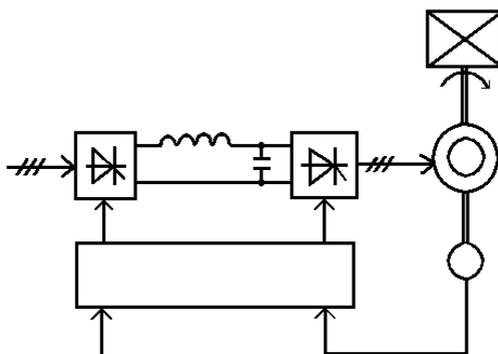




**С. Н. Павлович**

# **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД**

**Курс лекций**



**2008**

С. Н. Павлович

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Курс лекций

для студентов дневной и заочной форм обучения  
машиностроительного факультета специальности 1-36 01 03  
«Технологическое оборудование машиностроительного  
производства»

М и н с к 2 0 0 8

УДК 621.34-52 (075.8)

ББК 31.291я7

П 12

Рецензенты:

*доктор технических наук, профессор Б. И. Фираго;*

*кандидат технических наук, доцент Г. И. Гульков*

**Павлович, С.Н.**

П 12 Автоматизированный электропривод: курс лекций для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» / С. Н. Павлович. – Минск: БНТУ, 2008. – 128 с.

ISBN 978-985-479-848-6.

Рассматриваются основные вопросы теории и практики автоматизированного электропривода современных металлорежущих станков: механика электропривода, электромеханические свойства электродвигателей постоянного и переменного тока, электрические аппараты и схемы управления электроприводами. Дается расчет мощности и приводятся рекомендации по выбору двигателей при различных режимах эксплуатации в технологическом процессе машиностроительного производства. Излагаются вопросы электробезопасности.

УДК 621.34-52 (075.8)

ББК 31.291я7

ISBN 978-985-479-848-6

© Павлович С.Н., 2008  
© БНТУ, 2008

## Лекция 1. ВВЕДЕНИЕ

**Цель:** изучить определения, основные понятия, структурную схему автоматизированного электропривода и пути его развития.

**Основные понятия и их определения.** Эффективность производства в значительной степени определяется способом получения энергии, необходимой для выполнения механической работы в производственных процессах. Создание в качестве двигателя *паровой машины* (взамен гидравлического двигателя) в XIX в. послужило мощным толчком развития промышленного производства (*поэтому XIX в. назван веком пара*). В XX в. основным источником механической энергии стал более совершенный электрический двигатель, а основным видом привода рабочих машин в промышленном производстве – электрический привод (*поэтому XX в. назван веком электричества*).

В настоящее время почти 100 % электрической энергии производится с помощью электрических машин (генераторов) и до 90 % ее потребляют также электрические машины (двигатели), которые преобразуют электрическую энергию в механическую. Кроме электрической используются другие виды энергии и двигатели на их основе: паровая турбина (в пароходах), паровая машина (в паровозах), двигатель внутреннего сгорания (в автомобилях).

Достоинства использования электроэнергии и электродвигателей следующие:

- возможность передачи электроэнергии на большие расстояния с малыми потерями;
- обратимость электрических машин,
- высокий КПД;
- большой диапазон мощностей электродвигателей (от долей ватт до мегаватт) и регулирования скорости электропривода;
- жесткость механических характеристик и др.

Что же понимается под словом «привод»? К. Маркс в I т. «Капитала» написал, что всякое развитое машинное устройство состоит из трех существенно различных частей: машины-двигателя,

передаточного механизма, наконец, машины орудия или рабочей машины.

Назначение первых двух частей – привести в движение (вращательное или поступательное) *исполнительный орган* рабочей машины. Эти части объединяют общим названием «*привод*». Таким образом, приводом называют машинное устройство, сообщаемое движение *исполнительному органу* производственной машины и состоящее из двигателя и механических передач.

**Исполнительным органом** рабочей машины называется один из ее узлов, который непосредственно выполняет заданную технологическую операцию. Для многих рабочих машин характерным является наличие не одного, а двух или даже нескольких взаимодействующих исполнительных органов. Например, при обработке детали на токарном станке она приводится во вращение вокруг своей оси, а резец при этом перемещается вдоль детали и снимает с нее слой металла (стружку). Вращение детали осуществляет шпиндель станка (это первый исполнительный орган), а механизм подачи станка (это уже второй исполнительный орган) поступательно перемещает резец. Таким образом, оба исполнительных органа, совершая механические движения (вращение детали и перемещение инструмента), выполняют заданную технологическую операцию. При обработке материалов и изделий на станках, прокатных станах, прессах исполнительными органами являются шпиндели, механизмы подачи, суппорты, валы, штампы и т.д. Перемещение твердых материалов, изделий, газов, жидкостей производится конвейерами, подъемными кранами, лифтами, насосами, вентиляторами, компрессорами.

Многие исполнительные органы (шпиндели, механизмы подачи, валки прокатных станов, ленты конвейеров и др.) требуют регулирования скорости. Иногда возникает необходимость изменять и направление движения исполнительного органа (реверсировать его). Во время движения исполнительный орган преодолевает сопротивление движению, обусловливаемое силами трения или притяжения земли, возникающими усилиями при деформации материалов.

Итак, для осуществления исполнительным органом необходимого движения при выполнении технологической операции и преодоления возникающих усилий к нему должна быть

подведена определенная механическая энергия от устройства, которое в соответствии со своим назначением получило название *привод*.

Простейший привод – ручной, затем конный (как развитие ручного), механический (от ветряного двигателя, водяного колеса, турбины, паровой машины, двигателя внутреннего сгорания). В настоящее время водяные и паровые турбины широко применяются на электрических станциях (гидравлических и тепловых). Однако для привода рабочих машин основным является электрический двигатель, на основе которого строится электропривод, а на современном этапе развития техники – автоматизированный электропривод.

**Электрическим приводом** (ЭП) называется электромеханическое устройство, сообщаемое движению рабочему органу производственной машины и состоящее из электродвигателя с аппаратурой (системой) управления и механической передачи. Другими словами, можно сказать, учитывая рассмотренное выше понятие при-вода, что **электропривод** – это привод, в котором в качестве двигателя используется именно электрический двигатель с аппаратурой его управления.

**Автоматизированный электропривод** (АЭП) – это электромеханическое устройство, предназначенное для приведения рабочего органа производственной машины и управления ее технологическим процессом, состоящее из электродвигателя, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств. **Преобразовательное устройство** (между электрической питающей сетью и электродвигателем) служит для преобразования неизменных параметров электроэнергии питающей сети в переменные в соответствии с управлением регулируемого электропривода, а **управляющее устройство** – для обеспечения оптимального управления по определенным критериям.

В настоящее время используются в основном полупроводниковые преобразовательные устройства (транзисторные, тиристорные), которые преобразуют трехфазное напряжение переменного тока промышленной сети в постоянное напряжение или в напряжение также трехфазное переменного тока, но другой величины и другой частоты. Современный автоматизированный электропривод может представлять собой

целый комплекс электрических машин, аппаратов и систем управления, например АЭП промышленных роботов.

Под **управлением электропривода** понимается не только пуск, торможение, реверс, но и регулирование скорости в соответствии с требованиями технологического процесса.

Под **регулированием скорости** понимается целенаправленное ее изменение по воле оператора, а также средствами автоматики, в соответствии с требованиями технологического процесса. Используют в основном электрические методы регулирования скорости, которые осуществляются воздействием на параметры электрической цепи двигателя или на параметры источников питания. Более совершенные системы регулирования скорости основаны на использовании замкнутых систем управления.

**Структурная схема АЭП.** Структурная схема АЭП представлена на рис. 1.1. Электрическая мощность, потребляемая электроприводом от электрической сети (ЭС), в силовой части преобразовательного устройства (СПрУ) преобразуется в регулируемую по показателям электрическую мощность, которая подводится к обмоткам электродвигателя. На схеме двигатель представлен двумя элементами – электромеханическим преобразователем ЭМП, преобразующим электрическую мощность в механическую, и массой ротора РД, на которую воздействует вращающий момент двигателя  $M$  при угловой скорости  $\omega$ . Механическая мощность от ротора электродвигателя передается передаточному механизму ПМ, в котором она преобразуется (могут изменяться как момент и угловая скорость, так и вид движения) и передается к исполнительному органу рабочей машины РМ.

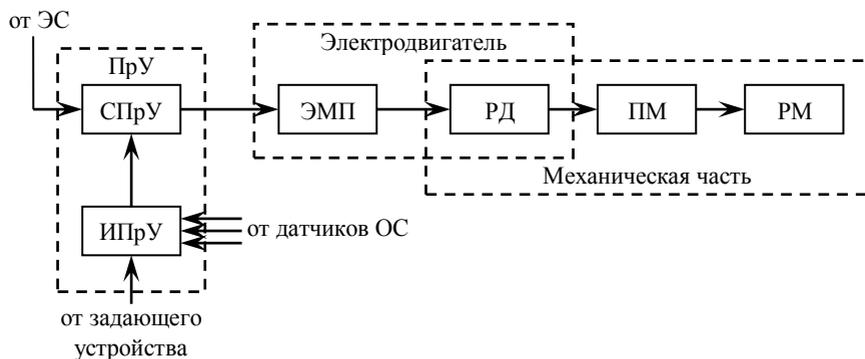


Рис. 1.1. Структурная схема автоматизированного электропривода

Преобразовательное устройство ПрУ состоит из силовой части СПрУ и информационной части (или системы управления) ИПрУ. Информационная часть получает командные сигналы от задающего устройства и информацию о параметрах состояния электропривода и хода технологического процесса от соответствующих датчиков обратных связей. На основании этих данных в соответствии с заложенным алгоритмом (программой) здесь вырабатываются определенные воздействия на СПрУ, а от него и на ЭМП двигателя, управляющие таким образом движением механической части и ходом технологического процесса РМ.

**Краткий обзор пути развития электропривода.** Для получения механической энергии в XIX в. долгое время применялись паровые машины. Котел и паровую машину устанавливали в отдельном здании на заводском дворе. Движение от паровой машины передавалось в производственное многоэтажное здание с помощью ременных или канатных передач. Внутри производственных помещений движение распределялось посредством многочисленных трансмиссий. Это был *общезаводской паровой привод*. В дальнейшем паровую машину заменил электрический двигатель.

Первый электродвигатель изобретен в 1834 г. русским академиком Б. С. Якоби. Это был электродвигатель постоянного тока вращательного движения. В 1838 г. Б. С. Якоби создал и первый электропривод. Он установил свой электродвигатель, питаемый от батареи гальванических элементов, на небольшом

катере, который с 12 пассажирами прошел испытания на Неве. Этим была доказана возможность практического применения электропривода.

Однако до конца XIX в. пар и вода оставались основной силой, приводившей в движение станки и механизмы в промышленности.

В 80-х годах XIX в. было открыто явление вращающегося магнитного поля (Г. Феррарис, Н. Тесла). В 1891 г. русский инженер М. О. Доливо-Добровольский, используя это явление, изобрел трех-фазный асинхронный двигатель, который благодаря своей простоте и надежности до настоящего времени широко распространен на промышленных предприятиях.

**Основные этапы развития электропривода.** После изобретения электрических двигателей общезаводской паровой привод был заменен на *электрический*. Установку из паровой машины и генератора электрической энергии (электрическую станцию) строили в стороне от завода (вблизи рек, разработок торфа, угля и пр.), а в заводском корпусе устанавливали электродвигатель. Отпала необходимость в механической передаче движения через заводские двory и стены корпусов. Это был *общезаводской электрический привод*.

Неудобства распределения механической энергии от электродвигателя внутри здания с помощью междуэтажных механических передач послужили причиной возникновения *группового электропривода*. В этом случае производственные машины разбивались на группы, приводимые в движение отдельными электродвигателями достаточной мощности, а движение к производственным машинам в группе по-прежнему передавалось через трансмиссии. Такой привод был неэкономичным, потому что были велики потери в трансмиссиях. Групповой электропривод характерен для промышленных предприятий дореволюционной России.

Затем групповой электропривод был заменен *одиночным электроприводом*, в котором каждый станок имел отдельный двигатель. Еще позже станки с несколькими подвижными узлами комплектовались отдельными электродвигателями для каждого узла – это был уже *многодвигательный электропривод*.

Число электродвигателей, устанавливаемых на одном станке, может доходить до нескольких десятков. Быстрое и точное ручное

управление такими электродвигателями (с помощью кнопок, переключателей) для рабочего становится трудным, а иногда и непосильным. По этой причине стали применять *автоматизированный многодвигательный электропривод*, в котором управление электродвигателями (пуск, останов, реверс в нужное время и в требуемых сочетаниях) осуществляют *автоматизированные системы управления (АСУ)*. В таких АЭП для быстрого, точного и надежного управления используют последние достижения электроавтоматики, электроники, микропроцессорной и полупроводниковой техники.

АСУ обращает станок в автомат, дает возможность создавать автоматические линии (при управлении несколькими станками, обеспечивающими последовательную обработку одной детали), участки, цехи и даже заводы-автоматы. Перенос деталей со станка на станок, их подъем, спуск, поворот, зажатие в приспособлении и другие операции производят разного рода промышленные роботы: автоматические рули, транспортеры, подъемники, поворотные столы, электроключи, электрогайковерты и пр.

Изучение вопросов электрооборудования станков, АЭП необходимо для понимания современных средств и возможностей в области автоматизации современных станков, автоматических линий и заводов. Без таких знаний нельзя ни спроектировать новый станок, ни объяснить работу современного станка с автоматизированной системой управления. *Поэтому знание вопросов АЭП и электрооборудования станков для инженера-механика, конструирующего или эксплуатирующего современные станки и автоматические линии, является необходимым.*

## **Лекция 2. ВИДЫ ПЕРЕДАТОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

### **МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**Цель:** *изучить виды передаточных механизмов и кинематические схемы электроприводов; типы механических характеристик производственных механизмов и электродвигателей; принципы при-ведения моментов и сил сопротивления, моментов инерции и масс движущихся элементов*

*кинематической схемы электропривода к валу электродвигателя; уравнение вращательного движения электропривода; методику расчета оптимального передаточного числа редуктора.*

Электрические, механические и габаритные параметры электродвигателя взаимосвязаны. Например, номинальные мощность  $P_n$ , вращающий момент  $M_n$ , угловая скорость ротора (якоря)  $\omega_n$ , диаметр  $D$  и длина  $L$  активной части якоря электрической машины связаны соотношениями

$$P_n = M_n \omega_n; \quad M_n = C_k D^2 L,$$

где  $C_k$  – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей машины.

Из этих зависимостей следует, что при заданной мощности для уменьшения габаритов электродвигателя ( $D^2L$ ) необходимо увеличивать его угловую скорость  $\omega_n$ , особенно для маломощных двигателей (до  $\omega_n = 100 \dots 600$  рад/с). А для рабочих машин по технологическим условиям требуется значительно меньшая скорость (в 10 и более раз). Поэтому для согласования механических параметров электродвигателя (скорости и момента) с механическими параметрами рабочей машины используют *передаточный механизм* (ПМ), который может изменять и характер движения, преобразуя вращательное движение в поступательное.

*По конструктивному исполнению различают следующие виды ПМ (рис. 2.1):*

- 1) редукторы;
- 2) ременные (цепные) передачи;
- 3) типа барабан – трос (шкив – канат);
- 4) типа винт – гайка;
- 5) типа зубчатое колесо – рейка.

Дадим краткую характеристику этим ПМ.

**Редукторы** представляют собой зубчатые передачи, заключенные в единый корпус. *По числу зубчатых пар* они бывают одно-, двух-, трех-,  $n$ -ступенчатые; *по виду зубьев* – прямозубые, косозубые, червячные; *по исполнению* – цилиндрические, конические; *по принципу действия* – обычные и планетарные.

