать частоту вращения в системах управления.

Электромагнитная асинхронная муфта устроена по принципу АД, только вращающийся магнитный поток здесь создается механическим вращением полюсной системы. Вращающий момент от ведущей части вала к ведомой передается электромагнитным путем. Разъединение муфты производится отключением тока возбуждения. Типичная электромагнитная муфта состоит из двух роторов (рис. 13, вклейка). Один из них представляет собой железный диск с тонким кольцевым выступом на периферии. На внутренней поверхности выступа имеются радиально ориентированные полюсные наконечники, снабженные обмотками, по которым пропускается ток возбуждения от внешнего источника через контактные кольца на валу. Другой ротор – это цилиндрический железный вал с пазами, параллельными оси. В пазы вставлены изолированные медные бруски, соединенные на кон-

цах кольцевым медным коллектором. Этот ротор может свободно вращаться внутри первого и полностью охватывается его полюсными наконечниками.

Когда ток возбуждения включен и один из роторов (например, второй) вращается двигателем, силовые линии магнитного поля, созданного током возбуждения, пересекаются проводниками этого ротора (медными брусками) и в них наводится ЭДС. Поскольку медные бруски образуют замкнутую цепь, по ним течет ток, созданный наведенной ЭДС, и этот ток порождает собственное магнитное поле. Взаимодействие полей роторов таково, что ведомый ротор увлекается за ведущим, правда, с небольшим запаздыванием.

Управление электрическим током позволяет осуществлять дистанционное управление муфтой (плавно сцеплять и расцеплять ее). Поэтому ее применяют в автоматике и телемеханике.

### **2.4.3. Ферропорошковые муфты с электромагнитным управлением**

Электромагнитная порошковая муфта позволяет осуществлять либо жесткое соединение ведущей и ведомой частей муфты, либо проскальзывание ведомой части относительно ведущей. Это дает возможность регулировать частоту вращения приводного механизма при неизменной частоте вращения приводного двигателя.

На рисунке 2.48 представлена конструктивная схема электромагнитной порошковой муфты. Ведущая 1 и ведомая 2 части муфты представляют собой стальные цилиндры и служат магнитопроводами. В кольцевом пазу ведомой части расположена обмотка возбуждения 3, которая через контактные кольца 4 и щетки 5 подключена к источнику постоянного тока  $U$ . Зазор между ведомой и ведущей частями муфты заполняется наполнителем 6, представляющим собой сухую или жидкую ферромагнитную смесь. Жидкая смесь состоит из ферромагнитного порошка и жидкой масляной основы. Соотношение между порошком и маслом обычно составляет 5:1. Сухая ферромагнитная смесь состоит также из ферромагнетика, а в качестве связующего вещества используют графит или тальк.

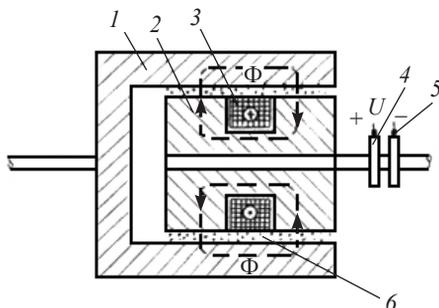


Рис. 2.48. Конструктивная схема электромагнитной порошковой муфты

Принцип работы порошковой муфты заключается в следующем. При подаче постоянного напряжения  $U$  на обмотку возбуждения возникает ток, который создает поток возбуждения  $\Phi$ . Проходя через зазор, поток намагничивает ферромагнетик. Намагниченные частицы ферромагнетика образуют магнитные цепочки, расположенные вдоль силовых линий магнитного поля. Эти цепочки соединяют силами притяжения ведущую и ведомую части муфты. Сила сцепления частей муфты и создаваемый электромагнитный момент тем больше, чем больше ток протекает через обмотку возбуждения порошковой муфты. При больших токах возбуждения наступает магнитное насыщение материала и постепенно прекращается нарастание сил сцепления, а следовательно, и электромагнитного момента. Таким образом, воздействуя электромагнитным полем на слой порошка, можно соединить ведущую и ведомую части муфты либо жестко, либо с проскальзыванием. Порошковые муфты по конструкции бывают не только цилиндрические, но и дисковые.

#### 2.4.4. Статические характеристики электромагнитных муфт скольжения

На рисунке 2.49 показаны типичные статические характеристики муфты скольжения: зависимость скорости ведомого вала от момента на нем при разных значениях тока в обмотке индуктора. Если известна зависимость момента сопротивления нагрузки от скорости ее вращения  $M_c = f(\omega)$  (пунктир на рис. 2.49), то, нанеся такую зависимость в той же системе координат, по точкам пересечения характеристик муфты и нагрузки можно построить

результатирующую статическую зависимость скорости вращения нагрузки от тока в обмотке индуктора  $\omega = f(I)$  или напряжения на ней.

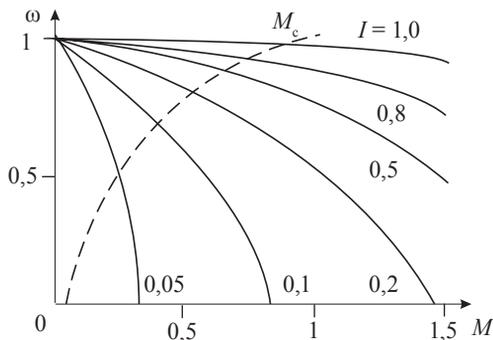


Рис. 2.49. Статические характеристики электромагнитных муфт скольжения

### 2.4.5. Тормозные устройства

Электроприводы ряда рабочих машин и механизмов снабжаются тормозными устройствами, которые обеспечивают остановку их исполнительных органов в заданных положениях, ограничение пути торможения после отключения двигателя, а также удержание (фиксацию) исполнительных органов в определенном положении после отключения двигателя. К таким рабочим машинам относятся в первую очередь подъемно-транспортные механизмы — краны, лифты, подъемники, эскалаторы и др.

Существующие тормозные устройства имеют весьма разнообразное исполнение. Они подразделяются по виду привода — на электромагнитные, гидравлические и пневматические; по конструкции фрикционных элементов — на дисковые, конические и цилиндрические (которые бывают колодочными и ленточными); по начальному положению фрикционных элементов — на нормально разомкнутые и нормально замкнутые.

В большинстве электроприводов применяют тормоза с приводом от электромагнитов, называемые электромагнитными. Эти тормоза могут быть постоянного и переменного тока; в зависимости от длины хода якоря электромагнита — длинноходовые и короткоходовые; с продолжительностью включения 15, 25, 40 и

60 % от времени цикла работы электропривода. Короткоходовой тормоз имеет ход якоря электромагнита, близкий или равный перемещению фрикционных элементов (колодок), а ход якоря электромагнита длинноходового тормоза в несколько раз превышает это перемещение.

Принцип действия нормально замкнутого колодочного тормоза с приводом от электромагнита состоит в следующем. В исходном (нормальном) положении, когда электромагнит не подключен к источнику питания, его колодки с помощью пружины прижимаются к тормозному шкиву, расположенному на валу двигателя, и затормаживают его. При включении двигателя напряжение одновременно подается и на обмотку электромагнита. Якорь электромагнита, притягиваясь к сердечнику, растормаживает колодки тормоза, и двигатель начинает вращаться. При отключении двигателя теряет питание и электромагнит, и пружина вновь прижимает колодки к шкиву, обеспечивая торможение электропривода. Для обеспечения такой работы электромагнита его обмотка обычно подключается непосредственно на якорь ДПТ или статор АД.

В электроприводах постоянного тока применяют тормоза серии ТКП с короткоходовыми электромагнитами. Они выпускаются на тормозные моменты до 500 Н·м и имеют расчетный ход 1,2–4,5 мм. Тормоза серий ТКП 400–ТКП 800 рассчитаны на тормозные моменты до 12 500 Н·м при ходе до 5 мм. Износостойкость этих тормозов составляет  $5 \cdot 10^6$  циклов.

В длинноходовых тормозах постоянного тока применяют электромагниты типа КМП и ВМ с тормозными моментами до 50 Н·м и максимальным ходом колодок до 4,5 мм (при ходе якоря до 120 мм). Износостойкость длинноходовых электромагнитов составляет примерно  $1 \cdot 10^6$  циклов.

Время включения тормозов постоянного тока составляет 0,15–2,5 с, а выключения 0,1–0,6 с. При использовании форсировки время их включения сокращается до 0,1–1,0 с.

Для электроприводов переменного тока выпускают тормоза серии ТКТ с короткоходовыми однофазными электромагнитами типов МО100 и МО200. Они рассчитаны на тормозные моменты 11–240 Н·м и имеют износостойкость до  $1,5 \cdot 10^6$  циклов. Собственное время включения электромагнитов около 0,03 с, а время отключения 0,02 с.

Длинноходовые тормоза переменного тока серии КМТ рассчитаны на тормозные моменты 450–4000 Н·м и имеют ход электромагнита в пределах 50–800 мм. Время их включения 0,1–0,5 с, а отключения 0,15–0,6 с. Износостойкость этих тормозов составляет  $(0,4–1) \cdot 10^6$  циклов.

В электроприводах некоторых производственных механизмов, в первую очередь крановых, в тормозах переменного тока применяют так называемые электрогидравлические толкатели (ЭГТ), которые имеют более высокую износостойкость, обеспечивают плавную работу тормоза, характеризуются меньшим потреблением тока и большей надежностью в работе.

Электрогидравлический толкатель представляет собой комплексное устройство, включающее в себя электродвигатель переменного тока небольшой (до 0,4 кВт) мощности, центробежный насос и гидроцилиндр с поршнем. Внутренняя полость ЭГТ заполняется маслом.

Работает ЭГТ следующим образом. При подаче на двигатель напряжения он начинает вращать крыльчатку насоса. Последний создает давление под поршнем, который начинает перемещаться вместе со штоком вверх и растормаживать колодки тормоза. В самом верхнем положении открываются каналы в цилиндре, масло перетекает в нижнюю часть ЭГТ и движение прекращается. Время подъема и опускания штока ЭГТ обычно составляет 0,3–1,5 с.

Выпускаемые тормоза с ЭГТ серий ТКТГ рассчитаны на тормозные моменты 100–12 500 Н·м при ходе колодок 1,2–1,8 мм. Срок службы тормозов с ЭГТ составляет 10 лет при числе циклов до  $4 \cdot 10^6$ .

Кроме тормозов, представляющих собой отдельные устройства, в электроприводах широкое применение находят встраиваемые в двигатель тормоза, составляющие с ним единый конструктивный модуль. Такие тормоза выполняются, как правило, дисковыми и управляются от электромагнитов постоянного и переменного тока.

В отечественной практике применяют также многодисковые тормоза с электромагнитами переменного тока типа ТМТ и постоянного тока типа ТДП. Момент торможения обеспечивается в них центральной пружиной, которая прижимает друг к другу подвижные и неподвижные диски. Растормаживание происходит, как и в обычных тормозах, при подаче напряжения на

двигатель и обмотку электромагнита, состоящую из нескольких секций, располагающихся по окружности на общем тороидальном магнитоприводе.

Электродвигатели со встраиваемыми электромагнитными тормозами выпускают в составе серий 4А, краново-металлургических двигателей и ряде других.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ**

---

1. Назовите релейно-контактные устройства, применяемые для управления электроприводами.
2. Каковы преимущества бесконтактных электрических аппаратов для управления электроприводами?
3. Сформулируйте назначение пакетных выключателей.
4. Опишите устройство и принцип действия магнитного пускателя.
5. Каково функциональное назначение автоматических выключателей?
6. Сформулируйте принцип действия теплового реле.
7. В чем заключается назначение датчиков?
8. Опишите назначение и область применения электромагнитных муфт.

### **3. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

---

---

Автоматическое управление электроприводами является одним из основных условий производительности механизмов. Управление электроприводами заключается в регулировании скорости; осуществлении пуска, торможения, реверсирования, а также поддержания режима работы привода в соответствии с требованиями технологического процесса.