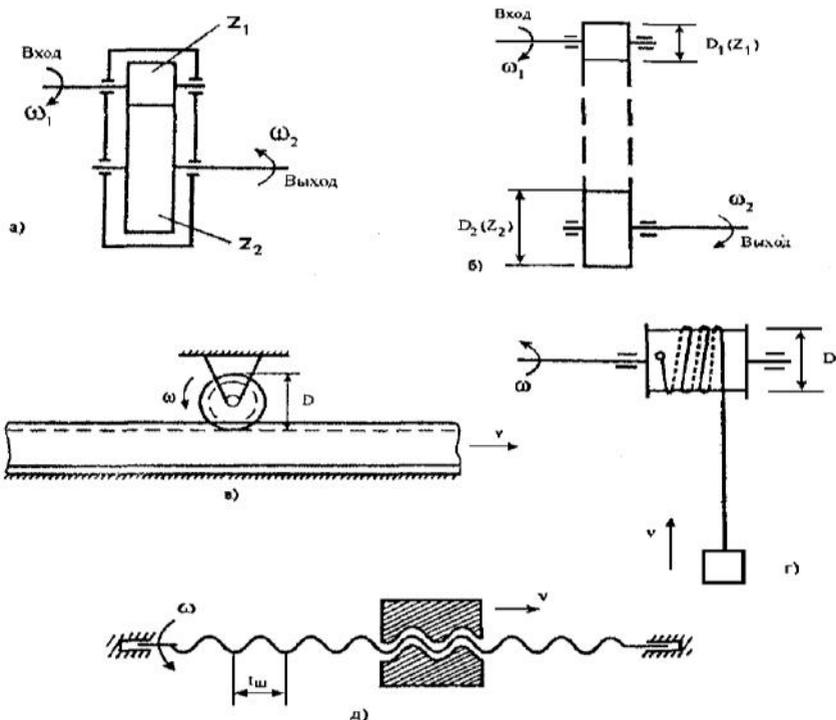


Рис. 2.1. Кинематические звенья:

- а) редуктор; б) ременная (цепная) передача; в) передача «зубчатое колесо – рейка»; г) передача «канат (трос) – барабан (шкив)»; д) передача «винт – гайка»

Редуктор характеризуется передаточным числом  $i$ :

$$i = \omega_1 / \omega_2,$$

где  $\omega_1$  – входная скорость;

$\omega_2$  – выходная скорость.

Передаточное число  $n$ -ступенчатого редуктора

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot \dots \cdot i_n,$$

где  $i_1, i_2, \dots, i_n$  – передаточные числа отдельных ступеней.

Редуктор характеризуется также входной мощностью (до 560 кВт) и максимальным выходным моментом (до 1200 кН·м). Входная и

выходная оси редуктора могут быть расположены коаксиально, параллельно и ортогонально.

**Ременные (цепные) передачи** характеризуются передаточным числом

$$i = \omega_1 / \omega_2 = D_2 / D_1 = z_2 / z_1,$$

где  $D_1, z_1$  – диаметр число зубьев входного шкива (звездочки);

$D_2, z_2$  – диаметр число зубьев выходного шкива (звездочки).

Передачи типа «зубчатое колесо – рейка», «барабан – трос (шкив – канат)» и «винт – гайка» преобразуют вращательное движение в поступательное и характеризуются *радиусом приведения*  $\rho$ :

$$\rho = V/\omega, \text{ м/рад.}$$

**Кинематические схемы электроприводов.** Механическая часть структурной схемы ЭП включает в себя все механически связанные между собой движущиеся инерционные массы: ротор (якорь) двигателя, ПМ и рабочее оборудование технологической установки. Непосредственное представление о движущихся массах установки и механических связях между ними дает кинематическая схема ЭП. Значит, *кинематической схемой* ЭП какой-либо конкретной производственной установки называется схема механической части ЭП со всеми движущимися инерционными массами и механическими связями между ними. Кинематические схемы ЭП разнообразны. Рассмотрим два характерных их примера.

**Кинематическая схема ЭП центробежного вентилятора** (рис. 2.2). Ротор электродвигателя Д соединяется с рабочим колесом вентилятора с помощью соединительной муфты СМ. Все элементы кинематической схемы движутся с одной и той же угловой скоростью  $\omega$ . На рабочем колесе вентилятора развивается момент сопротивления движению  $M_{\text{мех}}$ , зависящий от скорости  $\omega_{\text{мех}}$  (рис. 2.3):

$$M_{\text{мех}} = \Delta M_{\text{мех}} + M_{\text{в.н.}} (\omega_{\text{мех}} / \omega_{\text{в.н.}})^2;$$

$$\omega_{\text{в.н.}} = \omega_{\text{н.дв.}}$$

где  $M_{\text{в.н.}}, \omega_{\text{в.н.}}$  – номинальные момент и угловая скорость вентилятора;

$\Delta M_{\text{мех}}$  – момент механических потерь на трение в подшипниках рабочего колеса вентилятора.

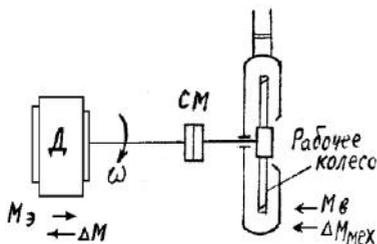


Рис. 2.2. Кинематическая схема ЭП вентилятора

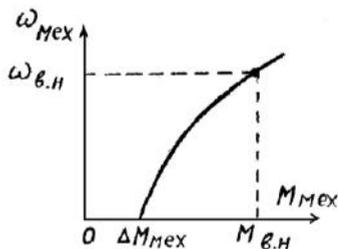


Рис. 2.3. Механическая характеристика вентилятора

К ротору двигателя приложен электромагнитный момент двигателя  $M_{\text{Э}}$ , а также момент механических потерь в двигателе  $\Delta M$ , обусловленный силами трения в подшипниках, и момент сопротивления движению  $M_{\text{в}}$ , создаваемый вентилятором.

Номинальная угловая скорость двигателя  $\omega_{\text{н.дв}}$  совпадает с номинальной скоростью вентилятора. Этим определяется простота кинематической схемы ЭП.

В других случаях  $\omega_{\text{в.н}} \neq \omega_{\text{н.дв}}$  и в кинематическую схему вводят различные передачи: зубчатые, цепные, фрикционные, клиноременные и др. (см. рис. 2.1). Если требуется механическое регулирование скорости, вводят передачи с переменным передаточным числом  $i$  (коробки передач, фрикционные вариаторы).

**Кинематическая схема электропривода шпинделя токарного станка** (рис. 2.4). В этой схеме движение от электродвигателя Д к шпинделю Ш с заготовкой обрабатываемой детали З передается через клиноременную передачу КРП и коробку передач КП. Передаточное число  $i$  может изменяться ступенчато за счет введения в зацепление шестерен с различным числом зубьев. В результате взаимодействия вращающейся детали с неподвижным резцом возникает усилие резания  $F_z$  и момент резания

$$M_{\text{мех}} = M_z = F_z R_3,$$

где  $R_3$  – радиус заготовки обрабатываемой детали.

В процессе обработки детали усилие и момент резания остаются постоянными и не зависят от угловой скорости  $\omega_3$  (рис. 2.5). Полезный момент нагрузки механизма  $M_{\text{мех}}$  при постоянном усилии резания  $F_z$  пропорционален радиусу обрабатываемой детали  $R_3$ .

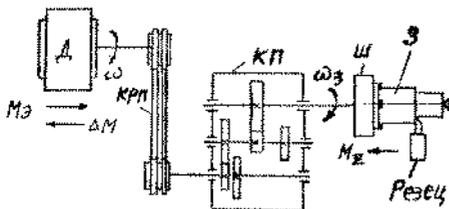


Рис. 2.4. Кинематическая схема ЭП шпинделя токарного станка

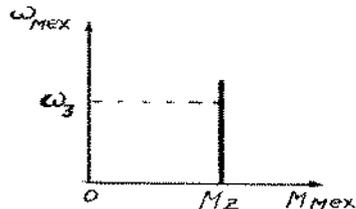


Рис. 2.5. Механическая характеристика

Кроме полезного момента нагрузки  $M_{\text{мех}} = M_z$ , а также приложенного к ротору двигателя электромагнитного момента  $M$  и момента потерь в двигателе  $\Delta M$  во всех элементах рассматриваемой кинематической цепи действуют силы трения: в подшипниках, в зубчатых зацеплениях, в трущихся поверхностях клиноременной передачи.

**Механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей.** При выборе электродвигателя к производственному механизму приходится уточнять, насколько механические свойства электродвигателя соответствуют механической характеристике рабочей машины и характеру ее работы, так как соответствие механических характеристик электродвигателя конкретно-му производственному механизму позволяет обеспечить наиболее высокую его производительность и экономичную работу.

**Механическая (или статическая) характеристика производственного механизма** представляет собой зависимость между его статическим моментом сопротивления и скоростью, т.е.

$$\omega = f(M_c) \text{ или } M_c = f(\omega).$$

Производственные механизмы обладают различными механическими характеристиками. Существует следующая

эмпирическая обобщенная формула для механических характеристик производственных механизмов:

$$M_c = M_0 + (M_{c.n} - M_0)(\omega / \omega_n)^x,$$

где  $M_c$  – момент сопротивления механизма при угловой скорости  $\omega$ ;  
 $M_0$  – момент сопротивления трения в движущихся частях механизма;

$M_{c.n}$ ,  $\omega_n$  – номинальные момент сопротивления и скорость;

$x$  – показатель степени, характеризующий изменение момента  $M_c$  при изменении угловой скорости  $\omega$ .

Различают четыре основных вида (класса, категории) механических характеристик и соответственно производственных механизмов (рис. 2.6):

1)  $x = 0$ ,  $M_c = \text{const}$  (момент сопротивления не зависит от скорости). Такой механической характеристикой обладают механизмы, совершающие работу подъема, формоизменения материала или преодолевающие трение (подъемные механизмы, механизмы передвижения и др.). Мощность таких механизмов возрастает линейно со скоростью;

2)  $x = 1$ ,  $M_c = c\omega$  (момент сопротивления линейно зависит от угловой скорости). Такую характеристику может иметь, например, привод генератора постоянного тока, работающего на постоянное сопротивление. Здесь мощность пропорциональна квадрату скорости;

3)  $x = 2$ ,  $M_c = c\omega^2$ . Такой механической характеристикой обладают механизмы, работа которых сводится к преодолению сопротивления воздуха или жидкости (вентиляторы, центробежные насосы, центрифуги, судовые винты и др.). Момент сопротивления у таких механизмов часто называют *вентиляторным*, а механизмы – механизмами с *вентиляторным моментом*. Мощность таких механизмов примерно пропорциональна кубу скорости;

4)  $x = 3$ ,  $M_c = c/\omega$ . Такой механической характеристикой обладают моталки в металлургической промышленности, электронакат в бумажной промышленности, некоторые металлорежущие станки. Мощность на валу у таких машин приблизительно постоянна.

**Механические характеристики электродвигателя** представляют собой зависимость угловой скорости  $\omega$  от развиваемого им момента на валу, т.е.  $\omega = f(M)$ .

Различают естественные и искусственные механические характеристики электродвигателя. *Естественная* механическая характеристика соответствует работе электродвигателя с номинальными параметрами при нормальной схеме включения. *Искусственная* механическая характеристика соответствует работе электродвигателя с пара-метрами, отличающимися от номинальных, например, при введении сопротивления, изменении питающего напряжения, частоты и др.

Для оценки изменения скорости при изменении момента на валу служит так называемая *жесткость характеристики*, которая равна отношению приращения момента  $\Delta M$  к соответствующему приращению скорости  $\Delta \omega$  (рис. 2.7):

$$\beta = (M_2 - M_1) / (\omega_2 - \omega_1) = \Delta M / \Delta \omega.$$

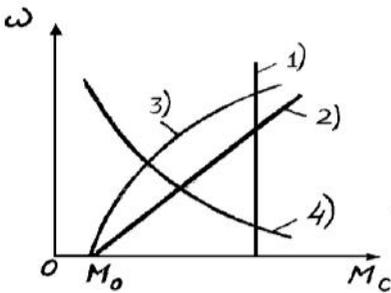


Рис. 2.6. Механические характеристики производственных механизмов

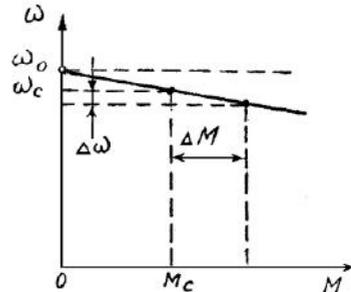


Рис. 2.7. К пояснению жесткости механической характеристики электродвигателя

Линейные механические характеристики имеют постоянную жесткость, а криволинейные – в каждой точке свою, равную первой производной от момента по скорости, т.е.

$$\beta = dM / d\omega.$$

Естественные механические характеристики электродвигателей по степени жесткости разделяются на следующие группы (рис. 2.8):

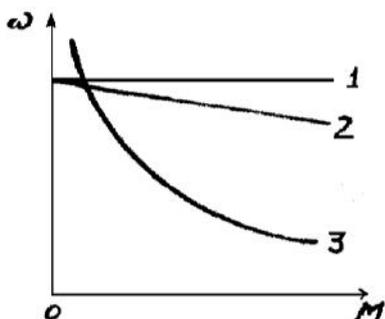


Рис. 2.8. Механические характеристики электродвигателей

1) абсолютно жесткая характеристика (линия 1), при которой скорость электродвигателя при изменении нагрузки не изменяется ( $\beta = \infty$ ). К этой группе относятся синхронные двигатели;

2) жесткая характеристика (линия 2), при которой скорость электродвигателя с возрастанием момента нагрузки уменьшается на небольшую величину ( $\beta = 40 \dots 10$ ). К этой группе относятся

асинхронные электродвигатели (работающие при скольжениях меньших критического) и двигатели постоянного тока с параллельным (и независимым) возбуждением;

3) мягкая механическая характеристика (линия 3), при которой скорость электродвигателя резко уменьшается с увеличением момента нагрузки ( $\beta < 10$ ). Такой характеристикой обладает двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением.

При совместной работе электродвигателя с производственным механизмом в установившемся режиме вращающий момент двигателя уравнивается статическим моментом сопротивления механизма, при этом электродвигатель работает с определенной скоростью. При изменении момента сопротивления на валу электродвигателя равновесие моментов нарушается, возникает переходный процесс, в результате которого электропривод переходит в новое установившееся состояние (при устойчивой работе), но с другими значениями момента и скорости электродвигателя. Для устойчивой работы электропривода в пределах определенных скоростей и моментов сопротивления производственного механизма требуется, чтобы электродвигатель обладал соответствующей механической характеристикой. А это достигается выбором электродвигателя определенного типа и изменением электрических параметров его цепей.

### Лекция 3. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

## ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Механическая часть ЭП может представлять сложную кинематическую схему с большим числом движущихся элементов, при этом одни элементы совершают вращательное движение, другие – поступательное (например, в подъемниках, кранах, строгальных станках и др.). Каждый элемент обладает определенной *упругостью* (т.е. под нагрузкой может деформироваться), а в соединительных элементах могут быть воздушные зазоры. Значит, механическая схема ЭП является *многомассовой*, с упругими связями и зазорами, расчет динамики которой составляет определенные трудности (нужно использовать программы расчетов на ЭВМ).

В инженерных расчетах, не требующих большой точности, в системах с незначительными упругостями элементов и небольшими зазорами (т.е. с большой жесткостью) принимают *допущение, что механические связи элементов являются абсолютно жесткими*. При таком допущении движение одного элемента дает полную информацию о движении и других элементов.