В системе управления электроприводом используются релейно-контактные аппараты, где основными элементами являются различного рода реле, контакторы, путевые выключатели, усилители, преобразовательные устройства и датчики, бесконтактные логические элементы, различные элементы цифровой и аналоговой вычислительной техники, микропроцессоры, микроЭВМ и т. п. Выбор типа устройств для построения систем управления и типа самих систем управления определяется требованиями к электроприводу и теми функциями, которые он должен выполнять.

Различают системы управления разомкнутые и замкнутые. Разомкнутые системы отличаются той особенностью, что изменение возмущающих воздействий (например, нагрузки на валу двигателя) приводит к изменению ранее заданного режима работы привода. В замкнутых системах независимо от состояния возмущающих воздействий можно поддерживать заданный режим работы привода. В замкнутых системах автоматического управления при пуске, торможении или регулировании скорости привода может быть обеспечено непрерывное изменение тока, мо-

мента, скорости, положения по требуемому закону. В замкнутых системах используют обратные положительные и отрицательные обратные связи.

В настоящее время широкое применение находят следящий электропривод, электропривод с программным управлением и электропривод с адаптивным управлением.

Следящим называют электропривод, который производит с заданной точностью движение исполнительного органа рабочей машины в соответствии с произвольно изменяющимся входным сигналом управления. Обычно входной сигнал представляет собой скорость или угол поворота оси (вала) задающего устройства. Основным показателем работы следящего электропривода является точность воспроизведения входного сигнала, которая характеризуется ошибкой его воспроизведения в разных режимах работы.

Электропривод с программным управлением обеспечивает движение исполнительного органа рабочей машины по определенной, заранее заданной программе. Наибольшее распространение получило числовое программное управление металлорежущими станками, что позволило увеличить их производительность, уменьшить количество брака, перейти к многостаночному обслуживанию и тем самым получить значительный экономический эффект.

Электропривод, в котором способ функционирования его системы управления автоматически и целенаправленным образом изменяется для осуществления наилучшего протекания технологического процесса рабочей машины, называют электроприводом с адаптивным или самоприспосабливающимся управлением. Электропривод с адаптивным управлением обеспечивает наилучший ход технологического процесса по заданному показателю качества при изменяющихся возмущениях и условиях работы. Адаптация (самоприспособление) – автоматическое изменение способа функционирования системы управления. В рабочей машине часто требуется регулирование скорости исполнительного органа.

Возможны два способа регулирования скорости электропривода – параметрический и с помощью обратных связей в разомкнутых системах. Первый предусматривает получение искусственных механических характеристик с помощью изменения

параметров электродвигателя или его цепей. Второй способ обеспечивает формирование требуемых механических характеристик с помощью различных обратных связей – по току, скорости, моменту.

Регулирование скорости электропривода характеризуется рядом показателей.

*Диапазон регулирования* определяет возможные при данном способе пределы изменения скорости.

*Точность регулирования* определяется возможными отклонениями скорости от ее заданного значения под действием возмущающих факторов.

*Плавность регулирования* характеризуется числом значений регулируемой скорости, реализуемым в данном диапазоне.

*Стабильность частоты вращения* определяется диапазоном ее изменения при заданном отклонении момента статической нагрузки. Показатель стабильности зависит от жесткости механической характеристики (чем выше жесткость, тем выше стабильность).

*Экономичность регулирования* оценивается затратами, идущими на сооружение привода и его эксплуатацию. Экономичность является комплексным показателем, отражающим производительность привода, его надежность, затраты энергии при регулировании.

*Допустимая нагрузка* – это наибольшее значение момента статической нагрузки, которое двигатель способен продолжительно развить на любой искусственной характеристике, не перегреваясь.

В простых системах управления электроприводами применяют разомкнутые структуры, не содержащие обратных связей между исполнительными и управляющими органами. Такие системы используют при невысоких требованиях к показателям регулирования параметров движения исполнительных органов рабочих машин.

На рисунке 3.1 приведена схема разомкнутой системы регулирования скорости электропривода с ДПТ НВ. Якорь ДПТ НВ подключен к выходу регулируемого выпрямителя  $I$ , получающего питание от трехфазной сети переменного тока. Выходное напряжение выпрямителя  $U_B$  устанавливается при помощи задатчика  $R_3$ . Контроль частоты вращения вала электродвигателя

осуществляется по измерительному прибору 3, получающему питание от тахогенератора 2 (ТГ), механически связанного с валом электродвигателя. Отклонение скорости электропривода от заданной при изменении нагрузки на валу ДПТ НВ устанавливается оператором вручную при помощи  $R_3$ .

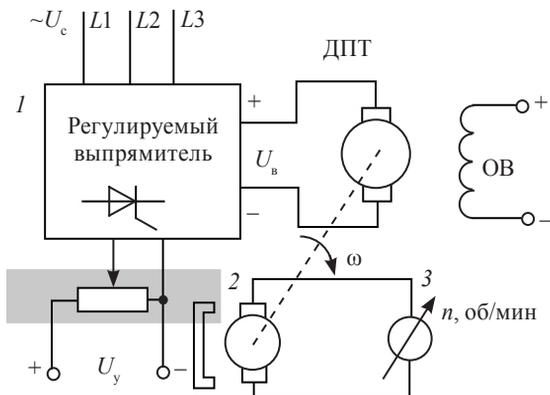


Рис. 3.1. Схема разомкнутой системы регулирования скорости электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения

## 3.1. РАЗОМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Разомкнутые приводы, осуществляющие параметрическое регулирование, просты по исполнению, но не обеспечивают стабильность частоты вращения вала двигателя при изменении нагрузки и имеют малый диапазон регулирования скорости. Если необходим широкий диапазон регулирования, схему электропривода усложняют введением одной или нескольких обратных связей (ОС), переходя таким образом к *замкнутой системе регулирования*.

### 3.1.1. Силовые преобразователи частоты переменного тока

Принцип частотного регулирования скорости асинхронного двигателя рассмотрен с помощью преобразователя частоты (ПЧ) в подпункте 1.7.7.

Функциональная схема ПЧ приведена на рисунке 3.2. Переменное напряжение  $u_{вх}$  с частотой  $f_{вх}$  подается на вход выпрямителя. Фильтр сглаживает пульсации выходного напряжения  $U_d$  выпрямителя. Автономный инвертор (его выходные частота и напряжение формируются собственной системой управления) преобразует выпрямленное напряжение в трехфазное переменное  $u_{вых}$  заданной частоты  $f_{вых}$ . Двухступенчатое преобразование электрической энергии позволяет получить выходную частоту как ниже, так и выше частоты питающей сети (50 Гц).



Рис. 3.2. Функциональная схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока

Неуправляемый выпрямитель (трехфазный или однофазный) выполняют по мостовой схеме. Некоторые ПЧ могут содержать управляемый выпрямитель, обычно на IGBT-транзисторах. Фильтр — емкостный, с конденсатором большой емкости. Возможны варианты ПЧ с инверторами тока и напряжения. В преобразователях, предназначенных для электроприводов с широким диапазоном регулирования частоты выходного напряжения, применяют инвертор напряжения.

На рисунке 3.3 приведена наиболее распространенная схема преобразователя частоты с неуправляемым выпрямителем напряжения в звене постоянного тока и с мостовым трехфазным инвертором на IGBT-транзисторах, работающих в ключевом режиме. Для возврата реактивной мощности активно-индуктивной нагрузки транзисторы в обратном направлении зашунтированы диодами (иногда их называют «антипараллельными» диодами). Регулирование выходного напряжения инвертора осуществляется методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

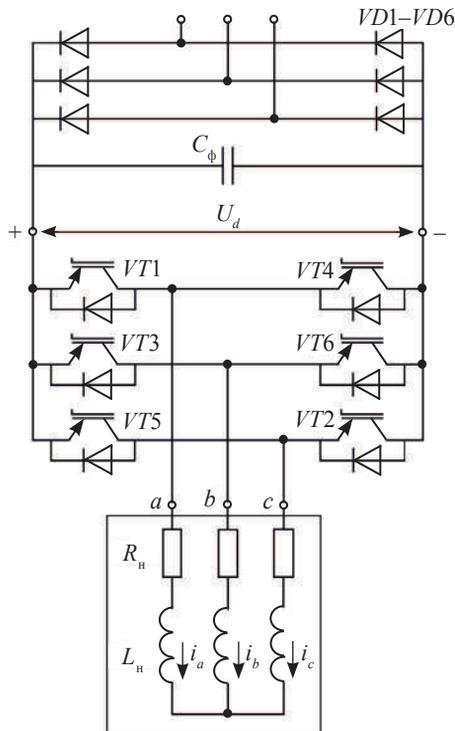


Рис. 3.3. Принципиальная схема преобразователя частоты с автономным инвертором с ШИМ-модуляцией

Принцип ШИМ инвертора напряжения рассмотрим на примере однофазной мостовой схемы (рис. 3.4). Когда открыты транзисторы  $VT1$  и  $VT4$  (момент времени  $t = t_1$ ) напряжение на нагрузке имеет полярность, указанную на рисунке 3.4 без скобок, а ток в нагрузке нарастает по экспоненциальному закону (рис. 3.5). В момент времени  $t_2$  на транзисторы  $VT1$  и  $VT4$  поступают запирающие сигналы, и транзисторы закрываются. В это же время подаются отпирающие сигналы на транзисторы  $VT2$  и  $VT3$ . Однако ток в индуктивности не может измениться скачком, поэтому он будет продолжать протекать в том же направлении, но уже не через транзисторы  $VT1$ ,  $VT4$  или  $VT2$ ,  $VT3$ , а через диоды  $VD2$  и  $VD3$ . Условия для протекания тока через диоды определяются противоЭДС индуктивной нагрузки, которая выше напряжения источника питания  $U_d$ . При этом напряжение на нагрузке изменит

полярность. Закон протекания тока тот же – экспоненциальный, но сам ток при этом уменьшается.

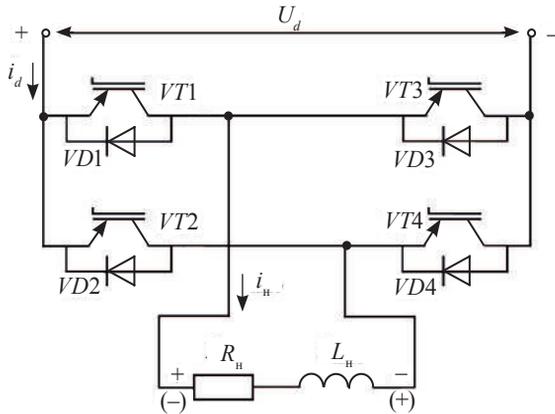


Рис. 3.4. Схема однофазного инвертора напряжения с ШИМ

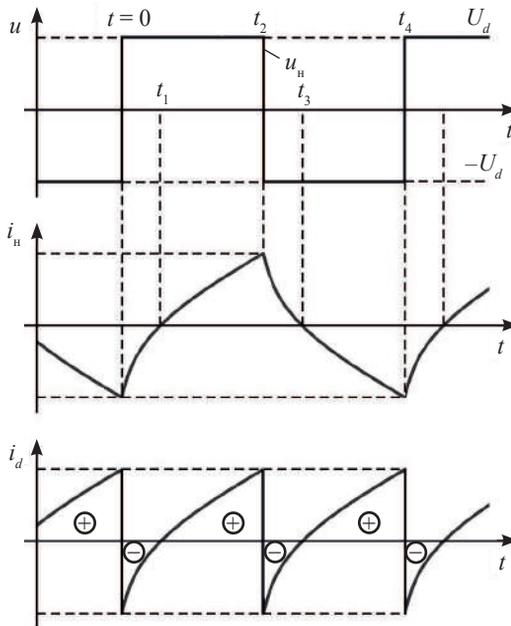


Рис. 3.5. Временные диаграммы тока  $i_d$ , потребляемого от источника выпрямленного напряжения

При спадаении тока до нуля диоды  $VD2$  и  $VD3$  закроются и ток будет проходить через IGBT-транзисторы  $VT2$  и  $VT3$ , на затворах которых с момента времени  $t_2$  присутствует отпирающий сигнал. Далее процессы периодически повторяются, и в нагрузке формируется напряжение прямоугольной и ток экспоненциальной формы.

Обратно включенные диоды  $VD1$ – $VD4$  защищают транзисторы от перенапряжений. Когда диоды открыты, через них происходит возврат энергии из нагрузки обратно в направлении звена постоянного тока.

На рисунке 3.5 показаны временные диаграммы тока  $i_d$ , потребляемого от источника постоянного напряжения. На ней положительные площади соответствуют потреблению энергии от источника, а отрицательные – приему энергии источником.

Частота переключения ключей  $f_1 = 1/t_{\text{ц}}$  составляет 2–20 кГц, что позволяет формировать близкие к синусоидальным токи в обмотках статора электродвигателя. Процесс формирования напряжения на выходе инвертора показан на рисунке 3.6. Основная частота в 10 раз меньше частоты ШИМ (за период выходного сигнала формируется 10 прямоугольных импульсов напряжения).

Среднее значение выходного напряжения за период модуляции определяется соотношением положительной и отрицательной частей импульса. Ток в нагрузке формируется в межкоммутационных интервалах из участков экспонент. Если частота импульсов будет еще выше, чем это показано на рисунке 3.6 (например, на два-три порядка), то форма кривой тока будет приближаться к синусоидальной.

При работе трехфазного инвертора в каждом интервале коммутации две обмотки соединяются параллельно и подключаются последовательно с третьей обмоткой, а на выходе инвертора формируется трехфазная система напряжений.

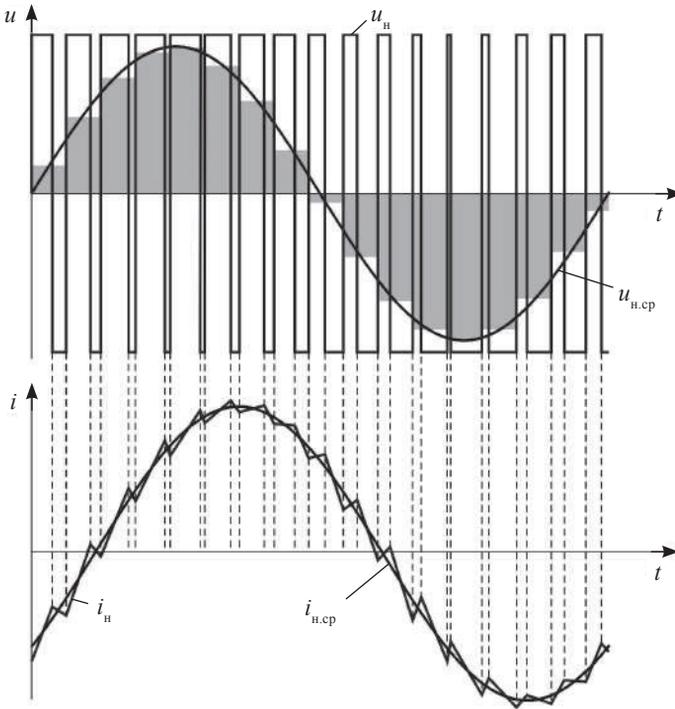


Рис. 3.6. Процесс формирования синусоидального напряжения на выходе инвертора

### 3.1.2. Структура и основные элементы электропривода с асинхронным электродвигателем

Аппаратные средства и программное обеспечение современных ПЧ позволяет создавать различные системы нерегулируемого и регулируемого электропривода: простые разомкнутые и сложные замкнутые, обеспечивающие поддержание различных параметров технологических процессов.

Состав простого электропривода с АД представлен на рисунке 14 (вклейка). Он содержит вводной автоматический выключатель, электромагнитный пускатель, электротепловое реле, реле контроля фаз и уровня напряжения, кнопки управления и асинхронный электродвигатель. Такая конфигурация электро-

привода позволяет производить дистанционное управление АД: пуск, остановку; при наличии в схеме двух пускателей – реверс. Обеспечивается защита от перегрузок, коротких замыканий, «нулевая защита» – невозможность самозапуска АД после перебоя в электроснабжении. Реле контроля фаз и уровня питающего напряжения не допускает запуск при неправильном чередовании фаз и при недопустимом снижении напряжения.

Выбор конфигурации частотно-регулируемого электропривода, преобразователей частоты и дополнительных элементов зависит от требований в отношении диапазона регулирования скорости, жесткости механических характеристик, динамики и т. п. При больших диапазонах регулирования скорости и высоких требованиях к динамике применяют бездатчиковое векторное управление, а в случае использования датчиков обратной связи можно получить диапазон регулирования не менее 1000 при сохранении жесткости во всем диапазоне.

Частотно-регулируемый привод следует рассматривать в совокупности с преобразователем частоты, электродвигателем, источником электроснабжения, коммутационными аппаратами, кабелями сети, двигателя и управления, дросселями, фильтрами, заземлением, дополнительными устройствами, а также с режимами работы приводимой машины или механизма. На рисунке 3.7 приведена структура частотно-регулируемого электропривода с основными элементами.

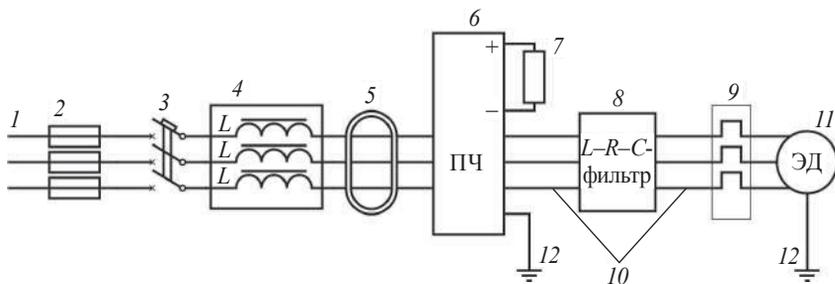


Рис. 3.7. Структура частотно-регулируемого электропривода с основными элементами:

- 1 – кабель сети; 2 – сетевые предохранители; 3 – автоматический выключатель; 4 – сетевая дроссель; 5 – фильтр радиоподем;
- 6 – преобразователь частоты; 7 – тормозной резистор; 8 – синусный (L–R–C)-фильтр; 9 – тепловое реле; 10 – кабель двигателя;
- 11 – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; 12 – заземление

Сетевые плавкие быстродействующие предохранители предназначены для защиты силовых вентилях ПЧ при внутренних коротких замыканиях. Такие предохранители должны иметь время срабатывания единицы микросекунд и устанавливаются в цепи питания после питающего кабеля. Автоматический выключатель предназначен для включения-отключения цепей питания ПЧ перед запуском привода и после его остановки. Он защищает ПЧ от коротких замыканий и перегрузок и должен иметь защитную характеристику «В» (кратность тока срабатывания при коротких замыканиях не более 3–5). Для дистанционного управления электроприводом входные и выходные цепи ПЧ могут содержать электромагнитные контакторы, но они не предназначены для запуска и остановки электропривода, а коммутируются перед запуском ПЧ и после его остановки собственными органами управления.

Дроссели и фильтры обеспечивают электромагнитную совместимость ПЧ с другим оборудованием. При работе ПЧ из-за коммутации силовых ключей в цепях с индуктивной нагрузкой (обмотки электродвигателя) возникают электромагнитные помехи. Они влияют на работу электронного оборудования и приводят к сбоям и отказам, в том числе самого ПЧ. Переключение силовых транзисторов с высокой скоростью для реализации ШИМ-регулирования — основная причина помех. В момент переключения возникает ток помехи, стекающий на «землю» через инвертор, силовой кабель и паразитную емкость двигателя. Электрическое заземление и экранирование ПЧ, применение экранированных кабелей для силовых цепей и цепей управления наряду с применением дросселей и фильтров эффективно снижает уровень помех. Сетевой дроссель повышает коэффициент мощности электропривода и должен устанавливаться, если мощность сетевого источника питания превышает мощность ПЧ в 6 раз и более, а также при длине питающего кабеля меньше 10 м. При возникновении коммутационных или атмосферных перенапряжений на входе питания ПЧ дроссель ограничивает скорость нарастания тока через диоды выпрямителя ПЧ и через транзисторы IGBT-модуля.

Кроме того, сетевой дроссель не пропускает в питающую сеть высшие гармоники от ПЧ и снижает помехи по сети. Фильтр радиопомех представляет собой ферритовый сердечник, через ко-

торый пропущены все четыре жилы питающего кабеля (иногда наматывают 3–4 витка кабеля). Такой фильтр подавляет помехи, излучаемые кабелем, и эффективен в радиодиапазоне.  $LC$ -фильтр состоит из индуктивных и емкостных элементов. Он эффективно подавляет помехи в диапазоне до 10 МГц. Уровень радиопомех дополнительно снижается экранированием силовых и сигнальных кабелей. Синусный ( $L-R-C$ )-фильтр предназначен для снижения скорости нарастания напряжения импульсной формы на обмотках статора АД. Синус-фильтр ограничивает скорость нарастания пиков перенапряжения на обмотках статора, что позволяет увеличить длину кабеля от ПЧ к двигателю до 300 м. Этот фильтр, подключенный на выходе инвертора, улучшает форму напряжения с ШИМ, поэтому по обмоткам статора протекают токи с формой, близкой к синусоидальной. Частота ШИМ устанавливается в пределах 1–15 кГц. В некоторых случаях в непосредственной близости к ПЧ устанавливают моторные дроссели. Они компенсируют емкостные токи длинных кабелей между ПЧ и АД, что позволяет увеличить их длину. Тормозной резистор применяют в режиме торможения АД, работающего в генераторном режиме при снижении частоты и угловой скорости вращения ротора.

Трехфазный переменный ток АД при торможении преобразуется инвертором в постоянный, что приводит к повышению напряжения на конденсаторе сглаживающего фильтра выпрямителя. Тормозной резистор предназначен для рассеивания на нем энергии торможения и снижения перенапряжения в звене постоянного тока. Преобразователи обычно содержат встроенный тормозной модуль с транзисторным ключом, коммутирующим тормозной резистор. Для правильного выбора тормозного резистора необходимо определить кинетическую энергию вращающихся масс и время, за которое она снижается до нуля или до заданного уровня. Для расчетов используют циклограмму работы привода, по которой определяют изменения нагрузки за определенные промежутки времени. Преобразователи мощностью до 15 кВт имеют встроенный модуль торможения, при большей мощности выбранные тормозные резисторы устанавливаются отдельно от преобразователя. К выходу ПЧ может подключаться как стандартный, так и специальный АД с короткозамкнутым ротором.

Следует учитывать, что при работе стандартного АД на пониженной частоте вращения с моментом, близким к номинальному, возможен перегрев электродвигателя из-за ухудшения охлаждения (снижается обдув АД собственным вентилятором). Иногда для охлаждения АД устанавливают внешний вентилятор. Стандартный электродвигатель может работать в длительном номинальном режиме только при номинальной частоте вращения, поэтому для предотвращения перегрева следует снижать нагрузку на валу. При работе стандартного АД на повышенных частотах следует учитывать ограничения, связанные с ресурсом подшипников и с повышенной вибрацией из-за небаланса ротора и приводимого механизма.

### 3.2. ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Замкнутые САУ электропривода строятся по принципам компенсации возмущения и отклонения (по принципу обратной связи). На рисунке 3.8 представлена схема замкнутой структуры электропривода с компенсацией возмущения.

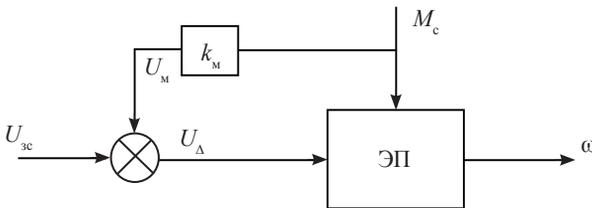


Рис. 3.8. Схема замкнутой САУ электропривода с компенсацией возмущения:  $U_{зс}$  – задающий сигнал скорости;  $U_м = k_м M_c$  – сигнал, пропорциональный моменту нагрузки  $M_c$ ;  $U_Δ$  – суммарный сигнал управления, который автоматически изменяется в нужную сторону при колебаниях момента нагрузки, обеспечивая с помощью системы управления поддержание скорости электропривода на заданном уровне

Построенный по схеме электропривод (см. рис. 3.8) эффективен, но требует применения надежных датчиков вращающего момента.