Обычно в качестве такого первоначального элемента принимают вал двигателя. Тогда расчетная схема механизма многомассовой механической части ЭП (рис. 3.1, *а*, 3.2, *а*) сводится к одному обобщенному жесткому механическому звену (рис. 3.1, *б*, 3.2, *б*), имеющему эквивалентную массу с моментом инерции  $J$ , угловую скорость вращения  $\omega$ , угол поворота  $\varphi$ , и на которое звено действуют электромагнитный момент двигателя  $M$  и суммарный приведенный к валу двигателя статический момент сопротивления  $M_c$  (включающий все механические потери в системе, в том числе и в двигателе).

**Приведение моментов сопротивления и сил, моментов инерции и масс к валу электродвигателя.** Сначала примем допущение, что передаточный механизм ПМ (рис. 3.1, *а*) идеальный, т.е. не имеет потерь энергии, не обладает массой и осуществляет только количественное преобразование механической энергии от двигателя к производственному механизму. Учет потерь в ПМ рассмотрим несколько позже.

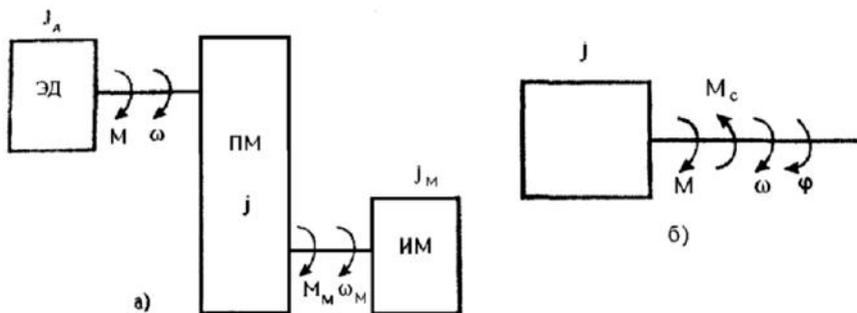


Рис. 3.1. Приведение многомассовой системы к одномассовой при вращательном движении механизма

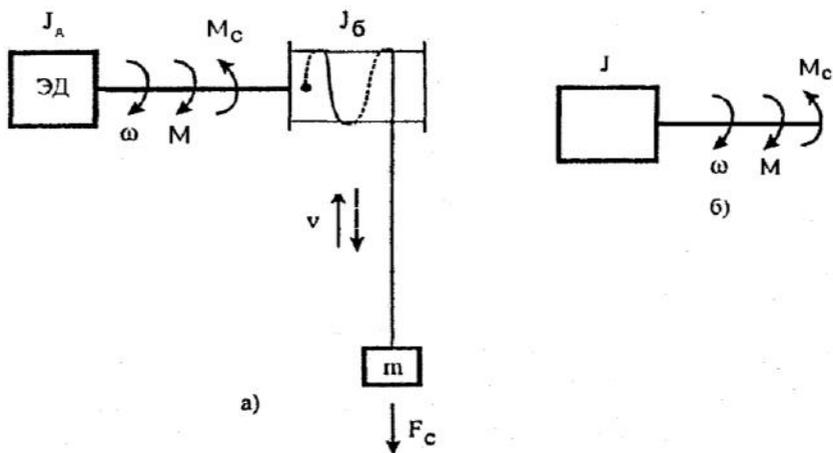


Рис. 3.2. Приведение многомассовой системы к одномассовой при поступательном движении механизма

Приведение статических моментов сопротивления к валу осуществляется из условия равенства передаваемой мощности на любом валу (см. рис. 3.1, а):

$$M_C \omega = M_M \omega_M.$$

Из этого равенства находим выражение для определения приведенного статического момента  $M_C$ :

$$M_c = M_M(\omega_M / \omega) = M_M / (\omega / \omega_M) = M_M / i, \quad (3.1)$$

где  $i = \omega / \omega_M$  – передаточное число ПМ.

Следовательно, статический момент на валу электродвигателя при отсутствии потерь в ПМ равен моменту сопротивления  $M_M$  на валу исполнительного механизма ИМ, деленному на передаточное число  $i$  ПМ. В этом и заключается приведение момента сопротивления ИМ к валу электродвигателя.

При поступательном движении ИМ (см. рис. 3.2, а) и допущении об идеальности передачи из условия равенства передаваемой мощности от электродвигателя ЭД к поднимаемому грузу имеем равенство

$$M_c \omega = F_c V,$$

где  $M_c$  – эквивалентный статический момент на валу ЭД одномассовой системы (см. рис. 3.2, б);

$F_c$  – сила сопротивления в установившемся режиме;

$V$  – линейная скорость подъема груза.

Тогда из этого равенства получаем

$$M_c = F_c V / \omega = F_c \rho, \quad (3.2)$$

где  $\rho$  – радиус приведения поступательного движения к вращательному.

Значит, приведенный к валу электродвигателя статический момент от силы сопротивления для поступательного движения при идеальной передаче равен силе сопротивления  $F_c$ , умноженной на радиус приведения  $\rho$ .

Теперь рассмотрим приведение моментов инерции и масс к валу электродвигателя для *линейных* ПМ ( $i = \text{const}$ ,  $\rho = \text{const}$ ).

Приведение моментов инерции ИМ к валу ЭД осуществляется из условия, что величина суммарного запаса кинетической энергии системы, приведенной к валу ЭД, остается неизменной (см. рис. 3.1):

$$J \omega^2 / 2 = J_d \omega^2 / 2 + J_M \omega_M^2 / 2.$$

Из этого равенства находим, что суммарный момент инерции приведенной системы

$$J = J_{\text{д}} + J_{\text{м}} (\omega_{\text{м}} / \omega)^2 = J_{\text{д}} + J_{\text{м}} / i^2 = J_{\text{д}} + J_{\text{м}}',$$

где  $J_{\text{м}}'$  – приведенный к валу ЭД момент инерции ИМ.

Значит, приведенный к валу ЭД момент инерции ИМ при идеальном ПМ равен моменту инерции ИМ, деленному на передаточное число ПМ в квадрате:

$$J_{\text{м}}' = J_{\text{м}} / i^2.$$

Для поступательного движения ИМ (см. рис. 3.2) приведение поступательно движущихся масс к вращательному движению вала ЭД осуществляется на основании равенства кинетических энергий приведенной и неприведенной систем:

$$J \omega^2 / 2 = (J_{\text{д}} + J_{\text{б}}) \omega^2 / 2 + m V^2 / 2,$$

из которого получаем, что

$$J = J_{\text{д}} + J_{\text{б}} + m (V/\omega)^2 = J_{\text{д}} + J_{\text{б}} + m \rho^2 = J_{\text{д}} + J_{\text{б}} + J_{\text{м}}',$$

где

$$J_{\text{м}}' = m \rho^2,$$

$J_{\text{м}}'$  – приведенный к валу ЭД момент инерции поступательно движущейся массы  $m$ .

Следовательно, приведенный к валу ЭД момент инерции поступательно движущейся массы  $m$  равен произведению этой массы на радиус приведения  $\rho$  в квадрате.

**Учет потерь в передачах.** Потери энергии (мощности) в ПМ учитывают двумя способами: 1) приближенным (с помощью КПД) и 2) уточненным (путем вычисления всех составляющих потерь). Рассмотрим *первый способ* (второй способ см. в [1, с. 42]).

Механическая часть ЭП (рис. 3.3) включает ротор ЭД, вращающийся с угловой скоростью  $\omega$  и приложенным моментом  $M$ , передаточный механизм ПМ с КПД  $\eta_{\text{п}}$  и передаточным числом  $i$  и

исполнительный механизм ИМ, вращающийся со скоростью  $\omega_M$  и приложенным моментом сопротивления  $M_M$ . При направлении энергии от ЭД к ИМ имеем двигательный режим работы ЭП, а при обратном потоке энергии – тормозной. В установившемся режиме работы ЭП, который мы и будем рассматривать для учета потерь в ПМ, движущий момент  $M$  на валу ЭД равен приведенному к валу статическому моменту  $M_c$ , который учитывает момент сопротивления  $M_M$  ИМ и момент потерь в ПМ, т.е.  $M = M_c$ . Для наглядности обозначим  $M_c$  в двигательном режиме ЭП через  $M_{c\uparrow}$ , а в тормозном – через  $M_{c\downarrow}$ . Тогда, исходя из закона сохранения энергии, можно записать равенства:

$$\omega M_{c\uparrow} \eta_{\text{п}} = M_M \omega_M \quad \text{для двигательного режима,}$$

$$M_M \omega_M \eta_{\text{п}} = M_{c\downarrow} \omega \quad \text{для тормозного режима,}$$

из которых следует, что

$$M_{c\uparrow} = (M_M \omega_M) / (\omega \eta_{\text{п}}) = M_M / (i \eta_{\text{п}}) = M_M' / \eta_{\text{п}},$$

$$M_{c\downarrow} = M_M \omega_M \eta_{\text{п}} / \omega = M_M \eta_{\text{п}} / i = M_M' \eta_{\text{п}},$$

где  $M_M'$  – момент ИМ, приведенный к валу ЭД без учета потерь в ПМ.

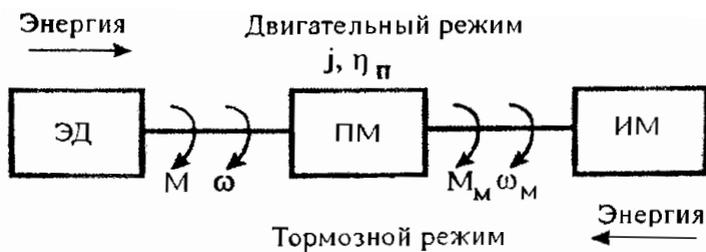


Рис. 3.3. Механическая часть электропривода

Следовательно, для учета потерь в ПМ при приведении статических моментов и сил сопротивления ИМ в формулах (3.1) и

(3.2) необходимо в двигательном режиме работы ЭП учесть КПД  $\eta_{\text{п}}$  в знаменателе, а в тормозном режиме – в числителе, т.е.

$$M_{\text{с}\uparrow} = M_{\text{м}} / (i \eta_{\text{п}}) = F_{\text{с}} \rho / \eta_{\text{п}},$$

$$M_{\text{с}\downarrow} = M_{\text{м}} \eta_{\text{п}} / i = F_{\text{с}} \rho \eta_{\text{п}}.$$

Но КПД  $\eta_{\text{п}}$  не является постоянной величиной, он зависит от коэффициента загрузки  $K_3$  и номинального КПД  $\eta_{\text{п ном}}$  [1] :

$$\eta_{\text{п}} = [1/ \eta_{\text{п ном}} + \alpha (1/ K_3 - 1)] - 1,$$

где  $\alpha$  – коэффициент постоянных потерь, который для некоторых передач приводится в справочниках.

Учитывая, что для многих передач  $\eta_{\text{п ном}} \approx 0,8...0,9$ , в расчетах можно ориентировочно принять  $\alpha = 0,07...0,1$  и по приведенной формуле рассчитывать КПД передачи при частичной загрузке ЭП.

**Пример.** Шахтная подъемная лебедка поднимает груз  $G = 60\,000$  Н (рис. 3.4). Определить приведенные к валу электродвигателя суммарный момент инерции ЭП подъемной лебедки и статический момент нагрузки, если даны номинальная скорость вращения электродвигателя  $n_{\text{н}} = 494$  об/мин, вес каната  $G_{\text{к}} = 7\,800$  Н, передаточное число редуктора  $i = 11,5$ , КПД редуктора  $\eta = 0,94$ , момент инерции барабана Б вместе с зубчатым колесом 2  $J_2 = 67,5$  кг·м<sup>2</sup>, момент инерции двигателя вместе с зубчатым колесом 1  $J_1 = 106$  кг·м<sup>2</sup>, диаметр барабана  $D_6 = 3$  м.

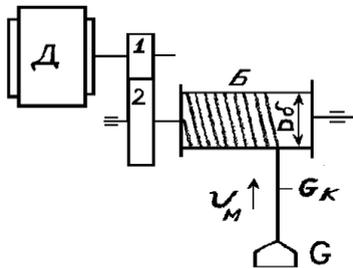


Рис. 3.4. Кинематическая схема подъемной лебедки

### Решение

1. Определим скорость подъема груза  $V_M$ :

$$V_M = \pi D_6 n_n / (i \cdot 60) = 3,14 \cdot 3 \cdot 494 / (11,1 \cdot 60) = 6,75 \text{ м/с.}$$

2. Определим суммарный приведенный к валу электродвигателя момент инерции подъемной лебедки:

$$J = J_1 + J_2 / i^2 + ((G + G_k) / g^2)(V_M / \omega_n)^2 = 106 + 67,5 / (11,5)^2 + \\ + ((60\,000 + 7\,800) / (9,81)^2) \cdot (6,75 / 51,7)^2 = 118,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

где  $\omega_n = \pi n_n / 30 = 3,14 \cdot 494 / 30 = 51,7 \text{ рад/с.}$

3. Приведенный к валу электродвигателя момент сопротивления нагрузки:

$$M_{c\uparrow} = (G + G_k) R_6 / (i \eta) = \\ = (60\,000 + 7\,800) \cdot 1,5 / (11,5 \cdot 0,94) = 9\,400 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

или

$$M_{c\uparrow} = ((G + G_k) / 10) \cdot \rho / \eta = \\ = (60\,000 + 7\,800) / 10 \cdot 6,75 / 51,7 / 0,94 = 9\,400 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

#### **Лекция 4. УРАВНЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

В работе электропривода различают два основных режима: установившийся и переходный. В *установившемся режиме* электропривод работает с постоянной скоростью. Нарушение постоянства скорости (при регулировании хода технологического процесса, изменении параметров питающего напряжения и др.) вызывает *переходный режим*, в течение которого система «электродвигатель – рабочая машина» переходит в новое установившееся состояние.

Изучением поведения электропривода в переходных режимах занимается *динамика электропривода*, используя уравнение движения электропривода. Рассмотрим данное уравнение. При работе электропривода под нагрузкой с постоянной скоростью вращения вращающий момент электродвигателя  $M$

уравновешивается статическим моментом сопротивления  $M_c$ , приложенным к валу электродвигателя со стороны рабочей машины, т.е.

$$M = M_c. \quad (4.1)$$

Такой режим работы электропривода называется *установившимся*. При нарушении равенства (4.1) возникает динамический момент  $M_{дин}$ , характеризующий переходный режим. При этом уравнение равновесия моментов имеет вид

$$M = M_c + M_{дин}, \quad (4.2)$$

где  $M$  – вращающий момент электродвигателя, Н·м;

$M_c$  – статический момент сопротивления, приведенный к валу электродвигателя, Н·м;

$M_{дин}$  – динамический момент, приведенный к валу электродвигателя, Н·м.

Рассмотрим подробнее отдельные составляющие уравнения (4.2). *Вращающий* (или *электромагнитный*) момент электродвигателя  $M$  создается в результате взаимодействия магнитного потока с током, протекающим по ротору или якорю электродвигателя. Момент на валу электродвигателя  $M_v$  отличается от электромагнитного момента  $M$  на величину момента потерь холостого хода  $M_0$ , определяемого трением в подшипниках, щеток о коллектор или кольца, вентиляторными потерями и потерями в стали. Момент на валу электродвигателя зависит от режима работы электропривода. В двигательном режиме момент  $M_0$  уменьшает момент на валу, а в тормозном режиме увеличивает его. Поэтому

$$M_v = M \pm M_0.$$

Величина  $M_0$  составляет несколько процентов от номинального момента  $M_n$  на валу электродвигателя.

Вращающий момент электродвигателя считается *положительным*, если он направлен в сторону движения рабочей машины, и *отрицательным* – если против движения (режим торможения).