Большинство замкнутых САУ строится по принципу отклонения. Пример автоматического регулятора скорости по отклонению с цепью отрицательной обратной связи (ОС) по скорости показан на рисунке 3.9.

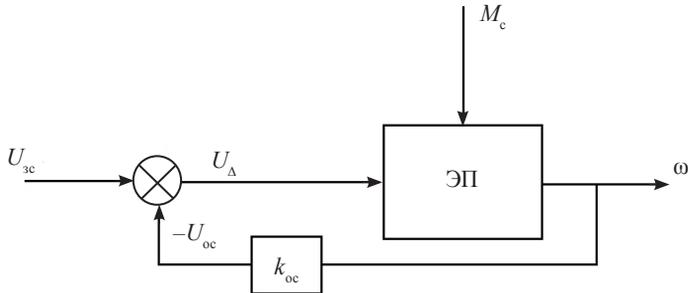


Рис. 3.9. Схема замкнутой САУ электропривода с цепью ОС по скорости:  $U_{зс}$  – задающий сигнал скорости;  $U_{ос} = k_{ос} \omega$  – сигнал обратной связи, который вычитается из сигнала задания скорости  $U_{зс}$ ;  $U_{\Delta}$  – суммарный сигнал управления, который автоматически изменяется в зависимости от рассогласования сигнала задания скорости и сигнала ОС и с помощью системы управления ЭП устраняет отклонение скорости

Обратные связи, применяемые в электроприводе, делят на положительные и отрицательные, линейные и нелинейные, жесткие и гибкие. Положительной называют такую ОС, сигнал которой направлен согласно заданию (складывается), в то время как сигнал отрицательной ОС направлен ему встречно.

Жесткая ОС действует в установившемся и переходном режимах работы электропривода. Сигнал гибкой ОС вырабатывается только в переходных режимах электропривода и служит для обеспечения требуемого их качества, например устойчивости движения, допустимого перерегулирования и т. д.

Линейная ОС характеризуется пропорциональной зависимостью между регулируемой координатой и сигналом обратной связи; при реализации нелинейной зависимости эта связь нелинейна.

В зависимости от вида регулирования координаты в электроприводе различают обратные связи по скорости, положению, току, напряжению, моменту и т. д.

В замкнутой системе регулирования скорости ДПТ НВ (рис. 3.10) тахогенератор включен в цепь управления регулируемого выпрямителя (РВ) последовательно с управляющим напряжением  $U_{впр}$ , в результате чего образуется отрицательная ОС по скорости. Ток, создаваемый тахогенератором, направлен на-

встречу току управления, и в цепи управления действует разность напряжений, где  $U_{ТГ}$  — напряжение тахогенератора, пропорциональное частоте вращения вала ДПТ.

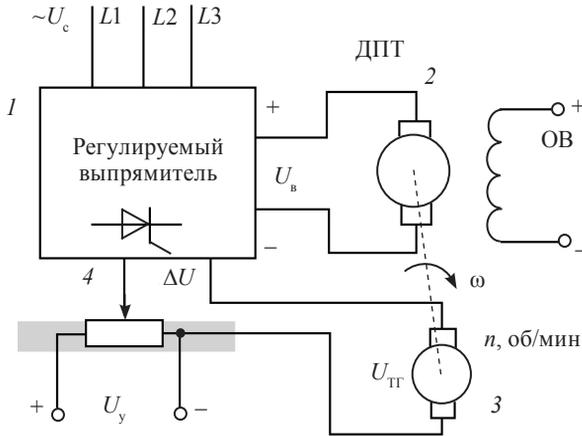


Рис. 3.10. Схема замкнутой системы регулирования скорости электропривода с ДПТ НВ

Потенциометром  $R_3$  устанавливается такое значение  $\Delta U$ , при котором обеспечивается необходимая частота вращения. В дальнейшем система автоматически с определенной погрешностью поддерживает заданную частоту вращения. Так, при возрастании момента сопротивления на валу ДПТ его скорость уменьшается, что приводит к уменьшению ЭДС тахогенератора. При этом  $\Delta U$  возрастает и увеличивает выходное напряжение регулируемого выпрямителя  $U_B$ , соответственно возрастают напряжение на якоре ДПТ и его частота вращения. Процесс возрастания скорости будет продолжаться до тех пор, пока  $\Delta U$  не достигнет заданного значения, а скорость вала ДПТ — заданной величины. Аналогичные процессы происходят при уменьшении нагрузки на валу.

### **Регулирование скорости электропривода переменного тока в замкнутых системах управления**

Замкнутая САУ асинхронным электроприводом, выполненным по схеме «тиристорный регулятор напряжения — асинхронный электродвигатель» позволяет регулировать скорость асинхронного электродвигателя с повышенным скольжением.

Рассмотрим схему регулирования скорости АД при помощи тиристорного регулятора напряжения (ТРН) (рис. 3.11). В цепь статора АД включены три пары встречно-параллельно соединенных тиристоров  $VS1-VS6$ , образующих силовую часть ТРН. Управляющие электроды тиристоров подсоединены к выходам системы импульсно-фазового управления (СИФУ), которая распределяет управляющие импульсы на все тиристоры и осуществляет их фазовый сдвиг относительно сетевого напряжения в зависимости от управляющего сигнала  $U_y$ . С валом АД механически связан вал тахогенератора ТГ. Его ЭДС  $E_{ТГ}$  сравнивают с задающим напряжением  $U_3$ , снимаемым с задающего потенциометра скорости  $R_3$ . Разность  $U_3$  и  $E_{ТГ}$ , равная напряжению управления  $U_y = U_3 - E_{ТГ}$ , поступает на вход СИФУ. При увеличении этого сигнала угол управления тиристорами уменьшается, а напряжение, приложенное к статору АД, увеличивается.

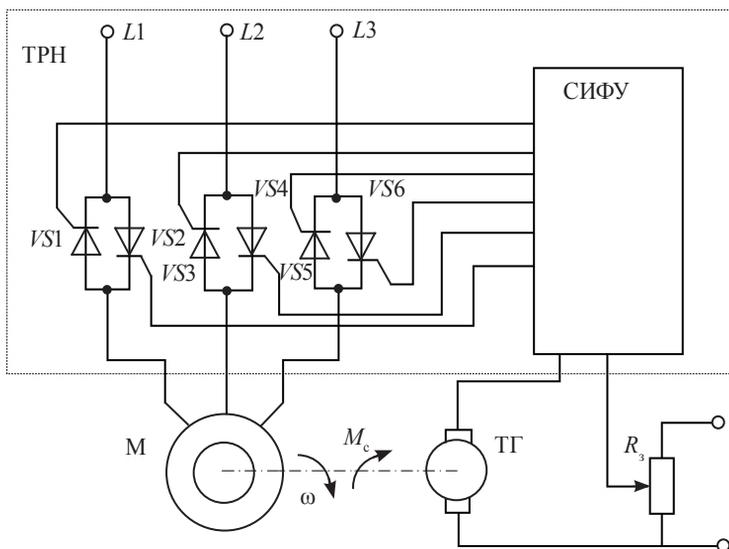


Рис. 3.11. Схема замкнутой системы регулирования скорости «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный электродвигатель»

При увеличении на валу АД его скорость уменьшается, соответственно уменьшается и ЭДС тахогенератора  $E_{ТГ}$ . Уменьшение  $E_{ТГ}$  приводит к увеличению  $U_y$  и уменьшению угла управления,

в результате чего подаваемое на АД напряжение увеличивается. Момент АД возрастает, и снижение скорости будет небольшим, т. е. жесткость механической характеристики АД благодаря отрицательной обратной связи по скорости увеличится. При уменьшении момента нагрузки напряжение на статоре АД автоматически снижается, в результате скорость привода будет поддерживаться на заданном уровне.

Рассмотренная схема не обеспечивает энергетически и функционально эффективного управления асинхронным электроприводом и применяется для АД с повышенным скольжением мощностью до 1 кВт, а также в устройствах плавного пуска (УПП).

### **3.3. СИСТЕМЫ С ЧИСЛОВЫМИ ПРОГРАММНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ**

Под управлением станком принято понимать совокупность воздействий на его механизмы, обеспечивающие выполнение технологического цикла обработки, а под системой управления — устройство или совокупность устройств, реализующих эти воздействия.

Любая система программного управления, как правило, состоит из следующих устройств:

- программоноситель, на котором записана программа работы исполнительных механизмов станка;
- устройство ввода программы;
- считывающее устройство, которое превращает программу в электрические сигналы управления;
- преобразующее устройство, которое преобразует полученные сигналы в рабочие команды и подает их приводу исполнительных органов станка;
- привод исполнительных органов станка;
- система обратной связи для активного контроля соответствия действительных перемещений исполнительных органов с заданными по программе.

В станках с числовым программным управлением (ЧПУ) имеются задающее и следящее устройства, система исполнения команд. В задающем устройстве образуются управляющие сигналы, которые подаются в следящий механизм. Следящий ме-

ханизм сравнивает заданную программу с выполненной и при их расхождении подает сигналы исполнительному устройству для корректирования траектории движения режущего инструмента.

**Числовое программное управление** — это управление, при котором программу задают в виде записанного на каком-либо носителе массива информации. Управляющая информация для систем ЧПУ является дискретной и ее обработка в процессе управления осуществляется цифровыми методами. Управление технологическими циклами практически повсеместно осуществляется с помощью программируемых логических контроллеров, реализуемых на основе принципов цифровых электронных вычислительных устройств.

Системы ЧПУ практически вытесняют другие типы систем управления.

### 3.3.1. Виды систем программного управления

По технологическому назначению и функциональным возможностям системы ЧПУ подразделяют на четыре группы.

1. **Позиционные**, в которых задают только координаты конечных точек положения исполнительных органов после выполнения ими определенных элементов рабочего цикла; в позиционных системах управления рабочие органы могут перемещаться в заданные точки, а траектория перемещения от точки до точки задается только прямолинейным движением (рис. 3.12).

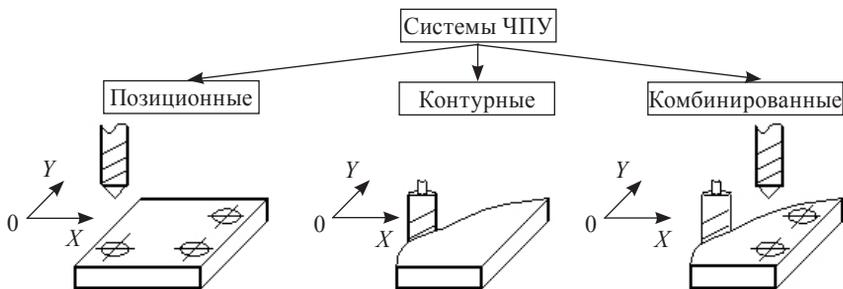


Рис. 3.12. Виды систем ЧПУ

Позиционные устройства ЧПУ составляют группу устройств, имеющих один общий признак — позиционирование, т. е. обеспечение точности остановки перемещаемых рабочих органов в точке с заданными координатами. Скорость перемещения в по-

зиционных устройствах не программируется и обусловлена только динамикой приводов станка. Позиционными устройствами ЧПУ оснащают сверлильные, координатно-расточные, токарные, фрезерные, шлифовальные и другие станки, работающие по прямоугольному циклу.

2. *Контурные прямоугольные (коллинеарные)* – устройства, которые обеспечивают движение по одной координате. Так как в большинстве станков применяют прямоугольную систему координат, такие устройства получили название прямоугольных. В этих устройствах, так же как и в позиционных, программируются конечные координаты перемещения, однако в управляющей программе задается скорость движения рабочего органа в соответствии с заданным режимом резания, и перемещение выполняется поочередно по каждой из координатных осей. Прямоугольные устройства ЧПУ применяют в станках фрезерной, токарной и шлифовальной групп.

3. *Контурные (непрерывные)* – управляют движением исполнительного органа по заданной криволинейной траектории (см. рис. 3.12). Контурными устройствами ЧПУ оснащают станки фрезерной и токарной групп, осуществляющих формообразование деталей сложной формы.

4. *Универсальные (комбинированные)*, в которых осуществляется программирование как перемещений при позиционировании, так и движения исполнительных органов по траектории, а также смены инструментов и загрузки-выгрузки заготовок (см. рис. 3.12). К этой группе относят системы ЧПУ различных многоцелевых токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков.

В моделях станков с ЧПУ для обозначения степени автоматизации добавляется буква  $\Phi$  с цифрой:  $\Phi 1$  – станки с цифровой индикацией и преднабором координат;  $\Phi 2$  – станки с позиционными и прямоугольными системами ЧПУ;  $\Phi 3$  – станки с контурными системами ЧПУ и  $\Phi 4$  – станки с универсальной системой ЧПУ для позиционной и контурной обработки.

По принципу управления (числу потоков информации) системы ЧПУ делят на следующие группы:

- с разомкнутым контуром – устройство ЧПУ, в котором имеется только один поток информации. В таких системах отсутствуют измерительные устройства (датчики обратной связи), контролирующие перемещение рабочих органов. Точность вос-

произведения движения рабочих органов с такой системой невысока и определяется точностью отработки команд двигателем привода подач и точностью кинематической цепи, передающей движение рабочему органу;

- с замкнутым контуром – устройство ЧПУ, в котором существуют два потока информации: один вводится в устройство управления через вводное устройство от программоносителя, а другой – в устройство ЧПУ от датчиков обратной связи, определяющих действительное положение рабочих органов. При наличии рассогласования между этими потоками устройство управления воздействует на приводы подач, последние перемещают рабочие органы в нужном направлении, изменяя рассогласование до величины, близкой к нулю.

Станки с ЧПУ по виду управления подразделяют:

- на станки с системами циклового программного управления (ЦПУ);
- станки с системами числового программного управления (ЧПУ).

Системы ЦПУ более просты, так как в них программируется только цикл работы станка, а величины рабочих перемещений, т. е. геометрическая информация, задаются упрощенно, например с помощью упоров. В станках с ЧПУ управление осуществляется от программоносителя, на который в числовом виде занесена и геометрическая, и технологическая информация.

Принципиальная особенность станка с ЧПУ – это работа по управляющей программе (УП), на которой записаны цикл работы оборудования для обработки конкретной детали и технологические режимы. При изменении обрабатываемой на станке детали необходимо просто сменить программу, что сокращает на 80–90 % трудоемкость переналадки по сравнению с трудоемкостью этой операции на станках с ручным управлением.

По способу подготовки и ввода управляющей программы различают так называемые оперативные системы ЧПУ (в этом случае УП готовят и редактируют непосредственно на станке, в процессе обработки первой детали из партии или имитации ее обработки) и системы, для которых управляющая программа готовится независимо от места обработки детали, с помощью средств вычислительной техники.

Основные преимущества станков с ЧПУ:

- производительность станка повышается в 1,5–2,5 раза по сравнению с производительностью аналогичных станков с ручным управлением;
- сочетается гибкость универсального оборудования с точностью и производительностью станка-автомата;
- снижается потребность в квалифицированных рабочих-станочниках, а подготовка производства переносится в сферу инженерного труда;
- детали, изготовленные по одной программе, являются взаимозаменяемыми, что сокращает время пригоночных работ в процессе сборки;
- сокращаются сроки подготовки и перехода на изготовление новых деталей благодаря предварительной подготовке программ, более простой и универсальной технологической оснастке;
- снижается продолжительность цикла изготовления деталей и уменьшается запас незавершенного производства.

### **3.3.2. Числовое программное управление**

В соответствии с международной классификацией (отражающей эволюцию развития систем управления оборудованием) системы ЧПУ можно разделить на следующие основные классы:

1) системы числового управления Numerical Control (NC) – системы ЧПУ с покадровым чтением перфоленты на протяжении цикла обработки каждой заготовки;

2) системы Stored Numerical Control (SNC) – системы ЧПУ с однократным чтением всей перфоленты перед обработкой партии одинаковых заготовок;

3) системы Computer Numerical Control (CNC) – системы ЧПУ со встроенной мини-ЭВМ (компьютером, микропроцессором);

4) системы Direct Numerical Control (DNC) – системы прямого числового управления группами станков от одной ЭВМ;

5) системы Handled Numerical Control (HNC) – оперативные системы ЧПУ с ручным набором программ на пульте управления;

6) системы Voice Numerical Control (VNC);

7) NEURO-Fuzzy системы управления.

Системы NC и SNC к настоящему времени давно устарели. Для хранения управляющей программы в них использовались

перфоленты (англ. punched tape) – носитель информации в виде узкой тонкой ленты из бумаги или пластмассы (рис. 15, вклейка). Информация на перфоленту записывалась пробивкой отверстий (перфораций). Ряды отверстий, расположенных поперек перфоленты, образовывали строки. На каждой строке записывался код одного символа управляющей программы.

Все современные системы ЧПУ имеют класс не ниже CNC, т. е. в устройстве имеется микропроцессор. Данные системы являются системами с переменной структурой, у которых основные алгоритмы работы задаются программно и могут изменяться. Системы класса CNC позволяют достаточно просто в режиме диалога при отладке программ осуществлять редактирование с ручным вводом информации через клавиатуру электронного пульта управления и с выводом ее на дисплей.

Создание и применение систем класса DNC связано с общей тенденцией развития современных комплексно-автоматизированных производств. В таких производствах управление работой участков, состоящих из станков с ЧПУ, транспортно-складирующих, загрузочных средств, осуществляется от центральной вычислительной машины. Однако наличие центральной ЭВМ не означает, что необходимость в устройствах ЧПУ у станков при этом полностью отпадает. В одном из наиболее распространенных вариантов построения систем DNC каждый вид оборудования на участке сохраняет свои системы ЧПУ классов NC, SNC, CNC. Нормальным для такого участка является режим работы, при котором управляющие команды на устройства ЧПУ всех видов оборудования подаются по проводам непосредственно от ЭВМ, минуя считывающие устройства. Это приводит к повышению надежности работы каждой единицы оборудования и всего участка в целом. Одновременно автоматизируется процесс подготовки управляющей программы с помощью ЭВМ.

В последнее время разработаны так называемые оперативные системы числового программного управления класса HNC с ручным вводом программ с пульта устройства ЧПУ. Программа из достаточно большого числа кадров легко набирается и исправляется с помощью клавиш или переключателей на пульте устройства ЧПУ. После отладки программа фиксируется до окончания обработки партии одинаковых заготовок. Системы класса HNC

обеспечивают как позиционное, так и контурное управление станками.

Дальнейшим развитием систем ННС являются системы VNC, у которых управляющая информация может вводиться непосредственно с голоса. Принятая информация затем отображается на экране дисплея, что обеспечивает визуальный контроль за правильностью ввода.

Базой для построения систем ЧПУ служат современные микропроцессорные системы управления с программируемой логикой работы: микроконтроллеры, управляющие компьютеры на базе микропроцессора. В качестве исполнительных механизмов применяют сервоприводы, шаговые двигатели. Для передачи данных между исполнительным механизмом и системой управления станком обычно используют промышленную сеть (например, CAN, Profibus, Industrial Ethernet).

Задачи, решаемые устройствами ЧПУ, можно разделить на четыре класса: геометрические, логические, технологические, терминальные.

*Геометрическая задача* — получение изделия, соответствующего чертежу, управляя приводами подачи станка и используя алгоритмы интерполяции программных траекторий движения.

*Логическая задача* — управление электроавтоматикой объекта управления, связанная с автоматизацией на станке вспомогательных или циклических операций (зажима-разжима, подвода-отвода, пуска-останова, автоматической смены инструмента и т. д.).

*Технологическая задача* присутствует в тех случаях, когда основной рабочий процесс сам становится объектом управления (либо в целях его поддержания, либо в целях оптимизации), например в гибком автоматизированном производстве.

*Терминальная задача* поддерживается устройством ЧПУ при применении компьютера. Диалог с оператором предполагает управление объектом в различных режимах, работы по созданию и отладке программного обеспечения, информационный обмен с ЭВМ верхнего уровня.

Структурно в состав ЧПУ входят:

- пульт оператора (или консоль ввода-вывода), позволяющий вводить управляющую программу, задавать режимы работы; выполнить операцию вручную. Как правило, внутри шкафа пульта современной компактной ЧПУ размещаются ее остальные части;

- дисплей (или операторская панель) – для визуального контроля режимов работы и редактируемой управляющей программы/данных; может быть реализован в виде отдельного устройства для дистанционного управления оборудованием;

- контроллер – компьютеризированное устройство, решающее задачи формирования траектории движения режущего инструмента, технологических команд управления устройствами автоматики станка, общим управлением, редактирования управляющих программ, диагностики и вспомогательных расчетов (траектории движения режущего инструмента, режимов резания);

- ПЗУ – память, предназначенная для долговременного хранения (годы и десятки лет) системных программ и констант; информация из ПЗУ может только считываться;

- ОЗУ – память, предназначенная для временного хранения управляющих программ и системных программ, используемых в данный момент.

В системах CNC-типа используют три основных способа обмена информацией:

- программируемый ввод-вывод;
- ввод-вывод по прерыванию;
- обмен информацией с прямым доступом к памяти (ПДП).

Использование того или иного способа зависит от быстроты действия самого процессора и обслуживаемого им внешнего устройства. В том случае, когда длительность приема и обработки вводимой информации не приводит к ее потере, приемлем программируемый ввод-вывод путем последовательного опроса (поллинга) каналов ввода-вывода по заложенной программе под контролем и по инициативе процессора. По сигналу синхронизации от процессора на адресные линии поступает информация об адресе конкретного внешнего устройства (порта), который дешифрируется внешним устройством, а затем процессор инициализирует процедуру «Чтение-запись». Запрошенный по указанному адресу порт активизируется и передает информацию на общую шину или принимает ее.

Роль процессора и внешнего устройства меняется при использовании режима ввода-вывода по прерыванию. В этом случае требование обмена информацией выставляется со стороны внешнего устройства в виде сигнала требования прерывания (ТПР), а готовность провести обмен данными подтверждается

процессором–сигналом предоставления прерывания (ППР). Удовлетворяя запрос на прерывание, процессор завершает выполнение текущей команды и переходит к выполнению подпрограммы обслуживания прерываний в соответствии с заданным вектором прерывания для данного внешнего устройства. При этом работает принцип LIFO (last in, first out – последний пришел, первый вышел) или FIFO (first in, first out – первый пришел, первый вышел) взаимодействия головной программы и подпрограмм обработки прерываний от внешних устройств через стековую память процессора. Обмен по прерыванию позволяет эффективнее использовать ресурсы процессора, но требует более развитых аппаратных и программных средств (контроллеры прерываний).

При необходимости обработки больших массивов информации с высоким быстродействием используют принцип обмена с прямым доступом в память, который предполагает исключение процессора из руководства обменом информацией и предоставление этого руководства внешнему устройству, которое захватывает управление общей шиной на себя. Аппаратное исполнение устройств, работающих по этому принципу, самое сложное и предполагает наличие контроллеров ПДП.

### **3.3.3. Операционные системы реального времени**

Системы ЧПУ реализуют управление сложными процессами и оборудованием при помощи ЭВМ. При этом все события в этих процессах – срабатывания различных датчиков (например, датчиков конечного положения) возможны в любой момент времени. Компьютер же может выполнять лишь конечное число операций в конечное время, поэтому возникает вопрос: а успеет ли компьютер с нужной скоростью обсчитать ситуацию и выдать конкретные управляющие действия, которые были бы адекватны именно в определенный момент времени? Ясно, что сигналы в природе распространяются с конечной скоростью, скорость работы компьютера тоже конечна, поэтому мгновенных действий (вызванных неким событием, например, срабатыванием датчика конечного положения рабочего органа системы) от компьютера ожидать принципиально невозможно. Ведь каким бы современным (читай – мощным по производительности, т. е. с высокой

скоростью обработки команд и операций) компьютер бы ни был – ему физически нужны хотя бы доли секунды, чтобы выполнить небольшую простую группу команд.