Момент статического сопротивления  $M_c$  состоит из момента полезной работы (например, подъем груза) и момента трения  $M_{тр}$ , который учитывается коэффициентом полезного действия механизма.

Моменты, соответствующие полезной работе, бывают двух видов: реактивные и активные.

**Реактивные моменты** – это моменты, которые во всех случаях являются тормозящими, противодействующими движению. К ним относятся моменты резания, кручения, давления, сжатия неупругих тел и моменты трения. Реактивные моменты меняют свой знак при изменении направления вращения привода.

**Активные (или потенциальные) моменты** – это моменты от веса, сжатия, растяжения и скручивания упругих тел. В отличие от реактивных активные моменты сохраняют направление своего действия при изменении направления вращения привода. Они могут быть направлены как по направлению движения, так и против него. Активные моменты, препятствующие движению, принимаются со знаком «минус», а способствующие движению – со знаком «плюс».

*Динамический момент* определяется угловым ускорением (замедлением) и моментом инерции системы электропривода:

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt},$$

где  $J$  – момент инерции всех движущихся частей,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;

$d\omega/dt$  – угловое ускорение (замедление),  $\text{рад}/\text{с}^2$ ;

$\omega$  – угловая скорость,  $\text{рад}/\text{с}$ ;

$t$  – время, с.

При постоянном моменте инерции уравнение движения электропривода (4.2)

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}$$

или

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (4.3)$$

Знак перед  $M_{\text{дин}}$ , а следовательно, и перед  $d\omega/dt$  зависит от соотношения величин и знаков  $M$  и  $M_c$ . При  $M > M_c$  привод ускоряется,  $d\omega/dt > 0$ ,  $M_{\text{дин}}$  – положительная величина. При  $M < M_c$  привод замедляется,  $d\omega/dt < 0$ ,  $M_{\text{дин}}$  – отрицательная величина. Когда  $M = M_c$ , ускорение или замедление отсутствует, т.е.  $d\omega/dt = 0$ ,  $M_{\text{дин}} = 0$ , привод работает в установившемся режиме с постоянной скоростью  $\omega$ .

В общем виде уравнение движения электропривода (4.3) с учетом режимов работы электродвигателя и знаков моментов можно записать

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

**Время разгона и торможения электропривода.** Время переходного режима для некоторых производственных механизмов в значительной степени определяет их производительность, влияет на выбор электродвигателя и т.д.

Для определения времени переходного процесса необходимо решить уравнение движения электропривода относительно времени:

$$dt = J d\omega / (M - M_c),$$

откуда  $t = \int J d\omega / (M - M_c)$ .

Для решения данного уравнения необходимо знать зависимости момента двигателя  $M$  и момента сопротивления  $M_c$  от угловой скорости  $\omega$ . Частные случаи этой задачи должны учитывать знаки моментов и пределы интегрирования.

При *разгоне электродвигателя* с помощью пускового реостата можно принять момент электродвигателя постоянным и равным:

$$M = \alpha M_n = \text{const},$$

где  $\alpha M_n$  – средний момент при пуске;

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий кратность среднего пускового момента по отношению к номинальному моменту электродвигателя  $M_H$ .

Для случая пуска электродвигателя из неподвижного состояния с  $M_c = \text{const}$  и  $J = \text{const}$  время разгона

$$t_p = J \int_0^{\omega_c} d\omega / (\alpha M_H - M_c) = J \omega_c / (\alpha M_H - M_c). \quad (4.4)$$

При электрическом *торможении электропривода* уравнение движения будет иметь вид

$$-M - M_c = J (d\omega/dt).$$

Из этого уравнения следует, что время торможения электропривода

$$t_T = - \int_{\omega_c}^0 J d\omega / (M + M_c).$$

Принимая по-прежнему  $M = \alpha M_H = \text{const}$ ,  $M_c = \text{const}$ ,  $J = \text{const}$ , время торможения от скорости  $\omega_c$  до 0 будет

$$t_T = J \int_0^{\omega_c} d\omega / (\alpha M_H + M_c) = J \omega_c / (\alpha M_H + M_c). \quad (4.5)$$

Анализ полученных выражений для  $t_p$  и  $t_T$  показывает, что одним из существенных факторов, определяющих длительность переходного процесса, является момент инерции электропривода. Поэтому в электроприводах с частыми пусками и торможениями применяют специальные электродвигатели с уменьшенным диаметром при соответствующем удлинении ротора (крановые электродвигатели). В электроприводах большой мощности вместо одного двигателя устанавливают два – каждый половинной

мощности, что позволяет сократить время переходного режима в два раза.

**Выбор оптимального передаточного числа редуктора.** При проектировании и модернизации электропривода приходится решать задачу по выбору оптимального (наивыгоднейшего) передаточного числа редуктора  $i_{\text{опт}}$ . Практически это сводится к определению номинальной скорости вращения электродвигателя. Если электродвигатели одинаковой мощности, но с большей номинальной скоростью имеют меньшие габариты, массу и стоимость, то целесообразно использовать более быстроходные электродвигатели. Однако при этом оказывается, что редуктор должен иметь большее передаточное число (это повышает его стоимость). Для электроприводов с редкими пусками выбор  $i_{\text{опт}}$  (или номинальной скорости вращения электродвигателя) производится из условия *наименьшей общей стоимости электродвигателя и редуктора*.

Для электроприводов с частыми пусками наиболее существенным критерием является сокращение общего времени переходного процесса  $t_p + t_T$  до минимума. Рассмотрим определение  $i_{\text{опт}}$ , исходя из минимума времени переходного процесса  $t_{\text{п.п}}$ . Представим время переходного процесса, используя выражения (4.4) и (4.5), в таком виде:

$$t_{\text{п.п}} = t_p + t_T = (J_d \delta + J_M / i^2) \omega_c / (\alpha M_H - M_C) + \\ + (J_d \delta + J_M / i^2) \omega_c / (\alpha M_H + M_C). \quad (4.6)$$

Здесь суммарный момент инерции системы электропривода  $J$ , приведенный к валу электродвигателя, представлен в виде

$$J = J_d \delta + J_M / i^2,$$

где  $\delta = 1, 1, \dots, 1, 3$  – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора (так как момент инерции редуктора в большинстве своем неизвестен, то его в расчетах принимают равным 10...30 % от момента инерции ротора электродвигателя  $J_d$ ), т.е. составляющая  $J_d \delta$  – это суммарный момент инерции ротора электродвигателя и редуктора.

Принимая  $\omega_c = \omega_n$ , умножим и разделим оба слагаемых выражения (4.6) на  $\omega_n$  и учтем, что

$$M_n \omega_n = P_n; \quad M_c \omega_n = P_c; \quad J_d \delta \omega_n^2 = 2W_{к.д};$$

$$J_M (\omega_n / i)^2 = J_M \omega_M^2 = 2W_{к.м}.$$

Здесь  $\omega_n$  – номинальная угловая скорость вращения.  
Тогда

$$t_{п.п} = 2 (W_{к.д} + W_{к.м}) / (\alpha P_n - P_c) +$$

$$+ 2(W_{к.д} + W_{к.м}) / (\alpha P_n + P_c), \quad (4.7)$$

где  $W_{к.д}$  – кинетическая энергия ротора электродвигателя с редуктором;

$W_{к.м}$  – кинетическая энергия движущихся частей механизма;

$P_n$  – номинальная мощность электродвигателя;

$P_c$  – статическая мощность нагрузки на валу электродвигателя.

Номинальная мощность электродвигателя определяется его нагревом при данной нагрузке и является неизменной величиной. Статическая мощность нагрузки определяется работой, которую должен совершить исполнительный механизм. Кинетическая энергия механизма определяется его конструкцией. Следовательно, единственной величиной, которую можно изменять в (4.7), является кинетическая энергия  $W_{к.д}$ . При минимуме  $W_{к.д}$  будем иметь минимум времени переходного процесса  $t_{п.п}$ . Отсюда следует простое правило определения оптимального передаточного числа редуктора: для заданной номинальной мощности  $P_n$  из каталога выбирают несколько электродвигателей на разные номинальные скорости и вычисляют произведение  $J_{д_i} \omega_{н_i}^2$  (или  $J_{д_i} i_i^2$ , так как  $i_i = \omega_{н_i} / \omega_M = \text{const}$ ), из которых выбирают наименьшее.

Тогда

$$i_{\text{опт}} = \omega_{н \text{ опт}} / \omega_M.$$

## Лекция 5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

*Цель:* изучить механические характеристики электродвигателей переменного и постоянного тока в двигательном и тормозных режимах работы, а также способы их пуска и регулирования скорости.

**Основные требования к электроприводам станков.** При обработке деталей на металлорежущих станках требуется сохранять заданные скорости резания и подачи. Отклонение от выбранного режима резания приводит к ухудшению качества обработки или уменьшению производительности труда. Поэтому электропривод станка должен сохранять примерное постоянство скорости при изменениях нагрузки, вызванных колебаниями припуска. Этому требованию удовлетворяют электродвигатели с достаточно жесткими механическими характеристиками.

Нужная скорость резания станка обеспечивается совместно электродвигателем и кинематической цепью станка. Если требуемая частота вращения шпинделя станка, например шлифовального, достаточно велика (1000...3000 об/мин), то вал электродвигателя можно связать непосредственно со шпинделем. А если же нужна низкая частота вращения шпинделя, то применять электродвигатель с пониженной номинальной частотой вращения нецелесообразно, так как при этом масса электродвигателя возрастает примерно обратно пропорционально номинальной частоте его вращения при той же мощности. Возрастают размеры и стоимость электродвигателя. Такой привод становится конструктивно и экономически неприемлемым. Поэтому, как показал опыт, в станкостроении целесообразно использовать электродвигатели с относительно высокой номинальной частотой вращения (1000...3000 об/мин) и механическими передачами для последующего понижения частоты вращения до нужного значения.

При небольшой частоте вращения шпинделя электродвигатель может иметь различные номинальные частоты вращения. Чем

быстроходнее двигатель, тем он меньше по габаритам и дешевле, но тем сложнее механическая передача от двигателя к рабочему органу станка. Лучшее решение выбирают из экономического сравнения возможных вариантов. Это относится и к приводам подачи и вспомогательных перемещений. Но в отдельных случаях в станкостроении применяют и тихоходные электродвигатели специальной конструкции для повышения жесткости передачи или упрощения конструкции.

При необходимости обработки с различными скоростями резания применяют регулируемый электропривод, коробки передач или их сочетания в зависимости от результатов экономического анализа различных вариантов.

В некоторых случаях (электрокопировальные станки) большое значение приобретают *динамические свойства привода*: быстродействие, способность мгновенно изменять частоту вращения и др.

У *приводов вспомогательных перемещений* основную нагрузку составляет момент от сил трения, при этом коэффициент трения при покое значительно больше, чем во время движения. Поэтому электропривод должен обеспечивать достаточно большой начальный (пусковой) момент. У некоторых приводов вспомогательных перемещений и приводов подачи нагрузка кроме сил трения создается при подъеме и массой подвижных узлов станка. Электродвигатели станков должны быть достаточно дешевыми, долговечными и надежными в работе.

**Механические характеристики асинхронных электродвигателей.** Асинхронные электродвигатели нашли широкое применение в промышленности благодаря простоте конструкции, надежности и экономичности в эксплуатации, минимальной стоимости и возможности питания от электрической сети переменного тока.

Схема асинхронного электродвигателя с *короткозамкнутым ротором* приведена на рис. 5.1, а, с *фазным ротором* – на рис. 5.1, в, а соответствующие им механические характеристики в двигательном режиме на рис. – 5.1, б и г.

а

б

в

г

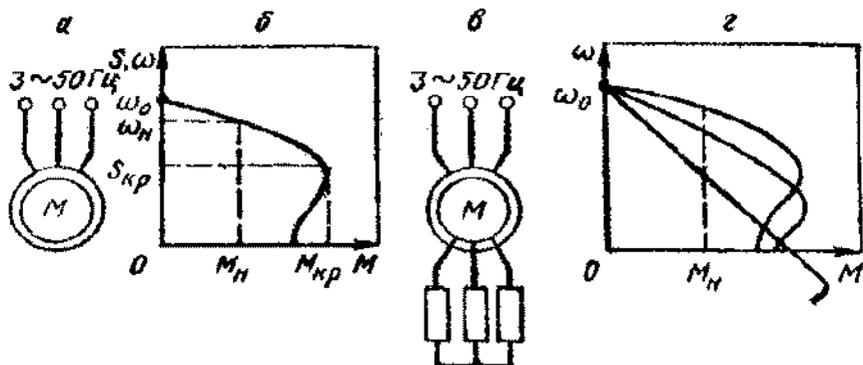


Рис. 5.1. Схемы и механические характеристики асинхронных двигателей

Вращающий момент  $M$  (Н·м) на валу двигателя, угловая скорость  $\omega$  (рад/с), частота вращения  $n$  (об/мин) его вала и мощность  $P$  (Вт), развиваемые двигателем, связаны известными соотношениями

$$P = M \omega; \quad \omega = \pi n / 30.$$

Угловая скорость  $\omega_0$  и частота вращения  $n_0$  магнитного поля статора, называемые **синхронными**, будут:

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p;$$

$$n_0 = 60 f_1 / p,$$

где  $f_1$ ,  $p$  – соответственно частота сети и число пар полюсов.

**Принцип действия асинхронного электродвигателя** заключается в следующем. Трехфазный ток, протекающий по обмотке статора, создает вращающееся магнитное поле с частотой вращения  $n_0$  (или угловой скоростью  $\omega_0$ ). Это поле, пересекая обмотки статора и ротора, индуцирует в них ЭДС. ЭДС статора и падение напряжения в обмотке статора уравнивают приложенное напряжение питающей сети. ЭДС ротора создает в замкнутых проводниках ротора ток, который взаимодействует с полем статора и приводит к созданию электромагнитного момента

$M_s$ , действующего по направлению вращения поля и приводящего во вращение ротор (если  $M_s$  больше  $M_c$ ).

Особенностью асинхронного двигателя является отставание ротора от магнитного поля статора, которое выражается скольжением:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad \text{или} \quad s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot 100 \% .$$

Наибольшую мощность  $P_n$ , с которой может работать двигатель в нормальном для него режиме, называют **номинальной мощностью**. Соответствующие этой мощности значения тока  $I_n$ , частоты вращения  $n_n$ , скольжения  $S_n$  называют **номинальными значениями** данных величин. Номинальное скольжение асинхронного двигателя составляет 1,5...7 % (меньшие значения относятся к двигателям большей мощности).

Электромагнитный вращающий момент асинхронного двигателя, как и любой электрической машины, пропорционален магнитному потоку  $\Phi$  и активной составляющей вторичного тока (тока ротора)

$$M = k\Phi I_2 \cos\varphi_2,$$

где  $k$  – конструктивный коэффициент.

Скольжение  $s_k$ , при котором момент двигателя имеет максимальное (критическое) значение, называется **критическим**:

$$s_k \approx R_2' / X_k,$$

где  $R_2'$  – активное сопротивление фазы ротора, приведенное к частоте и напряжению статора;

$X_k$  – индуктивное сопротивления цепи короткого замыкания ( $X_k = X_1 + X_2'$ ).

Величина критического момента  $M_k$  определяет перегрузочную способность электродвигателя. У асинхронных короткозамкнутых электродвигателей нормального исполнения кратность критического момента  $\lambda_k = M_k / M_n = 1,8...2,5$ , у двигателей

краново-метал-лургической серии  $\lambda_{\text{к}} = 2...3,5$ . Величина критического момента пропорциональна квадрату напряжения в сети  $U_1$ :

$$M_{\text{к}} = 3U_1^2 / (2\omega_0 X_{\text{к}}).$$

В сетях промышленных предприятий напряжение может изменяться, например, при пуске мощных двигателей, при ударных нагрузках, характерных для прокатных станов. Поэтому наибольшая допустимая перегрузка с учетом возможности снижения напряжения в сети на 10 % принимается  $\lambda = 0,9^2 \lambda_{\text{к}}$ .