Таким образом, время реакции системы на некоторое событие строго больше нуля. Реальные задачи допускают некоторые запаздывания действий, и если система имеет время реакции меньше, чем эта допустимая задержка, то ее справедливо называть системой реального времени (СРВ). Так как в природе разные процессы протекают с разной скоростью, одна и та же система может укладываться в заданные рамки для одного процесса и не укладываться для другого. Следовательно, о СРВ имеет смысл говорить применительно к конкретной задаче. Например, чтобы построить зависимость средней температуры воздуха за день от дня недели, в качестве системы реального времени сойдет практически любой компьютер с любым программным обеспечением. Если же мы управляем посадкой самолета, где существенную роль играют миллисекунды, было бы более правильно внимательно выбирать аппаратное и программное обеспечение.

Следует отметить, что неудовлетворительная по запаздыванию работа системы в некоторых задачах может привести к фатальным последствиям, а в некоторых не произойдет никаких внештатных и нежелательных ситуаций. Например: если система измерения температуры из описанного выше примера случайно опоздает на непозволительное время, значит, мы просто изменили выборку точек съема температуры и все равно получили правильный результат; если же на секунду случайно задержится автомат захода на посадку в пассажирском самолете при внезапном порыве ветра, самолет может не попасть на полосу, и десятки людей погибнут. Таким образом, следует делить системы на системы жесткого и мягкого реального времени.

Системой жесткого реального времени называют систему, где неспособность обеспечить реакцию на какие-либо события в заданное время является отказом и ведет к невозможности решения поставленной задачи. Время реакции в системах жесткого реального времени должно быть минимальным. Большинство систем жесткого реального времени является системами контроля и управления. Такие СРВ сложны в реализации, так как к ним предъявляются особые требования в вопросах безопасности.

Точного определения мягкого реального времени не существует, поэтому можно отнести сюда все СРВ, не попадающие под категорию жестких. Так, система мягкого реального времени может не успевать все делать в заданное время, поэтому возникает проблема определения критериев успешности (нормальности) ее функционирования.

Основные требования к СРВ:

- возможность параллельного выполнения нескольких задач;
- предсказуемость;
- важно максимальное (не среднее) время отклика на событие;
- особые требования в вопросах безопасности;
- возможность безотказной работы в течение длительного времени.

Средства реального времени должны реагировать на различные типы внутренних и внешних событий (периодических и непериодических). Исходные требования к времени реакции системы и другим временным параметрам определяются или техническим заданием на систему, или просто логикой ее функционирования. Интуитивно понятно, что быстродействие СРВ должно быть тем больше, чем больше скорость протекания процессов на объекте контроля и управления.

### **3.3.4. Кодирование информации**

В настоящее время во всех вычислительных машинах информация представляется с помощью электрических сигналов. При этом возможны две формы ее представления: в виде непрерывного сигнала (с помощью сходной величины — аналога) и в виде нескольких сигналов (с помощью набора напряжений, каждое из которых соответствует одной из цифр представляемой величины).

Первая форма представления информации называется аналоговой или непрерывной. Величины, представленные в такой форме, могут принимать принципиально любые значения в определенном диапазоне. Количество значений, которые может принимать такая величина, бесконечно велико. Отсюда названия — непрерывная величина и непрерывная информация. *Бит* — это дискретная величина, единица или ноль. Ток, напряжение, давление, температура, яркость, сила — этот список можно продолжать долго — есть величины непрерывные, т. е. их точное значе-

ние измерить нельзя в принципе, все ограничивается точностью измерительного прибора. Например, выходной сигнал датчика температуры на основе термосопротивления (см. подп. 2.2.1) может принимать любое значение электрического тока в диапазоне 4–20 мА, пропорциональное соответствующему значению измеряемой датчиком температуры.

Непрерывную форму представления используют в аналоговых вычислительных машинах (АВМ). Эти машины предназначены в основном для решения задач, описываемых системами дифференциальных уравнений: исследования поведения подвижных объектов, моделирования процессов и систем, решения задач параметрической оптимизации и оптимального управления. Классическим примером современного аналогового компьютера является автоматическая автомобильная трансмиссия. При изменении вращающего момента жидкость в гидроприводе меняет давление, что позволяет получить необходимый конечный коэффициент передачи. До появления мощной и надежной цифровой аппаратуры аналоговые вычислители широко применялись в авиационной и ракетной технике, для оперативной обработки различной информации и последующего формирования сигналов управления в автопилотах и различных более сложных системах автоматического управления полетом. В военной технике исторически выработалось еще одно название АВМ для управления огнем артиллерии, высотного бомбометания и других военных задач, требующих сложных вычислений, — это счетно-решающий прибор. Примером может служить прибор управления зенитным огнем.

АВМ обладают более высоким быстродействием, они могут интегрировать сигнал, выполнять любое его функциональное преобразование (умножение, деление и т. п.). Однако из-за сложности технической реализации АВМ не могут эффективно решать задачи, связанные с хранением и обработкой больших объемов информации. Поэтому в настоящее время АВМ в основном уступили свое место цифровым ЭВМ, системам автоматики и обработки сигналов на основе микропроцессорных контроллеров.

Вторую форму представления информации называют дискретной (цифровой). Такие величины, принимающие не все возможные, а лишь вполне определенные значения, называются дискретными (прерывистыми). В отличие от непрерывной величины, количество значений дискретной величины всегда будет

конечным. Дискретные сигналы имеют два и более фиксированных значений (количество их значений всегда выражается целыми числами). Пример простого дискретного сигнала на два значения: срабатывание путевого выключателя (переключение контактов выключателя в определенном положении механизма). Сигнал с путевого выключателя может быть получен только в двух вариантах – контакт разомкнут (нет действия, нет напряжения) и контакт замкнут (есть действие, есть напряжение).

Когда дискретный сигнал принимает фиксированные значения в определенные моменты времени, равноотстоящие друг от друга на некоторый интервал времени  $T$ , такой дискретный сигнал называют цифровым. На рисунке 3.13 приведен пример формирования цифрового сигнала на базе аналогового. Обратите внимание, что значения цифрового сигнала не могут принимать промежуточных значений, а только определенные – целое количество вертикальных шагов сетки. То есть *цифровой сигнал* – это такой дискретный сигнал, который квантован не только по промежуткам времени, но и по уровню.

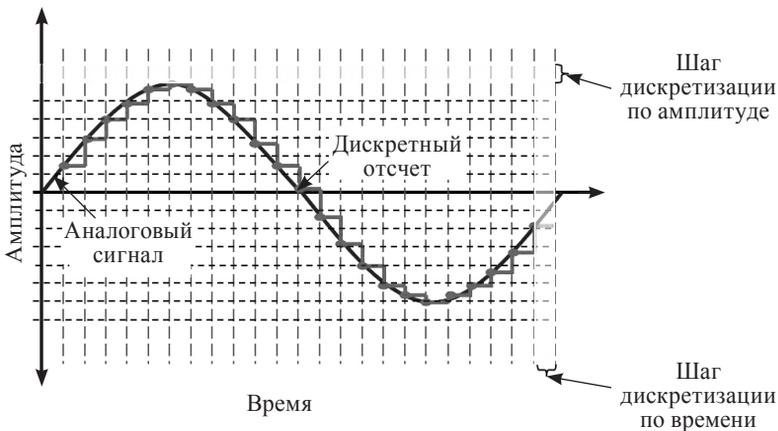


Рис. 3.13. Пример формирования цифрового сигнала на базе аналогового

Цифровой сигнал легко записывается и перезаписывается в память вычислительных устройств, просто считывается и копируется без потери точности, тогда как перезапись аналогового сигнала всегда сопряжена с утратой некоторой, пусть и незначительной, части информации.

Обработка цифровых сигналов позволяет получать устройства с очень высокими характеристиками благодаря выполнению вычислительных операций совершенно без потерь качества либо с пренебрежимо малыми потерями.

Вследствие этих достоинств именно цифровые сигналы повсеместно распространены сегодня в системах хранения и обработки данных. Вся современная память – цифровая. Аналоговые носители информации (такие как пленочные кассеты и т. д.) давно ушли в прошлое.

Для автоматизации работы ЭВМ с информацией, относящейся к различным типам, очень важно унифицировать их форму представления – для этого обычно используют прием кодирования.

### 3.3.5. Цифровые коды

При передаче, хранении и преобразовании информации применяют ее кодирование с использованием определенного набора символов. Множество символов составляет алфавит кода. Количество символов в алфавите называют основанием кода –  $m$ . Так, десятичная система счисления является кодом с основанием, равным 10. Код Морзе имеет основание 2, а его алфавит состоит из двух символов: точка и тире. Двоичная система счисления имеет также основание 2, а алфавит состоит из чисел 1 и 0. Восьмеричная система счисления имеет основание 8 и для кодирования использует числа 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Коды, используемые для представления чисел посредством цифр, определяются как системы счисления. Наиболее часто применяются позиционные системы счисления: десятичная, двоичная, восьмеричная, шестнадцатеричная. У последней вместо требуемых цифр 10, 11, 12, 13, 14, 15 используются буквы латинского алфавита А, В, С, D, E, F. Для позиционных систем применяют три важные характеристики:

- количество используемых цифр равно основанию системы счисления;
- наибольшая цифра на единицу меньше основания;
- каждая цифра в числе умножается на основание в степени, значение которой определяется позицией цифры в числе.

Запись произвольного числа  $A$  базируется на представлении этого числа в виде полинома:

$$A = a_{n-1}m^{n-1} + a_{n-2}m^{n-2} + \dots + a_1m^1 + a_0,$$

где  $a_i$  – цифры;  $m$  – основание системы (10, 2, 8, 16);  $n$  – номер разряда.

Так, запись числа 1987 в десятичной системе счисления означает, что данное число содержит одну тысячу (тысяча — это  $10^3$ ), девять сотен (сотня — это  $10^2$ ), восемь десятков (десяток — это  $10^1$ ) и семь единиц (единица — это  $10^0$ ):

$$1987_{10} = 1 \cdot 10^3 + 9 \cdot 10^2 + 8 \cdot 10^1 + 7 \cdot 10^0.$$

Это же число, записанное в двоичной системе счисления, будет иметь следующий вид:

$$11111000011_2 = 1 \cdot 2^{10} + 1 \cdot 2^9 + 1 \cdot 2^8 + 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0.$$

В восьмеричной системе счисления десятичное число 1987 будет записано как

$$3703_8 = 3 \cdot 8^3 + 7 \cdot 8^2 + 0 \cdot 8^1 + 3 \cdot 8^0.$$

И наконец, в шестнадцатеричной системе счисления десятичное число 1987 будет представлено следующим образом:

$$7C3_{16} = 7 \cdot 16^2 + C \cdot 16^1 + 3 \cdot 16^0.$$

Приведем некоторые правила перевода чисел из одной системы счисления в другую.

**Пример.** Задано целое число в двоичной форме:

$$1110010011010.$$

Представить его в восьмеричной, десятичной и шестнадцатеричной системе счисления.

Для перевода из двоичной системы счисления в восьмеричную число нужно разделить на триады влево и вправо от запятой (при записи чисел с запятой). Если самая левая или правая триада окажется неполной, то ее дополняют нулями:

$$1110010011010_2 = 001\ 110\ 010\ 011\ 010 = 16232_8.$$

Для перевода в шестнадцатеричную систему число разбивают аналогично на группы по четыре цифры:

$$1110010011010_2 = 0001\ 1100\ 1001\ 1010 = 1C9A_{16}.$$

Для получения заданного числа в десятичной системе счисления используют соотношение и получают сумму следующих слагаемых:

$$1110010011010_2 = 1 \cdot 2^{12} + 1 \cdot 2^{11} + 1 \cdot 2^{10} + 0 \cdot 2^9 + 0 \cdot 2^8 + 1 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 732210_{10}.$$

Целые числа, записанные в одной системе счисления, в новую систему переводятся последовательным делением числа и

получаемых частных на основании той системы, в которую оно переводится, до тех пор, пока не получится частное меньше основания системы счисления. Результатом будут остатки от деления, прочитанные в порядке, обратном их получению, и последнее частное как старший разряд числа.