Уравнение механической характеристики асинхронного электродвигателя имеет вид (упрощенная формула Клосса)

$$M = 2M_{\text{к}} / (s/s_{\text{к}} + s_{\text{к}}/s). \quad (5.1)$$

По данной формуле, зная значения  $M_{\text{к}}$  и  $s_{\text{к}}$ , можно рассчитать соответствующие значения момента  $M$  для разных положительных и отрицательных значений  $s$  (в том числе и значений  $s < 1$ ), а затем построить по ним механическую характеристику.

В каталогах обычно приводят следующие технические данные асинхронного двигателя:  $P_{\text{н}}$  (кВт),  $n$  и  $n_0$  (об/мин),  $\lambda_{\text{к}}$  и  $\lambda_{\text{п}} = M_{\text{п}} / M_{\text{н}}$  ( $M_{\text{п}}$  – пусковой момент). По этим данным можно определить значения всех величин, необходимых для расчета и определения механических характеристик по (5.1), из выражений  $\omega_{\text{н}} = \pi n_{\text{н}} / 30$ ,

$$\omega_0 = \pi n_0 / 30, \quad M_{\text{н}} = P_{\text{н}} / \omega_{\text{н}}; \quad M_{\text{к}} = \lambda_{\text{к}} M_{\text{н}}; \quad s_{\text{н}} = \frac{n_0 - n_{\text{н}}}{n_0}; \quad s_{\text{к}} = s_{\text{н}} (\lambda_{\text{к}} + \sqrt{\lambda_{\text{к}}^2 - 1}).$$

Из рис. 5.1 видно, что верхний (рабочий) участок естественной механической характеристики обладает большой жесткостью  $\beta$  ( $\beta = dM/ds$ ). Увеличение сопротивления в цепи ротора (рис. 5.1, з) приводит к увеличению критического скольжения  $s_{\text{к}}$ , а критический момент  $M_{\text{к}}$  остается неизменным, т. е. жесткость искусственных

механических характеристик уменьшается с увеличением активного сопротивления в цепи ротора.

Активное сопротивление фазы обмотки ротора можно определить по формуле

$$R_2 = \frac{E_{2H} s_H}{\sqrt{3} I_{2H}},$$

где  $E_{2H}$ ,  $I_{2H}$  – соответственно фазная ЭДС и номинальный ток обмотки ротора (находят по каталогу).

**Пример.** Рассчитать естественную механическую характеристику асинхронного короткозамкнутого двигателя типа А2-72-4 с  $P_H = 30$  кВт;  $U_H = 380$  В;  $n_H = 1460$  об/мин;  $\lambda_K = 2$ .

### Решение

1.  $M_H = P_H / \omega_H = P_H / (\pi n_H / 30) = 30000 / (\pi \cdot 1460 / 30) = 205$  Н·м;
2.  $M_K = \lambda_K M_H = 2 \cdot 205 = 410$  Н·м;
3.  $s_H = (n_0 - n_H) / n_0 = (1500 - 1460) / 1500 = 0,0266$ ;
4.  $S_K = S_H (\lambda_K + \sqrt{\lambda_K^2 - 1}) = 0,0266 (2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0,1$ ;
5. Уравнение механической характеристики

$$M = 2M_K / (s/s_K + s_K/s) = 820 / (s/0,1 + 0,1/s);$$

6. Задаваясь значениями  $s$  для двигательного режима от 0 до 1, рассчитываем соответствующие им значения момента  $M$  (табл. 5.1) и строим характеристику (рис. 5.2).

Таблица 5.1

$s$	0	0,026	0,04	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$n$ , об/мин	1500	1460	1440	1350	1200	900	600	300	0
$M$ , Н·м	0	205	324	410	328	206	138	106	82

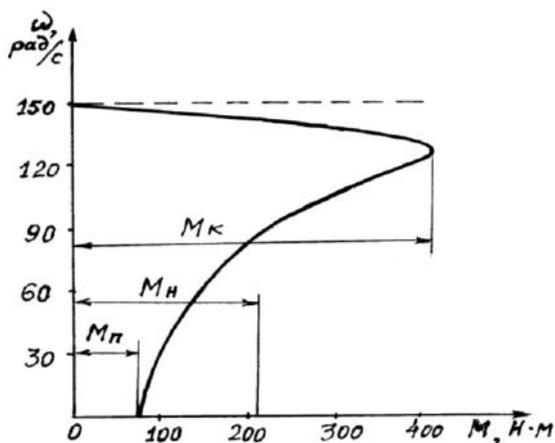


Рис. 5.2. Естественная механическая характеристика АД

Асинхронный двигатель может работать во всех **трех** известных тормозных режимах.

**Рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть** можно получить, если к валу асинхронного двигателя, подключенного к сети, приложить добавочный момент по направлению вращения такой величины, чтобы ротор стал вращаться со скоростью выше синхронной ( $\omega > \omega_0$ ). При этом скольжение будет отрицательным  $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0 < 0$ . В данном случае относительное движение проводников ротора в поле статора по сравнению с двигательным режимом изменится на обратное. Следовательно, изменится направление ЭДС в проводниках ротора и соответственно ток ротора, который, взаимодействуя с полем статора, создает электромагнитный момент и будет выполнять роль тормоза. Вырабатываемая при этом активная электрическая энергия в обмотке статора поступает в сеть. Такой режим торможения можно получить, например, в подъемных установках при опускании тяжелых грузов, в эскалаторах метро при спуске с большим количеством пассажиров и других установках с активным статическим моментом на валу электродвигателя. Активная мощность к тому же изменяет знак, т.е. электрическая машина работает генератором, преобразуя кинетическую энергию от активного момента (опускающегося груза и др.) в электрическую и отдавая ее в сеть. Переход работы из

двигательного режима в генераторный происходит автоматически, поэтому механические характеристики являются продолжением характеристик двигательного режима и располагаются во II и IV квадратах (рис. 5.3, линии с двумя засечками).

В режиме *торможения противовключением* ротор вращается в сторону, противоположную направлению вращения магнитного поля статора, скольжение становится больше единицы:

$$S = [\omega_0 - (-\omega)] / \omega_0 = 1 + \omega / \omega_0$$

и ток ротора превышает ток короткого замыкания.

Для ограничения величины тока в цепь ротора вводят ступень реостата. Механические характеристики в данном режиме торможения являются продолжением характеристик двигательного режима (при  $s > 1$  или  $\omega < 0$ ) и располагаются во II и IV квадратах (рис. 5.3, линии с четырьмя засечками). Таким образом, ротор двигателя, включенного на подъем, вращается в противоположную сторону, так как в цепь ротора введено большое сопротивление и момент электродвигателя достигает момента сопротивления лишь при отрицательном скольжении (на рис. 5.3, точка *Б*). Такой режим часто используется в металлургических кранах при спуске грузов в тормозном режиме.

Торможение *противовключением* может осуществляться реверсом магнитного поля статора (переменой мест двух фаз статора). Одновременно в цепь ротора вводится ступень реостата, ограничивающая ток и увеличивающая тормозной момент. На рис. 5.3 показан график перехода асинхронного двигателя с фазным ротором в режиме торможения *противовключением*. В точке 1 двигательного режима осуществляется реверс и двигатель переходит на работу в точку 2, по линии 2–3 осуществляется интенсивное торможение *противовключением*. В точке 3 двигатель останавливается и его необходимо отключить от сети, иначе он начнет вращаться в противоположном направлении.

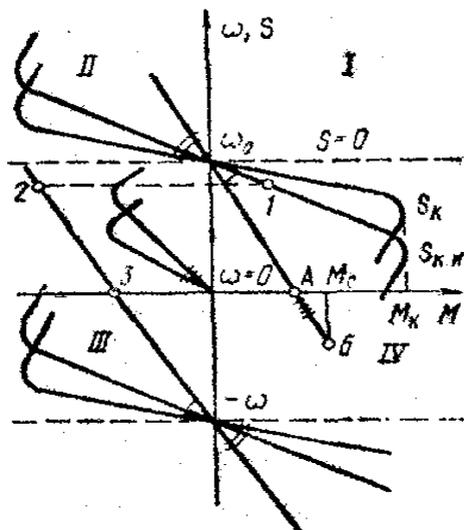


Рис. 5.3. Совмещенные механические характеристики асинхронной машины

В режиме *динамического торможения* двигатель отключают от сети переменного тока и две фазы обмотки статора подключают к источнику постоянного тока. В статоре создается неподвижное в пространстве магнитное поле, которое индуцирует в обмотках вращающегося ротора ток. Взаимодействие его с неподвижным полем статора создает тормозной момент. На рис. 5.3 показаны механические характеристики в этом режиме при различных значениях сопротивления цепи ротора (линии с тремя засечками).

На рис. 5.4 представлена схема осуществления динамического торможения с самовозбуждением, когда для возбуждения используется выпрямленное напряжение обмотки ротора. Условие самовозбуждения наступает лишь при определенном граничном значении угловой скорости  $\omega_{гр}$ , которое зависит от суммарного сопротивления фазы ротора. Таким образом, в интервале от 0 до  $\omega_{гр}$  условие самовозбуждения отсутствует, а механическая характеристика (рис. 2.4, б) совпадает с осью ординат. При  $\omega = \omega_{гр}$  двигатель само-возбуждается и его момент быстро увеличивается

до значения, определяемого моментом нагрузки на валу. Увеличение сопротивления роторной цепи приводит к возрастанию  $\omega_{гр}$  (рис. 5.4, кривая 2). Механические характеристики имеют достаточно высокую жесткость, что позволяет получать низкие устойчивые скорости спуска грузов. Достоинством этого режима торможения является экономичность, поскольку при спуске груза энергия из сети не потребляется.

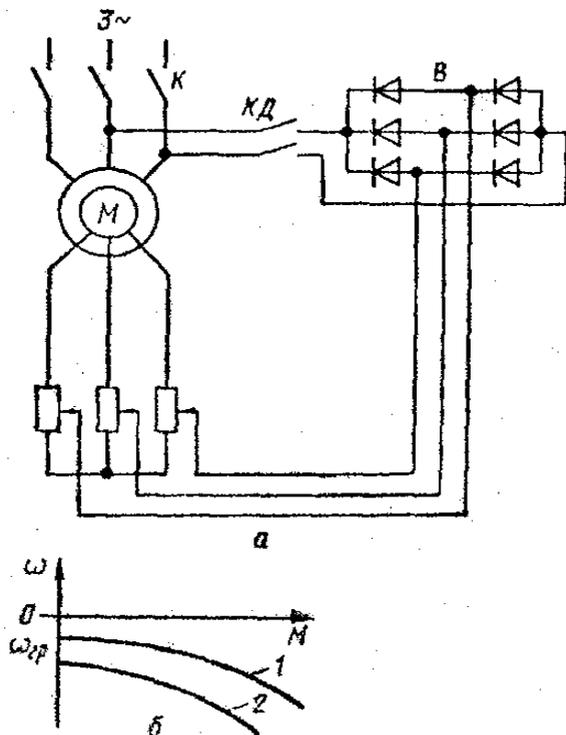


Рис. 5.4. Схема (а) и механические характеристики (б) асинхронного двигателя при динамическом торможении с самовозбуждением

**Пуск асинхронных электродвигателей.** Для ограничения бросков тока и повышения пускового момента пуск электродвигателей, особенно средней и большой мощности, осуществляется через специальное пусковое устройство. Простейшее из них – пусковой реостат, секции которого изготовлены из стали, чугуна,

хрома, фехралья и других сплавов с повышенным сопротивлением. По мере разгона двигателя реостат выводится ступенями.

В случае если питающая сеть недостаточно мощная, применяется пуск асинхронных двигателей при пониженном напряжении с помощью реактора  $L$  или автотрансформатора (рис. 5.5). При реакторном пуске сначала замыкается линейный контактор КМ1, а после разгона двигателя – контактор КМ2, а КМ1 отключается. При автотрансформаторном пуске сначала включаются контакторы КМ1 и КМ3, а после разгона двигателя КМ1 и КМ3 отключаются, а контактор КМ2 включает двигатель на полное напряжение сети.

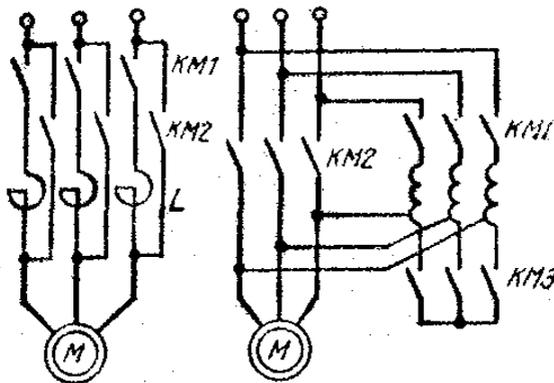


Рис. 5.5. Схемы пуска при пониженном напряжении

**Регулирование скорости асинхронных электродвигателей.** Способы регулирования скорости асинхронного электропривода определяются из анализа уравнения механической характеристики асинхронного двигателя:

$$M = 3(U_{\phi})^2 R_{2\Sigma} / [\omega_0 s (R_1 + R_{2\Sigma}/s)^2 + X_{\kappa}^2]$$

и формулы угловой скорости вращения поля статора

$$\omega_0 = 2 \pi f_1 / p,$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение сети;

$R_{2\Sigma}$  – приведенное к статору сопротивление роторной цепи;

$R_1$  – сопротивление обмотки статора;

$f_1$  – частота сети;

$p$  – число пар полюсов;

$s$  – скольжение;

$X_k$  – реактивное сопротивление короткого замыкания.

Изменением числа пар полюсов обеспечивается ступенчатое регулирование синхронной угловой скорости двигателя  $\omega_0$ . Такой способ регулирования скорости может быть реализован только при использовании специальных АД, получивших название *многоскоростных*. Особенность этих АД состоит в том, что их каждая фаза статорной обмотки имеет две одинаковые секции (полуобмотки). За счет разных схем их соединения можно изменять число пар полюсов  $p$  АД. Ротор многоскоростных АД обычно выполняется короткозамкнутым.

Так как число пар полюсов АД может принимать только дискретные значения ( $p = 1, 2, 3, 4, \dots$ ), то и скорость АД этим способом может регулироваться лишь ступенчато.

Наиболее часто на практике применяются две схемы переключения статорной обмотки многоскоростных АД: с треугольника на двойную звезду и со звезды на двойную звезду. Схема, в которой фазы статорной обмотки образованы двумя параллельно включенными секциями, получила название двойной звезды. Схему переключения «звезда – двойная звезда» целесообразно применять при постоянном моменте нагрузки  $M_c$ , а схему «треугольник – двойная звезда» – при нагрузке, имеющей характер постоянной мощности. Помимо двухскоростных АД применяются также трех- и четырех-скоростные. Первые из них кроме переключаемой обмотки статора имеют также и одну непереклюкаемую обмотку. Четырехскоростные АД имеют две переключаемые обмотки статора с различным числом пар полюсов.

Рассматриваемый способ регулирования скорости АД характеризуется рядом положительных показателей, что определяет широкое его применение в регулируемом электроприводе переменного тока. К ним прежде всего следует отнести экономичность, так как регулирование скорости не сопровождается выделением в роторной цепи дополнительных потерь энергии, вызывающих излишний нагрев АД и ухудшающих его КПД.

Недостатком способа является ступенчатость изменения скорости двигателя и относительно небольшой диапазон ее регулирования, не превышающий обычно 6...8.

При регулировании скорости *введением реостата в цепь ротора* вся энергия скольжения выделяется в виде потерь в цепи двигателя. Недостатки способа: уменьшение стабильности скорости при ее снижении, ступенчатость и относительно малый диапазон регулирования (2 : 1). Данный метод нашел широкое применение в металлургических кранах из-за простоты и малой стоимости применяемой аппаратуры.

Благодаря разработке и внедрению надежных тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) стало широко применяться *частотное управление* асинхронными электроприводами. Достоинства метода: регулирование производится при малых потерях скольжения, плавное регулирование скорости, возможность применения асинхронных короткозамкнутых двигателей, диапазон регулирования до 100 : 1.

Регулирование скорости асинхронного привода *изменением питающего напряжения* осуществляется путем включения по встречно-параллельной схеме в каждую фазу статора двух тиристоров (рис. 5.6, а). Изменяя угол регулирования тиристоров, можно плавно регулировать величину подводимого к статору напряжения. При этом снижается критический момент двигателя и увеличивается наклон механических характеристик, так как вращающий момент двигателя пропорционален квадрату напряжения фазы статора (рис. 5.6, б). Практически этот метод регулирования находит применение лишь для двигателей с фазным ротором в замкнутых системах управления с тиристорными регуляторами напряжения.

**Электромеханические свойства синхронных двигателей.** Синхронные двигатели в основном применяются в приводах средней и большой мощности, когда режим работы длительный и не требуется регулирования скорости: воздуходувки, компрессоры, вентиляторы, насосы, дробилки, мельницы, приводы черновых клетей прокатных станов и др. Достоинства двигателей: простота конструкции, надежность, высокие значения  $\cos\varphi$  и КПД, возможность ра-боты с  $\cos\varphi = 1$  и даже с опережающим током, что

позволяет осуществлять компенсацию реактивной мощности других электроприемников сети.

Схема синхронного двигателя приведена на рис. 5.7. На роторе расположены две обмотки: короткозамкнутая (пусковая) ОП и возбуждения постоянного тока ОВ. Обмотка возбуждения двигателя при пуске замыкается на разрядный резистор  $R_p$ , который предохраняет ее от пробоя. При скорости, близкой к синхронной ( $\omega \geq 0,95\omega_0$ ), обмотка возбуждения автоматически подключается к источнику постоянного тока на полное напряжение (контакты КМ замыкаются). При этом двигатель входит в синхронизм. Для нормального вхождения в синхронизм необходимо, чтобы входной момент был больше статического момента на валу:  $M_{вх} > M_c$ .

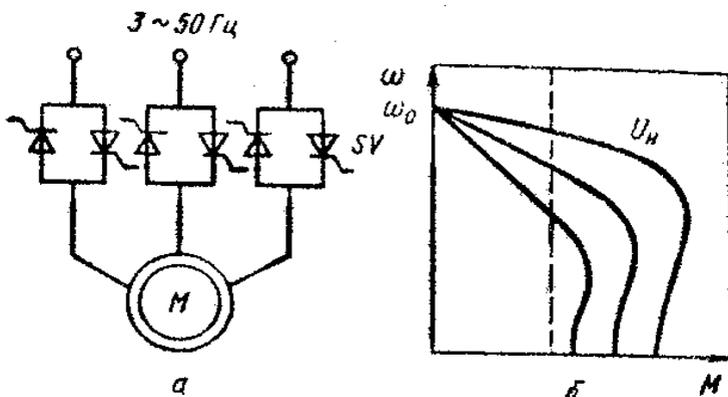


Рис. 5.6. Бесконтактное регулирование напряжения асинхронного двигателя

Механическая характеристика синхронного двигателя абсолютно жесткая и представляет собой прямую, параллельную оси моментов, т.е. скорость двигателя независимо от нагрузки остается постоянной и равной скорости вращения магнитного поля статора. При увеличении нагрузки на валу электродвигателя возрастает лишь угол сдвига ( $\theta$ ) оси полюсов ротора относительно полюсов вращающегося поля статора (или угол сдвига вектора напряжения статора относительно вектора ЭДС, индуцированной в обмотке статора полем ротора). Зависимость момента двигателя  $M$  от угла  $\theta$

называется *угловой характеристикой синхронного двигателя*, которая представляет собой синусоиду:  $M = M_{\max} \sin\theta$ .

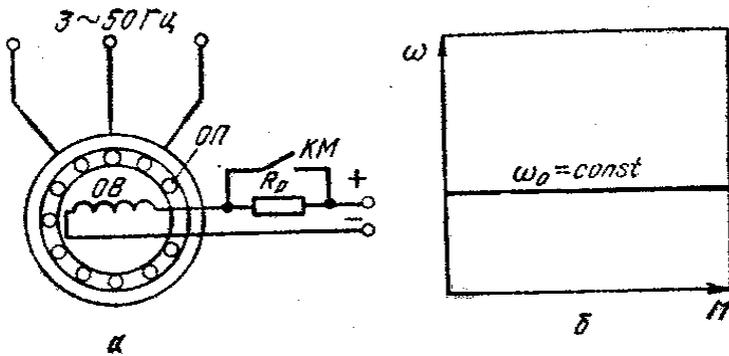


Рис. 5.7. Схема синхронного двигателя

При холостом ходе оси полюсов ротора и поля статора совпадают ( $\theta = 0$  и  $M = 0$ ). При увеличении нагрузки угол возрастает, соответственно возрастает и момент электродвигателя  $M$ . При дальнейшем увеличении нагрузки ( $\theta > 90^\circ$ ) момент  $M$  начнет уменьшаться, что соответствует выпадению электродвигателя из синхронизма и его остановке. Номинальной нагрузке на валу соответствует угол  $\theta = 20...30^\circ$ . Поэтому перегрузочная способность синхронного двигателя  $\lambda_k = M_{\max} / M_n = 2-3$ .

Максимальный момент  $M_{\max}$  пропорционален фазному напряжению сети и току в обмотке возбуждения. Поэтому перегрузочная способность синхронного двигателя может быть повышена путем увеличения тока возбуждения, что позволяет обеспечить устойчивую работу двигателя при значительных толчках нагрузки и колебаниях напряжения сети. Синхронный двигатель менее чувствителен к колебаниям напряжения сети, чем асинхронный, так как его момент пропорционален первой степени напряжения.

Для синхронного двигателя принципиально возможны все три способа торможения – рекуперативное, динамическое и противовключением. Практически используется только

*динамическое тормо-жение.* Рекуперативное торможение не применяется, так как нельзя получить снижения скорости без применения преобразователя частоты. В режиме противовключения электродвигатель, работая в асинхронном режиме, потребляет из сети большой ток, а так как его пусковая (асинхронная) обмотка рассчитана на кратковременную работу и длительное протекание по ней больших токов недопустимо, такое торможение нежелательно.

При динамическом торможении возбуждение синхронного двигателя сохраняется, а обмотка статора отключается от сети и замыкается на тормозной резистор. Его механические характеристики в этом режиме подобны характеристикам асинхронного двигателя при динамическом торможении.

Особенностью синхронного двигателя является то, что путем изменения тока возбуждения можно регулировать потребляемую из сети реактивную мощность. В процессе изменения тока возбуждения вектор тока двигателя может совпадать с вектором напряжения сети, отставать от него или опережать. В случае совпадения данных векторов двигатель потребляет из сети только активную мощность ( $\cos\varphi = 1$ ). Когда вектор тока двигателя опережает вектор напряжения сети, двигатель отдает в сеть реактивную мощность. Это свойство синхронного двигателя широко используют для компенсации реактивных нагрузок цехов или всего завода. В данном случае синхронный двигатель выполняет кроме основной функции также и функцию синхронного компенсатора, что дает большой экономический эффект.

## **Лекция 6. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Электродвигатели постоянного тока могут иметь независимое, параллельное, последовательное или смешанное возбуждение (рис. 6.1).

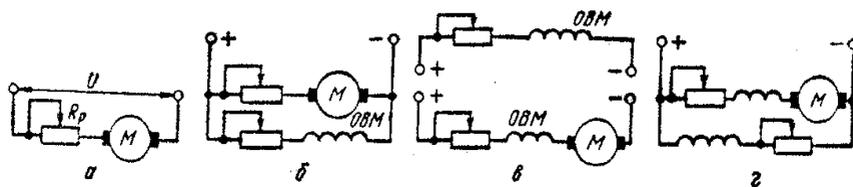


Рис. 6.1. Схемы электродвигателей постоянного тока независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения (верхняя часть схемы «в» принадлежит схеме «а»)

В электродвигателе параллельного возбуждения обмотка возбуждения присоединяется параллельно к зажимам якоря. Но ток, протекающий по этой обмотке, в отличие от тока якоря не зависит от нагрузки и определяется приложенным к якору напряжением и общим сопротивлением цепи возбуждения. По этой причине электродвигатель параллельного возбуждения называют также электродвигателем с независимым возбуждением.

Вращающий момент  $M$  двигателя постоянного тока и его ЭДС  $E$  определяются по формулам

$$M = k \Phi I_{\text{я}}; \quad E = k\Phi\omega,$$

где  $k$  – конструктивный коэффициент двигателя;

$\Phi$  – магнитный поток, Вб;

$I_{\text{я}}$  – ток якоря, А.

$\omega$  – угловая скорость, рад/с.

Уравнения электромеханической  $\omega = f(I_{\text{я}})$  и механической  $\omega = f(M)$  характеристик имеют вид

$$\omega = U/(k\Phi) - (R_{\text{я}} + R_{\text{р}}) / (k \Phi) I_{\text{я}}; \tag{6.1}$$

$$\omega = U/(k\Phi) - (R_{\text{я}} + R_{\text{р}}) / (k^2 \Phi^2) M.$$

Угловая скорость идеального холостого хода (при  $I_{\text{я}} = 0$  или  $M = 0$ )

$$\omega_0 = U/(k\Phi).$$

На рис. 6.2 представлены механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) во всех режимах работы. Характерными точками характеристик в двигательном режиме являются: точка идеального холостого хода ( $\omega_0, M = 0$ ); точка номинального режима ( $\omega_{\text{н}}, M_{\text{н}}$ ); точка короткого замыкания ( $\omega = 0, M = M_{\text{к}}$ ).



Так как механические характеристики ДПТ НВ прямолинейны, для их построения достаточно иметь две точки:

- 1)  $\omega = \omega_0$  и  $M = 0$ ,
- 2)  $\omega = \omega_n$  (или  $\omega = \omega_{н,р}$ ) и  $M = M_n$ .

Для ДПТ НВ возможны следующие три режима электрического торможения.

1. **Рекуперативное торможение**, которое происходит, когда скорость двигателя выше скорости идеального холостого хода. Оно является наиболее экономичным, поскольку энергия торможения передается в электрическую сеть. Механические характеристики в этом режиме являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима во II квадранте. Схема двигателя при рекуперативном торможении не изменяется.

2. **Динамическое торможение**. Якорь двигателя отключается от сети и замыкается на сопротивление. При этом механическая энергия движущихся частей (механизма и якоря двигателя) преобразуется в электрическую, которая теряется в виде тепловой энергии

в сопротивлениях якорной цепи. Механические характеристики в данном режиме торможения проходят через начало координат (на рис. 6.2 – линии с тремя засечками).

3. **Торможение противовключением** осуществляется двумя способами:

1) *введением большого сопротивления в цепь якоря*. При этом вращающий момент двигателя становится меньше, чем статический момент нагрузки  $M_c$ . Двигатель останавливается (в точке А), а затем под действием момента  $M_c$  начинает вращаться в другом направлении, развивая тормозной момент; в точке Б наступает установившийся режим. Механические характеристики являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима (на рис. 6.2 – линии с четырьмя засечками);

2) *торможение переключением полярности обмотки якоря по ходу*. Двигатель, работающий в точке 1, после переключения перейдет на реостатную характеристику в точку 2. По линии 2–3 происходит торможение (линия с пятью засечками). В точке 3 двигатель останавливается и его следует отключить от сети, чтобы

избежать перехода в двигательный режим с вращением в обратном направлении.

В двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением ток якоря одновременно является и током возбуждения. Магнитный поток возбуждения растет с увеличением нагрузки, вследствие чего угловая скорость снижается согласно уравнению (6.1) и механическая характеристика двигателя будет мягкой (рис. 6.3). Благодаря этому ДПТ НВ сравнительно легко и плавно преодолевает перегрузки и имеет высокий пусковой момент. Данные свойства двигателя позволяют широко применять его в приводе транспортных механизмов. Механические характеристики двигателя значительно смягчаются при введении в цепь якоря реостата (рис. 6.3, линии с одной засечкой).

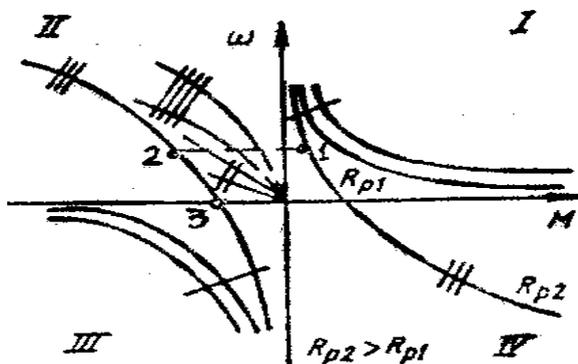


Рис. 6.3. Механические характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

У ДПТ ПВ нельзя осуществить режим рекуперативного торможения, поскольку в нем отсутствует скорость идеального холостого хода.

**Динамическое торможение** может осуществляться по схеме с самовозбуждением и с независимым возбуждением. В первом случае якорь и обмотка возбуждения отключаются от сети и замыкаются на реостат. Чтобы избежать размагничивания машины, необходимо переключить обмотку возбуждения (или якорь) таким образом, чтобы направление тока в обмотке возбуждения не изменилось. В

этом случае машина самовозбуждается при данном сопротивлении цепи якоря лишь при определенном значении угловой скорости; возбуждись, она создает тормозной момент. Механические характеристики нелинейны (на рис. 6.3 – кривые с четырьмя засечками).

Механические характеристики двигателя в режиме динамического торможения с независимым возбуждением аналогичны соответствующим характеристикам двигателя с независимым возбуждением (на рис. 6.3 – линии с двумя засечками). Такой способ торможения нашел широкое применение, а первый способ используют редко, в основном как аварийный, например, при исчезновении напряжения сети.

Торможение противовключением осуществляется, как у ДПТ НВ, двумя способами:

- 1) включением в цепь якоря большого сопротивления;
- 2) изменением полярности обмотки якоря, оставив направление тока в обмотке возбуждения без изменения.

При первом способе механическая характеристика будет продолжением характеристики, соответствующей двигательному режиму (на рис. 6.3 – линия с тремя засечками). При втором способе торможение осуществляется по линии 1–2–3.

### **Регулирование скорости электроприводов постоянного тока.**

Скорость ДПТ НВ можно регулировать:

- 1) путем изменения сопротивления в цепи якоря;
- 2) изменением потока возбуждения;
- 3) изменением напряжения, подводимого к якорю.

Регулирование *по первому способу* имеет существенно недостатки:

– уменьшается жесткость механических характеристик при снижении угловой скорости, а потери мощности в главной цепи воз-растают;

– диапазон регулирования ограничен, особенно при малых нагрузках;

– невелики плавность и точность регулирования.

По этим причинам такой способ регулирования в приводе постоянного тока используется редко.

По *второму способу* можно регулировать магнитный поток только в сторону уменьшения (так как в номинальном режиме магнитная цепь двигателя насыщена), что соответствует

увеличению скорости выше номинальной. Возможный диапазон регулирования скорости при этом не превышает 2 для двигателя нормального исполнения. Верхний предел скорости ограничивается механической прочностью элементов якоря двигателя – бандажей обмотки якоря, коллектора.