Двоичная система счисления является базовой для решения задач автоматики и вычислительной технике, так как на основе аппарата булевой алгебры описывает работу устройств, имеющих два устойчивых состояния – 0 и 1.

### 3.3.6. Цикловое программное управление оборудованием

Цикловым программным управлением (ЦПУ) станком, манипулятором, роботом или другим устройством является способ управления по заданной управляющей программе, составленной на основе дискретного описания реализуемого процесса, образованного из законченных переходов (этапов) с установленной очередностью их выполнения.

Циклом работы оборудования (станка) называют совокупность элементарных рабочих и вспомогательных переходов (этапов цикла), осуществляемых в определенной последовательности, необходимой для выполнения оборудованием его рабочих функций. Этапы цикла представляют собой элементарную составную (нерасчлененную) часть цикла, при отработке которой не происходит никаких изменений – включений или отключений, связанных с изменением работы оборудования. На рисунке 3.14 показаны схемы циклов фрезерования плоскости у одной детали, у двух деталей и цикл фрезерования четырех плоскостей по контуру одной детали.

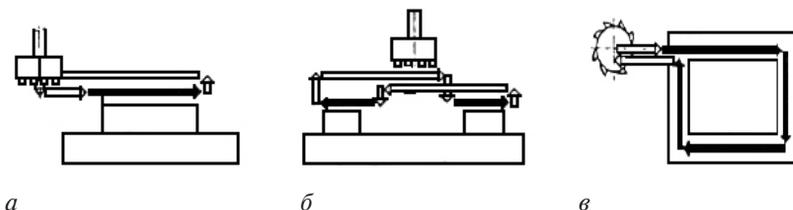


Рис. 3.14. Циклы фрезерования:  
а – одной детали; б – двух деталей;  
в – четырех плоскостей по контуру одной детали

Системы ЦПУ представляют собой комплекс устройств, в которых программируется цикл (последовательность) работы оборудования и одновременно с помощью путевых переключателей устанавливается величина перемещения рабочих органов. Структурная схема системы ЦПУ представлена на рисунке 3.15. Цикл работы оборудования определяет устройство циклового программного управления (УЦПУ), которое является основной частью системы и включает блок ввода программы, блок памяти циклов. Устройство УЦПУ формирует и подает команды управления в блок силовой электроавтоматики, который непосредственно управляет электродвигателями привода станка.

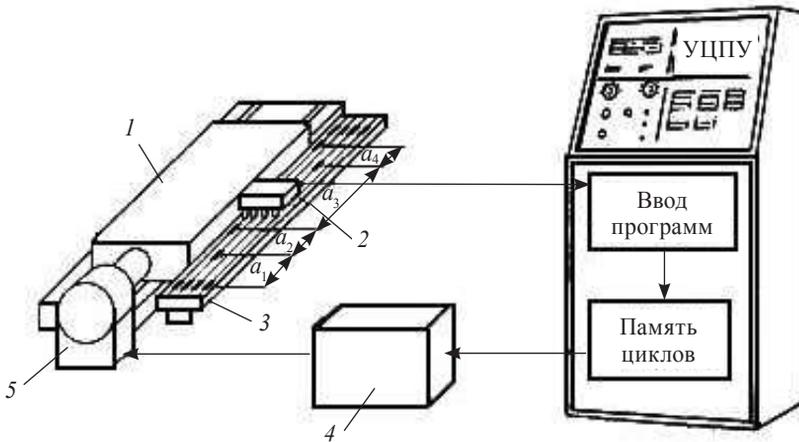


Рис. 3.15. Структурная схема системы ЦПУ:  
 1 – стол станка; 2 – узел путевых переключателей;  
 3 – узел регулируемых упоров; 4 – блок силовой электроавтоматики; 5 – электродвигатель привода

Программа работы станка задается оператором в двух местах – на пульте управления станком и в блоке задания перемещений путем соответствующей установки путевых упоров и кулачков.

Блок задания перемещений на станках с ЦПУ состоит из двух узлов:

- узла переключателей, в герметичном корпусе которого расположены микропереключатели и подпружиненные толкатели;

- узла регулируемых упоров, который может быть выполнен в виде плоской съемной панели с расположенными на ней кулачками или в виде барабана.

Настройка съемной панели узла регулируемых упоров может быть выполнена вне станка с использованием специального приспособления с индикатором для точной выставки кулачков. Правильность установки кулачков проверяют на холостом ходу станка, контролируя для каждого этапа цикла соответствие величины фактических перемещений требуемым значениям.

Точность срабатывания блока задания перемещений составляет  $\pm 0,015$  мм. Более высокую точность перемещений  $\pm 0,01$  мм получают при использовании бесконтактных (индуктивных) путевых переключателей, которые к тому же надежно работают при большей частоте срабатывания.

В отдельных системах ЦПУ задание этапов цикла, в том числе и перемещений, осуществляют с использованием реле времени. Это делают в тех случаях, когда применение других датчиков затруднено, а продолжительность данного этапа цикла остается неизменной. Таким образом, если в первом случае обеспечивается программирование цикла обработки путем установки упоров по направлению перемещения рабочего органа, то во втором последовательность выполнения этапов цикла запрограммирована во времени. Применяют также смешанные системы ЦПУ, в которых осуществляют управление как по пути, так и по времени. В зависимости от решаемых задач на определенных этапах цикла формирование команд может быть выполнено и с использованием других датчиков, например датчика давления или датчика крутящего момента.

В качестве программоносителей на станках с системами циклового управления применяют также командоаппараты и штекерные панели. Система управления с использованием командоаппарата по сути аналогична управлению с регулируемыми упорами. Схема командоаппарата с электромагнитным шаговым приводом приведена на рисунке 3.16. Регулируемые упоры (кулачки) устанавливают компактно на одном периодически вращающемся барабане. Каждой группе кулачков соответствует свой переключатель  $b_1 - b_6$ , количество которых равно числу кольцевых дорожек. Периодический поворот барабана на шаг осуществляется с помощью храпового колеса при срабатывании электромагнитного толкателя.

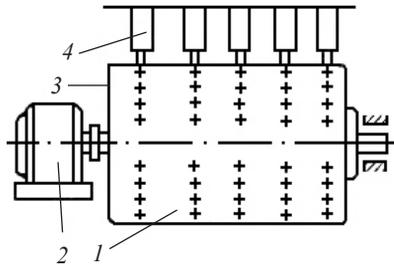


Рис. 3.16. Схема работы командоаппарата:  
 1 – поворотный барабан; 2 – храповое колесо;  
 3 – упоры; 4 – электромагнитный толкатель

Цикловое управление станком с использованием штекерной панели показано на примере токарной обработки ступенчатого вала (рис. 3.17). Управление процессом обработки вала осуществляется на основе одновременного получения информации, набранной на штекерной панели (см. рис. 3.17, а), и информации, получаемой с блока задания перемещений (см. рис. 3.17, б). Кулачки на панели перемещений устанавливают в соответствии с длиной ступеней вала. При этом панель с регулируемыми кулачками располагается на станине станка, а многоконтактный переключатель, на который воздействуют кулачки, перемещается вместе с суппортом.

Режимы обработки – частоту вращения шпинделя, продольную подачу и ускоренный ход – задают на штекерной панели. Там же задают команды для работы поперечного суппорта. Переключение с работы одного режима на другой производится кулачками. В наиболее простом виде штекерная панель имеет исполнение по схеме диодной матрицы, при этом диоды встраивают в штекеры или в панель. Каждой строке отверстий соответствует определенный набор команд, подаваемых на исполнение рабочим органам станка. При подаче командного импульса с блока задания перемещений счетно-распределительная схема включает следующую строку штекерной панели и отключает предыдущую. В результате осуществляется управление процессом на следующем этапе цикла.

Для быстрого ввода программы путем установки штекеров используют накладываемую на панель пленку с перфорированными отверстиями, которая выполняет также роль долговременного программносителя.

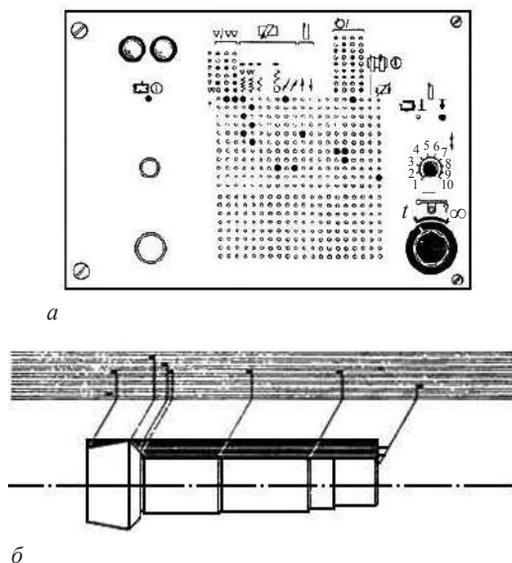


Рис. 3.17. Задание программы циклового управления с помощью штекерной панели:  
а – схема штекерной панели; б – схема установки кулачков по длине вала в блоке задания перемещений

Системы циклового программногo управления отличаются от числовых сравнительно простотой. Они содержат только информацию о цикле и режимах обработки, а величина перемещения рабочих органов задается настройкой упоров, воздействующих на путевые переключатели. Поэтому технологические возможности этих систем значительно уже.

Системы ЦПУ сравнительно просты в эксплуатации и обладают достаточной надежностью. По сравнению с кулачковыми автоматами, станки с ЦПУ требуют значительно меньше времени на перенастройку при переходе с обработки одной детали к другой. Поэтому их применяют как в крупносерийном, так и в серийном производстве.

Для изготовления деталей сложной геометрической формы на станках применяют следящие копировальные системы управления с электромеханическим, гидравлическим или электрогидравлическим приводом.

В следящих копировальных системах в качестве программоносителей, определяющих геометрию изготавливаемой детали, ис-

пользуют плоские и объемные копиры (шаблоны), которые представляют собой прототип создаваемой на детали поверхности.

Электромеханические, гидравлические и электрогидравлические следящие копируемые системы применяют в основном на токарных и фрезерных станках (рис. 3.18). На токарных станках они обеспечивают одновременное управление по двум координатам, а на фрезерных — по двум, трем координатам.

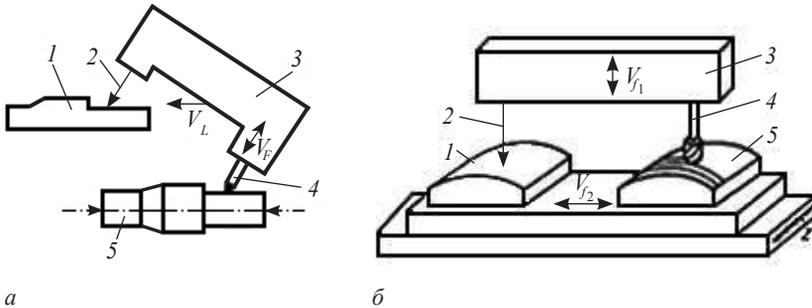


Рис. 3.18. Схема обработки на копируемых станках: а — токарных; б — фрезерных; 1 — копир; 2 — шуп; 3 — копируемое устройство; 4 — режущий инструмент; 5 — обрабатываемая заготовка

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Перечислите функции, реализуемые при программном управлении станками.
2. Назовите способы, которыми можно вводить управляющую программу в систему ЧПУ.
3. Приведите примеры записи команд в коде ИСО 7 бит.
4. Приведите примеры позиционных систем счисления.
5. Перечислите основные типы приводов станков с ЧПУ.
6. Назовите область применения контурного ЧПУ.
7. Сформулируйте, что называется: а) циклом автоматизации станка с ЧПУ; б) главным движением станка с ЧПУ; в) движением подачи станка с ЧПУ.
8. Перечислите международную классификацию систем с ЧПУ.
9. Сформулируйте, что называют основанием цифрового кода.
10. В чем состоит различие дискретных и аналоговых сигналов?

## ЛИТЕРАТУРА

---

---

- Гурин, В.В.** Аппараты управления и защиты электрооборудования : учеб. пособие / В.В. Гурин, Н.А. Равинский. Минск, 2016.
- Елкин, В.Д.** Электромеханические аппараты : учеб. пособие / В.Д. Елкин, Т.В. Елкина, Минск, 2003.
- Дюбей, Гопал К.** Основные принципы устройства электроприводов / Гопал К. Дюбей. М., 2009.
- Епифанов, А.П.** Основы электропривода : учеб. пособие / А.П. Епифанов. 2-е изд., стер. СПб., 2009.
- Москаленко, В.В.** Системы автоматического управления электропривода : учеб. / В.В. Москаленко. М., 2014.
- Москаленко, В.В.** Электрический привод : учеб. / В.В. Москаленко. М., 2007.
- Ролич, О.Ч.** Основы автоматики в электроэнергетике : учеб. пособие / О.Ч. Ролич, Ю.А. Сидоренко, А.Г. Сеньков. Минск, 2011.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ЭЛЕКТРОПРИВОД .....	5
1.1. Структура механической части электропривода .....	9
1.2. Неустановившееся механическое движение электропривода .....	13
1.3. Электропривод с двигателем постоянного тока. Общие сведения .....	14
1.4. Электропривод с двигателем постоянного тока независимого возбуждения .....	17
1.5. Электропривод с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения .....	31
1.6. Электропривод с двигателем постоянного тока смешанного возбуждения .....	36
1.7. Электропривод с асинхронным двигателем .....	37
1.7.1. Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя .....	38
1.7.2. Включение асинхронных двигателей в сеть .....	40
1.7.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя .....	42
1.7.4. Основные энергетические режимы трехфазного асинхронного двигателя .....	45
1.7.5. Торможение трехфазных асинхронных двигателей .....	46

1.7.6. Регулирование скорости асинхронного двигателя .....	47
1.7.7. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод.....	52
1.8. Электропривод с синхронным двигателем .....	57
1.9. Особенности регулируемого электропривода переменного тока.....	60
Контрольные вопросы и задания .....	65
2. СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ.....	67
2.1. Общие сведения о системах автоматике.....	68
2.1.1. Принцип разомкнутого управления.....	70
2.1.2. Принцип компенсации .....	71
2.1.3. Принцип обратной связи .....	72
2.1.4. Основные виды систем автоматического управления.....	74
2.1.5. Режимы работы САУ.....	75
2.1.6. Общие сведения о системах автоматического управления электроприводами (САУЭП) и их классификация.....	76
2.2. Датчики.....	81
2.2.1. Датчики температуры.....	83
2.2.2. Датчики (реле) времени.....	90
2.2.3. Датчики перемещения .....	94
2.2.4. Датчики скорости.....	100
2.2.5. Датчики тока.....	103
2.2.6. Датчики напряжения .....	107
2.3. Электрические аппараты управления и защиты.....	109
2.3.1. Аппараты ручного управления.....	109
2.3.2. Аппараты дистанционного управления .....	112
2.3.3. Электрические аппараты защиты .....	121
2.3.4. Защитно-отключающие устройства.....	122
2.4. Исполнительные устройства автоматизированных электроприводов.....	127
2.4.1. Электромеханические муфты сухого трения.....	128
2.4.2. Электромагнитные муфты.....	129

---

---

2.4.3. Ферропоршковые муфты с электромагнитным управлением .....	131
2.4.4. Статические характеристики электромагнитных муфт скольжения .....	132
2.4.5. Тормозные устройства .....	133
Контрольные вопросы и задания .....	136
<b>3. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ .....</b>	<b>137</b>
3.1. Разомкнутые системы управления .....	140
3.1.1. Силовые преобразователи частоты переменного тока .....	140
3.1.2. Структура и основные элементы электропривода с асинхронным электродвигателем .....	145
3.2. Замкнутые системы управления .....	149
3.3. Системы с числовыми программными устройствами .....	153
3.3.1. Виды систем программного управления .....	154
3.3.2. Числовое программное управление .....	157
3.3.3. Операционные системы реального времени .....	161
3.3.4. Кодирование информации .....	163
3.3.5. Цифровые коды .....	166
3.3.6. Цикловое программное управление оборудованием .....	168
Контрольные вопросы и задания .....	173
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>174</b>

Учебное издание

**Сеньков** Андрей Григорьевич,  
**Дайнеко** Владимир Александрович

# ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКА

Учебное пособие

Редактор *Л.В. Рутковская*  
Технический редактор *Е.В. Потапейко*  
Корректор *И.В. Счеснюк*  
Дизайн обложки *С.Л. Прокопцовой*

Подписано в печать 20.07.2020. Формат 60×84/16.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 10,49 + 0,25 (вкл.). Уч.-изд. л. 8,84 + 0,14 (вкл.).  
Тираж 600 экз. Заказ 85.

Республиканский институт профессионального образования.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/245 от 27.03.2014.  
Ул. К. Либкнехта, 32, 220004, Минск. Тел.: 374 41 00, 272 43 88.

Отпечатано в Республиканском институте  
профессионального образования. Тел. 373 69 45.

220004, г. Минск,  
ул. К. Либкнехта, 32  
Тел./факс (017) 374 41 00  
[www.ripo.unibel.by](http://www.ripo.unibel.by)

**ЦЕНТР УЧЕБНОЙ КНИГИ  
И СРЕДСТВ ОБУЧЕНИЯ  
РЕСПУБЛИКАНСКОГО ИНСТИТУТА  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**ОКАЗЫВАЕТ УСЛУГИ**

- ✓ Реализация учебной литературы за наличный и безналичный расчет.
- ✓ Организация экспертизы учебных изданий для присвоения грифа Министерства образования Республики Беларусь, Республиканского института профессионального образования.
- ✓ Редакционно-издательская подготовка: редактирование научной и учебной литературы, верстка и дизайн.
- ✓ Полиграфические услуги: книги, бланки, грамоты, дипломы, календари, буклеты, визитки и др.
- ✓ Организация и проведение тематических выставок, выставок-продаж, обучающих семинаров для авторов учебной литературы.

**ПРИГЛАШАЕМ К СОТРУДНИЧЕСТВУ  
АВТОРОВ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
ДЛЯ УЧАЩИХСЯ  
УЧРЕЖДЕНИЙ ПТО И ССО**

**Тел. (8017) 373 62 23, 272 43 89.**

# НОВЫЕ ИЗДАНИЯ

---

---

**Дробов, А. В.**

Электробезопасность : учеб. пособие / А. В. Дробов, В. Н. Галушко. — Минск : РИПО, 2020. — 203 с. : ил.

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь в качестве учебного пособия для учащихся учреждений образования, реализующих образовательные программы среднего специального образования по специальностям «Монтаж и эксплуатация электрооборудования», «Городской электрический транспорт», «Автоматизированные электроприводы», «Электроснабжение», «Энергетическое обеспечение сельскохозяйственного производства»*

В учебном пособии изложены требования при обслуживании электроустановок потребителя, виды опасности при производстве работ в электроустановках. Кроме того, представлены современные требования к электротехническому персоналу, средства защиты людей от поражения электрическим током, последовательность оказания первой (доврачебной) помощи пострадавшему от электрического тока. Рассмотрены элементы защитного оборудования, заземление в электроустановках, зануление, средства защиты, а также вопросы защиты персонала от воздействия электромагнитного поля.

Предназначено для учащихся учреждений среднего специального образования по специальностям «Монтаж и эксплуатация электрооборудования», «Городской электрический транспорт», «Автоматизированные электроприводы», «Электроснабжение», «Энергетическое обеспечение сельскохозяйственного производства».

**Гутько, Е. С.**

Теоретические основы электротехники. Курсовая работа : учеб. пособие / Е. С. Гутько, Т. С. Шмакова. — Минск : РИПО, 2020. — 151 с. : ил.

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь в качестве учебного пособия для учащихся учреждений образования, реализующих образовательные программы среднего специального образования*

Учебное пособие содержит многовариантные задания, методические рекомендации для учащихся по выполнению курсовой работы, типовые методы расчетов по каждой части, примеры выполнения графической части работы, список литературы, рекомендуемой при выполнении курсовой работы.

Предназначено для учащихся учреждений среднего специального образования, а также преподавателей данной дисциплины.

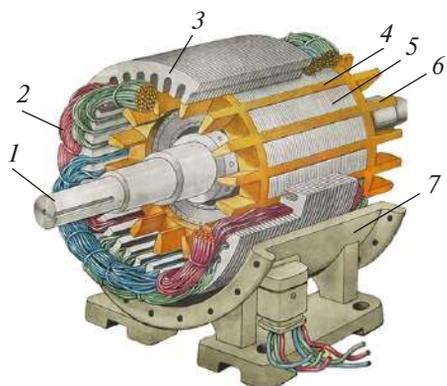


Рис. 1. Конструкция трехфазного асинхронного электродвигателя:  
 1 – вал ротора; 2 – статорная обмотка; 3 – магнитопровод статора; 4 – короткозамкнутая обмотка ротора; 5 – сердечник ротора; 6 – крыльчатка вентилятора; 7 – корпус электродвигателя



Рис. 2. Устройство ротора асинхронного двигателя с обмоткой:  
 а – короткозамкнутой; б – фазной



Рис. 3. Внешний вид  
 термометра сопротивления



Рис. 4. Внешний вид электромеханического реле времени



Рис. 5. Внешний вид электронного реле времени



Рис. 6. Токоизмерительные клещи:  
1 – клещи-магнитопровод;  
2 – кнопка фиксации измерений;  
3 – разъемы для щупов;  
4 – переключатель положений;  
5 – скоба



Рис. 7. Внешний вид рубильника открытого исполнения



Рис. 8. Внешний вид рубильника закрытого исполнения типа VA6000



Рис. 9. Пакетный выключатель типа ПВ2



Рис. 10. Автоматический выключатель серии ВА



Катушка пускателя на 220 В



*a*

*б*

Рис. 11. Внешний вид (*a*) и маркировка контактов (*б*) современного магнитного пускателя



Рис. 12. Внешний вид кнопок управления

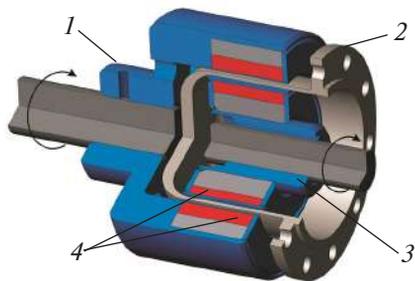


Рис. 13. Устройство электромагнитной муфты:  
 1 – внешняя полумуфта; 2 – герметичный экран;  
 3 – внутренняя полумуфта; 4 – магнитные системы

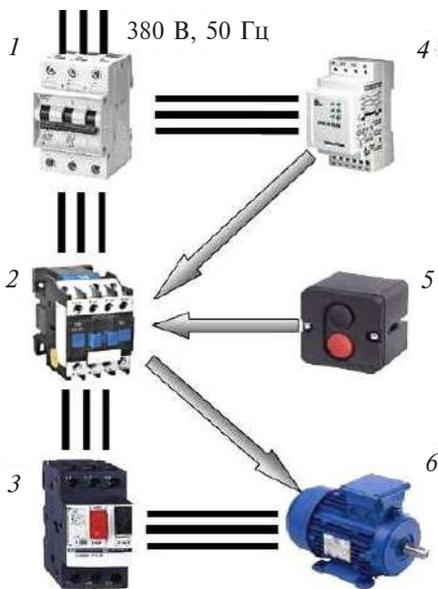


Рис. 14. Компоненты простого электропривода с асинхронным электродвигателем:

- 1 – вводной автоматический выключатель;
- 2 – электромагнитный пускатель; 3 – электротепловое реле; 4 – реле контроля фаз и уровня напряжения;
- 5 – кнопки управления;
- 6 – асинхронный электродвигатель

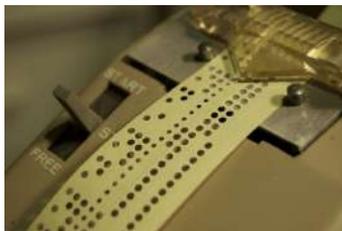


Рис. 15. Внешний вид перфоленты типа ISO 7 бит