Основным способом регулирования скорости ДПТ НВ является способ, основанный на изменении подводимого к якорю напряжения, которое осуществляется с помощью специального регулируемого преобразователя. В качестве индивидуальных источников питания используют в основном тиристорные преобразователи. Жесткость механических характеристик привода по системе «преобразователь – ДПТ НВ» практически постоянна. Механические характеристики представляют собой семейство параллельных друг другу прямых. Диапазон, плавность, точность регулирования здесь выше, чем при других способах регулирования. Поэтому данная система привода применяется для механизмов, требующих глубокого и плавного регулирования скорости.

**Расчет добавочных резисторов в цепи якоря ДПТ НВ.** Если известна естественная электромеханическая или механическая характеристика 1 двигателя (рис. 6.4) и его паспортные данные, то расчет сопротивления  $R_d$ , при включении которого в цепь якоря желаемая искусственная характеристика 2 пройдет через точку А с заданными координатами  $\omega_i$ ,  $I_i$  или  $\omega_i$ ,  $M_i$ , можно выполнить следующими наиболее распространенными методами.

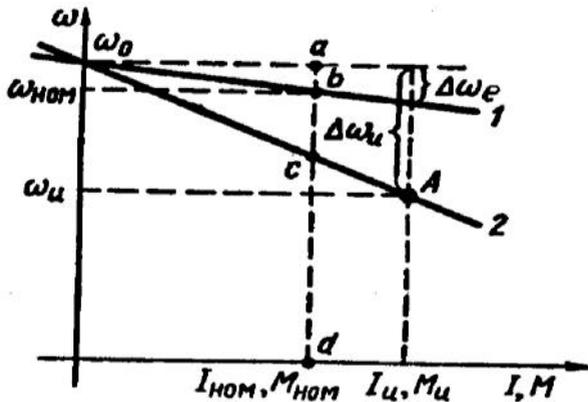


Рис. 6.4. Характеристики ДПТ НВ для расчета величины регулировочных резисторов

**Метод пропорций.** Запишем отношение перепадов скорости при токе  $I_{и}$  или моменте  $M_{и}$  на естественной  $\Delta\omega_e$  и желаемой искусственной  $\Delta\omega_{и}$  характеристиках:

$$\Delta\omega_e / \Delta\omega_{и} = I_{и} R_{я} / (I_{и} (R_{я} + R_{д})) = R_{я} / (R_{я} + R_{д}).$$

Тогда искомая величина

$$R_{д} = R_{я} (\Delta\omega_{и} / \Delta\omega_e - 1).$$

**Метод отрезков** не требует знания значения собственного сопротивления двигателя  $R_{я}$  (более того, его значение можно определить по известной естественной характеристике).

Запишем выражение для скорости двигателя на заданной искусственной характеристике (см. рис. 6.4) при номинальных токе  $I_{н}$ , моменте  $M_{н}$ , магнитном потоке  $\Phi_{н}$  и напряжении  $U_{н}$ :

$$\omega_{и} = U_{н} / (k\Phi_{н}) (1 - I_{н} R / U_{н}),$$

где  $U_{н} / (k\Phi_{н}) = \omega_0$ .

Тогда

$$\omega_{и} = \omega_0 (1 - R / R_{н}).$$

Здесь  $R_n = U_n / I_n$  – так называемое номинальное сопротивление, являющееся базовой величиной при расчетах, Ом.

Соотношение

$$R / U_n = (\omega_0 - \omega_n) / \omega_0 = \delta$$

отражает важное свойство ДПТ НВ: относительный перепад скорости  $\delta = \Delta\omega / \omega_0$  равен относительному активному сопротивлению цепи якоря  $R / R_n$ .

Обозначим на рис. 6.4 характерные точки  $a, b, c, d$  и отметим, что  $\omega_0 - \omega_n = \Delta\omega = ac$ ,  $\omega_0 = ad$ . Тогда  $R = R_n \Delta\omega / \omega_0 = R_n ac / ad$ ;  $R_d = R_n bc / ad$ ;  $R_y = R_n ab / ad$ .

Таким образом, для нахождения  $R_d$  необходимо сначала по характеристикам определить длины отрезков  $bc$  и  $ad$  при номинальном токе или моменте и рассчитать номинальное сопротивление

$$R_n = U_n / I_n.$$

Расчет добавочных резисторов можно выполнить также по следующим формулам для заданного допустимого тока  $I_{доп}$ , который определяется величиной допустимого момента  $M_{доп}$  или условиями пуска, реверса и торможения.

Сопротивление резистора  $R_{д1}$  при пуске ( $E = 0$ )

$$R_{д1} = (U / I_{доп}) - R_y.$$

Сопротивление резистора  $R_{д2}$  при динамическом торможении

$$R_{д2} = (E / I_{доп}) - R_y \approx (U / I_{доп}) - R_y.$$

Сопротивление резистора  $R_{д3}$  при реверсе или торможении противовключением

$$R_{д3} = ((U + E) / I_{доп}) - R_y \approx (2U / I_{доп}) - R_y.$$

**Пример.** ДПТ НВ типа ПБСТ-53 имеет следующие паспортные данные:  $P_n = 4,8$  кВт;  $n_n = 1500$  об/мин;  $U_n = 220$  В;  $I_n = 24,2$  А;  $R_{\text{я}} = 0,38$  Ом;  $I_{\text{в.н}} = 0,8$  А. Требуется определить:

1) сопротивление резистора, включение которого в цепь якоря двигателя обеспечит прохождение искусственной механической характеристики через точку с координатами  $\omega_{\text{и}} = 90$  рад/с,  $M_n = 25$  Н·м;

2) сопротивления резисторов, включение которых ограничит ток при пуске и торможении противовключением до уровня  $I_{\text{доп}} = 3 I_n$ .

### **Решение**

1. Для нахождения сопротивления  $R_d$  используем метод пропорций, предварительно определив требуемые параметры двигателя:

$$\omega_n = 2\pi n_n / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1500 / 60 = 157 \text{ рад/с};$$

$$M_n = P_n / \omega_n = 4800 / 157 = 30,6 \text{ Н·м};$$

$$k\Phi_n = M_n / I_n = 30,6 / 24,2 = 1,3 \text{ В·с};$$

$$\omega_0 = U_n / k\Phi_n = 220 / 1,3 = 169 \text{ рад/с};$$

$$\Delta\omega_e = (M_n R_{\text{я}}) / (k\Phi_n)^2 = (25 \cdot 0,38) / 1,3^2 = 6 \text{ рад/с};$$

$$\Delta\omega_{\text{и}} = \omega_0 - \omega_{\text{и}} = 169 - 90 = 79 \text{ рад/с}.$$

Тогда искомое сопротивление резистора

$$R_d = R_{\text{я}} ((\Delta\omega_{\text{и}} / \Delta\omega_e) - 1) = 0,38 \cdot ((79/6) - 1) = 4,62 \text{ Ом}.$$

2. Сопротивление пускового резистора

$$R_{d1} = (U / I_{\text{доп}}) - R_{\text{я}} = (220 / 3 \cdot 24,2) - 0,38 = 2,65 \text{ Ом}.$$

Сопротивление резистора, используемого при торможении:

$$\begin{aligned} R_{d3} &= ((U + E) / I_{\text{доп}}) - R_{\text{я}} \approx (2U / I_{\text{доп}}) - R_{\text{я}} = \\ &= (2 \cdot 220 / 3 \cdot 24,2) - 0,38 = 5,7 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

### **Лекция 7. ТИРИСТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД**

## ПОСТОЯННОГО ТОКА

В промышленности широко применяется регулируемый тиристорный электропривод постоянного тока. Тиристоры – это самые мощные полупроводниковые приборы, используемые в силовых схемах электропривода. Они выпускаются на токи от нескольких килоампер при допустимом обратном напряжении до нескольких киловольт. С помощью тиристора, включенного в цепь переменного тока, можно не только выпрямлять напряжение, но и регулировать его величину.

Управление тиристором, т.е. включение, осуществляется с помощью управляющего электрода УЭ (рис. 7.1), на который в момент отпирания подаются отпирающие импульсы тока  $I_{отп}$  из схемы управления. При отсутствии отпирающего сигнала (вентиль заперт) сопротивление вентиля равно бесконечности, а при подаче на управляющий электрод отпирающего импульса  $I_{отп}$  его сопротивление падает до нуля (вентиль открывается). В точке естественной коммутации (точка  $a$  на рис. 7.1,  $a$ ) тиристор запирается. Запереть тиристор с помощью управляющего электрода невозможно, т.е. тиристор в отличие от транзистора является прибором полууправляемым.

С помощью фазосдвигающего устройства схемы управления можно изменять фазу (момент) подачи отпирающего импульса (рис. 7.1,  $z$ ) относительно точки естественной коммутации вентиля, т.е. можно изменять угол регулирования  $\alpha$ .

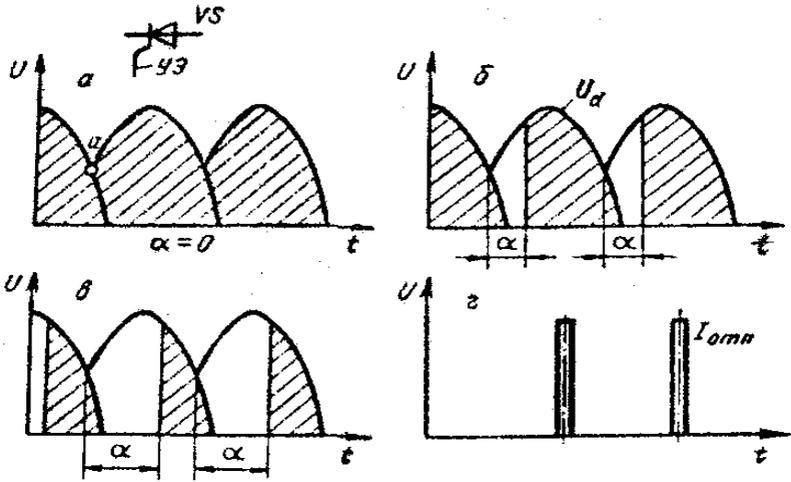


Рис. 2.12. Графики регулирования выходного напряжения тиристорного выпрямителя

Величина выпрямленного напряжения тиристорного преобразователя соответствует площади заштрихованного участка  $U(t)$  (рис. 7.1, а – в).

$$U_{d\alpha} = \sqrt{2} \, m / \pi \sin(\pi / m) U_2 \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha,$$

где  $m$  – число фаз выпрямления;

$U_2$  – действующее значение линейного напряжения питающего трансформатора;

$U_{d0}$  – максимальное выпрямленное напряжение преобразователя при полностью открытых тиристорах ( $\alpha = 0$ ):

$$U_{d0} = \sqrt{2} \, m / \pi \sin(\pi / m) U_2.$$

Таким образом, изменяя с помощью системы импульсно-фазового управления (СИФУ) угол регулирования  $\alpha$ , можно плавно и в широких пределах (от нуля до  $U_{d0}$ ) изменять величину выпрямленного напряжения и соответственно угловую скорость электродвигателя  $\omega$ .

Параметр  $m$  связывает число фаз напряжения питающей сети ( $p = 1; 2; 3$ ) с числом полупериодов ( $q = 1; 2$ ) этого напряжения, в которых работают вентили:  $m = pq$ . Величина  $m$  определяется частотой пульсаций за период напряжения сети.

В обобщенном виде схема тиристорного электропривода с трехфазным преобразователем представлена на рис. 7.2.

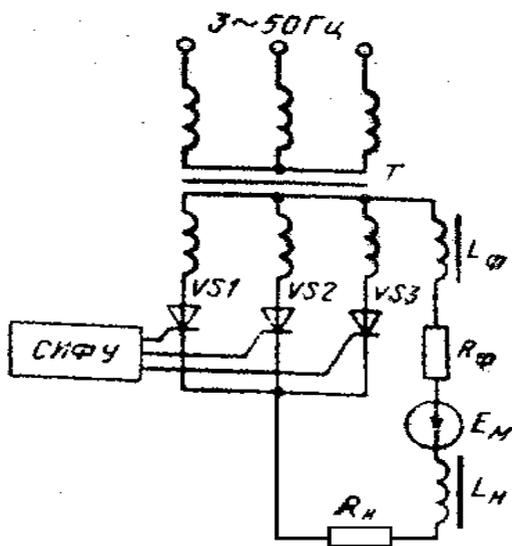


Рис. 7.2. Обобщенная схема тиристорного электропривода:

VS1 – VS3 – тиристоры;  $L_{\phi}$ ,  $R_{\phi}$  – индуктивность и активное сопротивление сглаживающего фильтра;  $L_{н}$ ,  $R_{н}$  – то же нагрузки;  $E_{н}$  – ЭДС двигателя

В СИФУ фиксация момента подачи управляющего импульса обычно осуществляется путем сравнения двух напряжений с использованием так называемого *вертикального* принципа, т.е. момент подачи отпирающего импульса определяется равенством постоянного управляющего напряжения  $u_y$  (рис. 7.3, а) и опорного напряжения  $u_{оп}$ . В момент равенства напряжений  $u_y$  и  $u_{оп}$  (точка а) в схеме возникает либо один, либо пачка импульсов с круглым передним фронтом  $i_{отп}$ , которые затем подаются на управляющие электроды тириستоров.

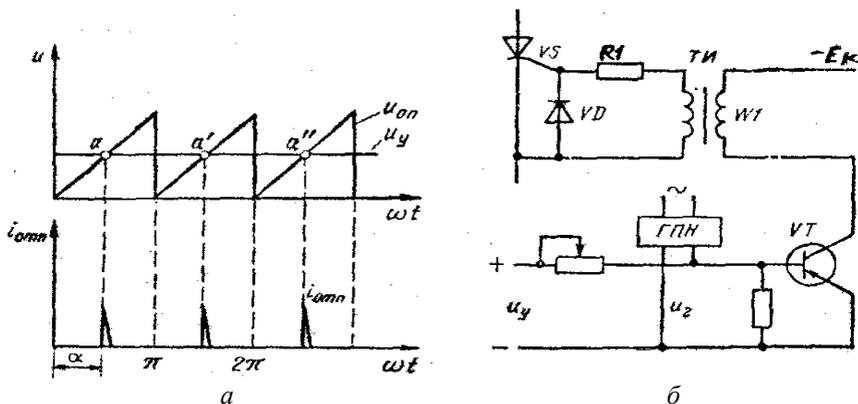


Рис. 7.3. Графики напряжений (а) и схема (б) системы импульсно-фазового управления тиристором

На рис. 7.3, б в упрощенном виде представлена схема управления тиристором. Напряжение, подаваемое на базу транзистора VT, равно алгебраической сумме управляющего напряжения  $u_y$  и выходного напряжения генератора пилообразного напряжения ГПН. При положительном напряжении на базе транзистор заперт. В момент, соответствующий точке а (см. рис. 7.3, а), когда результирующее напряжение на базе станет равным нулю, транзистор откроется и в первичной обмотке W1 импульсного трансформатора ТИ возникнет напряжение. Импульс напряжения через вторичную обмотку трансформатора будет подведен к управляющему электроду тиристора VS, он откроется. Для формирования крутого переднего фронта импульса используется дополнительная обмотка обратной связи трансформатора (на схеме не показана). Резистор R1 и диод VD служат для защиты управляющего p – n-перехода тиристора от действия недопустимого тока или напряжения обратной полярности. Изменяя управляющее напряжение  $u_y$ , оператор изменяет момент отпирания тиристора, т.е. изменяет угол регулирования  $\alpha$  от 0 до  $\pi$  (см. рис. 7.3, а). При этом изменяется выходное напряжение преобразователя, а следовательно, и скорость подключенного к нему электродвигателя.

**Электропривод постоянного тока с системой подчиненного регулирования.** В теории электропривода широко используется *инженерный метод* синтеза унифицированных контуров регулирования, называемый *методом последовательной коррекции с подчиненным регулированием координат* (или проще – *метод подчиненного регулирования координат*). Сущность его заключается в том, что объект регулирования представляется в виде последовательно соединенных звеньев  $П1 - Пi$ , выходными параметрами (координатами) которых могут быть скорость, ток, момент, положение и т.п. Для управления каждой из этих координат служит отдельный регулятор  $P_i$ , образующий с объектом управления замкнутый контур с соответствующей обратной связью  $к_{o.c.}$ . Регуляторы соединяются последовательно, так что выход одного из них является входом другого. При этом замкнутые контуры регулирования образуют систему, в которой имеется *внешний контур*, состоящий из звена  $П1$  объекта управления и соответствующего регулятора  $P1$ , и *внутренние контуры*. Выходной сигнал внешнего контура является задающим для последующего (внутреннего), заключенного внутри него контура. Таким образом, каждый внутренний контур регулирования подчинен соответствующему внешнему контуру. Каждому регулируемому параметру соответствует свой регулятор с обратной связью. Число контуров равно числу регулируемых параметров (координат) объекта управления и соответственно – числу регуляторов.

Достоинства системы подчиненного регулирования:

- удобство эксплуатации;
- простота наладки;
- широкая унификация узлов управления;
- возможность реализации систем управления из наборов стандартных элементов независимо от структуры и параметров электропривода.

Структурная схема электропривода постоянного тока (тиристорного, реверсивного) с системой подчиненного регулирования приведена на рис. 7.4. Электродвигатель  $M$  получает питание от реверсивного тиристорного преобразователя  $UZ1, UZ2$ , который питается от трехфазной сети через автоматический

выключатель QF и трансформатор Т. Выключатель QF защищает блоки тиристоров от коротких замыканий. Пульсации прямого тока сглаживаются реактором L.

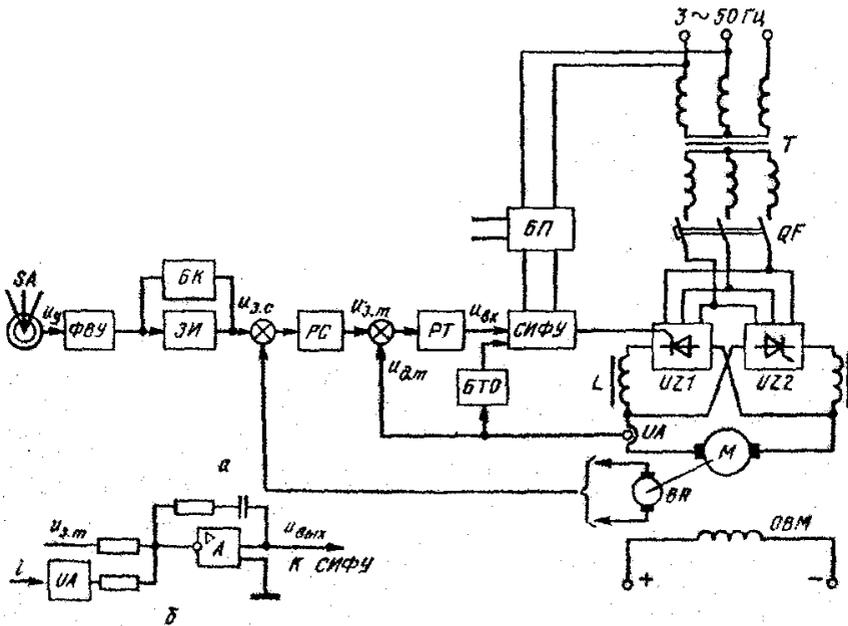


Рис. 7.4. Схема автоматизированного (тиристорного, реверсивного) электропривода постоянного тока с системой подчиненного регулирования

СИФУ генерирует управляющие импульсы для тиристоров, изменяет фазу их в зависимости от величины управляющего сигнала на ее входе с целью регулирования напряжения преобразователя и скорости электропривода. Величина входного сигнала  $u_{вх}$  СИФУ является функцией от управляющего сигнала  $u_y$  и сигналов обратных связей, поступающих в схему управления электроприводом. Управление электродвигателем (пуск, реверс, регулирование скорости) осуществляется бесконтактным командоконтроллером SA (ручным или педальным) обычно сельсинного типа с поста управления.

Сигнал  $u_y$  переменного тока на выходе  $SA$  необходимо преобразовать в сигнал постоянного тока, полярность которого определялась бы фазой напряжения  $u_y$ , фиксируемой положением ручки командоконтроллера. Для этой цели используют фазочувствительное выпрямительное устройство ФВУ.

Командоконтроллер  $SA$  дает обычно ступенчатый сигнал управления, что может вызвать чрезмерный бросок динамического тока. Поэтому для ограничения динамического тока при разгоне и торможении на вход регулятора скорости РС подается сигнал, изменяющийся линейно во времени и получаемый на выходе датчика интенсивности ЗИ.

В схеме (см. рис. 7.4, *a*) предусмотрена возможность шунтирования ЗИ бесконтактным ключом БК оператором (в случае возникновения ненормальных ситуаций).

С помощью тахогенератора ВР осуществляется отрицательная обратная связь по частоте вращения двигателя, а с помощью датчика тока УА – отрицательная обратная связь по току двигателя.

Схема электропривода имеет два самостоятельных регулятора: регулятор скорости РС и регулятор тока РТ. РС осуществляет прием сигнала задания скорости двигателя  $u_{з.с}$ , обеспечение изменения скорости двигателя с определенным ускорением и т.д. Кроме своей основной функции он также ограничивает сигнал  $u_{з.т}$  допустимым значением, которое часто зависит от величины потока двигателя; ограничивает скорость изменения тока якоря  $di/dt$ , осуществляет формирование требуемой жесткости механических характеристик электропривода и т.п.

Регулятор тока якоря РТ получает на входе сигнал задания  $u_{з.м}$  с выхода регулятора скорости и сигнал обратной связи  $u_{д.м}$  с выхода датчика тока УА. На выходе он формирует напряжение управления  $u_{вх}$  к СИФУ  $UZ$ , определяющее угол регулирования тиристоров  $\alpha$ . Регулятор тока осуществляет также ограничение скорости нарастания тока, улучшение динамики контура тока в зоне прерывистого тока, управление переключением выпрямительных мостов реверсивного преобразователя и др.

Схема простейшего регулятора тока представлена на рис. 7.4, *б*. В составе регулятора имеется усилитель А с ограничением тока. На

выходе регулятор тока формирует напряжение управления, поступающее в СИФУ. Блоки питания БП обеспечивают питание СИФУ, регуляторов и других элементов системы управления. Для ограничения тока якоря допустимым значением в схему управления введен блок токовой отсечки (БТО), который защищает электропривод от недопустимых перегрузок и аварийных токов, воздействуя непосредственно на вход СИФУ и ограничивая выпрямленный ток предельно допустимым значением. Принцип токовой отсечки состоит в том, что при достижении током двигателя заданного значения (уставки) фаза отпирающих импульсов изменяется так, что напряжение на выходе силового блока снижается, ограничивая ток заданным значением.

Рассмотренная система электропривода широко используется в механизмах, требующих широкого и плавного регулирования скорости. Автоматизированный электропривод в общем случае осуществляет регулирование различных параметров: скорости, тока, напряжения, момента, положения и др.

## *Лекция 8. КОНТАКТНАЯ АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ*

### АППАРАТУРА И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

***Цель:** Изучить аппаратуру ручного и релейно-контакторного управления электроприводами, основные схемы управления электродвигателями постоянного и переменного тока, автоматическое управление в функции тока, времени, скорости, аппаратуру и схемы защиты электродвигателей, бесконтактную аппаратуру и датчики положения, скорости и тока.*

К контактной аппаратуре управления относятся следующие электрические аппараты: рубильники, пакетные выключатели, контроллеры, универсальные переключатели, командоконтроллеры, путевые переключатели, кнопки. Основными элементами этих аппаратов являются *контакты*, для изготовления которых применяют медь, бронзу, латунь, в особо ответственных случаях – серебро. Все большее применение находят контакты из металлокерамики, обладающие повышенной надежностью,

долговечностью, износостойкостью. Переключение контактов осуществляется путем воздействия на них различных *рычагов* или *кулачков* вручную или механически – элементом движущейся машины.

При размыкании контактов под нагрузкой вследствие действия ЭДС самоиндукции и ионизации воздушного промежутка между ними возможно возникновение электрической дуги, которая вызывает оплавление или подгорание контактов. Для защиты их от действия дуги и сокращения времени ее действия применяют различные дугогасительные приспособления и устройства: *роговые разрядники* (электрическая дуга под действием потока горячего воздуха, перемещающегося вверх, поднимается по расходящимся рогам, удлиняется, обрывается и гаснет), *асбоцементные камеры* с деионной решеткой из стальных пластин (электрическая дуга индуктирует в пластинах вихревые токи, а их магнитный поток смещает дугу в сторону пластин, затягивает внутрь решетки, рассекает их на мелкие части; от соприкосновения дуги со стенами дугогасительной камеры дуга охлаждается и быстро гаснет); *дугогасительные катушки*, включаемые последовательно в цепь главных контактов (дуга под действием магнитного поля катушки растягивается на расходящихся рогах контактов, соприкасается со стенками дугогасительной камеры, охлаждается и гаснет).

Широко используется также гашение дуги в *минеральном масле* (в аппаратах свыше 1000 В). Например, контакты масляного выключателя погружают в стальной бак, наполненный маслом. При размыкании контактов дуга интенсивно охлаждается маслом и гаснет.

Так как электрические контакты требуют ухода и снижают надежность работы установки, то в настоящее время широко внедряют бесконтактную аппаратуру, выполняемую на полупроводниковых элементах.

**Рубильники** применяют в качестве вводных выключателей, предназначенных для снятия напряжения со схемы электроустановки и создания видимого разрыва электрической цепи при ремонтах, осмотрах и длительных остановках (в перерывах между сменами и т.п.). Такие рубильники называют *вводными*. Вводный рубильник в нормальных условиях не разрывает рабочего тока электродвигателя: это выполняют обычно другие аппараты. Чтобы

ножи отключенного рубильника не находились под напряжением и не представляли опасности при случайном к ним прикосновении, провода от сети присоединяют к контактным стойкам (губкам) рубильника, прикосновение к которым менее вероятно.

В станкостроении иногда находят применение трехполюсные рубильники с боковой рукояткой, которые встраивают в шкафы с электроаппаратурой так, чтобы рукоятка находилась снаружи. В цепях постоянного тока применяют двухполюсные рубильники. В станкостроении рубильники заменяются более удобными и более компактными другими аппаратами – пакетными или автоматическими выключателями.

В некоторых случаях используют **пакетные выключатели (переключатели)**, весьма компактные по сравнению с рубильниками. Пакетный выключатель содержит несколько примыкающих друг к другу однополюсных выключателей, управляемых поворотом общей оси. Однополюсные выключатели можно установить так, чтобы при повороте оси одни цепи замыкались, а другие размыкались. Пакетный выключатель снабжается механизмом, обеспечивающим фиксацию и быстрое переключение контактов, которое не зависит от скорости поворота рукоятки выключателя. В станкостроении применяют пакетные выключатели на 4...60 А. В электрических схемах станков пакетные выключатели используют в качестве вводных выключателей (вместо рубильников) и переключателей цепей управления и сигнализации, реже – для пуска электродвигателей.

**Путевые переключатели и конечные выключатели** располагают по пути следования механизма и в крайних (предельных) положениях, контакты этих аппаратов переключаются с помощью специального рычага движущимися элементами механизма.

Для одновременного переключения большого числа цепей в станкостроении применяют различные **барабанные переключатели (контроллеры)**.

В станкостроении широко применяют **пакетно-кулачковые выключатели и переключатели**, в которых контакты замыкаются при повороте валика с кулачками. Такие переключатели изготовляют на токи от 10 до 160 А с различным числом секций и углов поворота рукоятки. Путем надлежащего подбора шайб с

кулачками осуществляют нужные комбинации замыкания контактов. Их применяют для переключений в схемах при переходе с одного режима работы на другой, для переключения полюсов асинхронных двигателей и других целей. Схемы кулачковых переключателей снабжают таблицами переключений, в которых указывают, какие контакты замкнуты для каждого положения аппарата.

**Командоконтроллеры** служат для ручного дистанционного управления механизмами (кранов и др.). На рис. 8.1, *а* приведено устройство контактной части кулачкового командоконтроллера. При повороте рукоятки поворачивается квадратный вал 1, на котором закреплена кулачковая шайба 2. Под действием пружины 3 подвижный рычаг 4 стремится занять положение, при котором контактный мостик 5 замыкает неподвижные контакты 6. При повороте вала 1 против часовой стрелки выступающая часть кулачка нажмет на ролик 7 и отведет рычаг 4 вправо. Правый контакт разомкнется и будет занимать положение, показанное на схеме слева.

На рис. 8.1, *б* показана развертка схемы командоконтроллера. Зачерненные точки на штриховых линиях показывают, что находящиеся непосредственно над ними контакты в данном положении ручки замкнуты. Так, в положении 0 замкнут контакт IV и включена лампочка EL. В положении 1 «Вперед» замкнуты контакты I, II и включены катушки KM1, KM2. В положении 2 «Вперед» замкнут контакт II и включена катушка KM2.

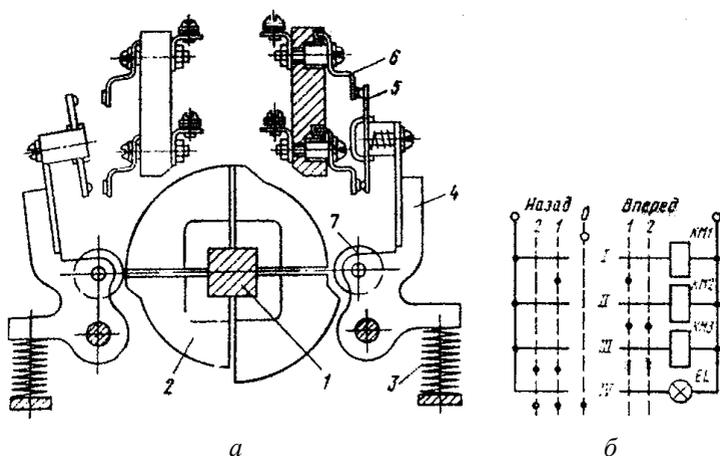


Рис. 8.1. Кулачковый командоконтроллер

В цепях электрического освещения станков и других потребителей малой мощности применяются малогабаритные одно- или двух-полюсные переключатели – *тумблеры*. Специальный механизм (с помощью пружины) быстро переключает контакты независимо от скорости поворота рычажка переключателя. Этим обеспечивается мгновенный разрыв электрической дуги между контактами.

В схемах электропривода широко используются пускорегулирующие реостаты, добавочные резисторы, RC цепочки и т.п.

Резисторы и реостаты характеризуются величиной сопротивления (Ом) и рассеиваемой мощностью (Вт). Для их изготовления используют сплавы, обладающие высоким удельным электрическим сопротивлением, – фехраль, константан и др.

**Релейно-контакторная аппаратура.** Основными ее элементами являются контакторы, магнитные пускатели и электромагнитные реле.

**Контактор** представляет собой электромагнитный аппарат дистанционного действия, предназначенный для оперативных переключений силовых цепей (двигателей, электротехнических установок и др.).

Контакторы различаются по следующим показателям:

– *роду тока*: постоянный и переменный;

- числу главных полюсов: одно-, двух-, трех- и пятиполюсные;
- номинальному току: от 4 до 2500 А;
- номинальному напряжению главной цепи: 220, 440, 600 В постоянного тока и на 380, 660 В переменного тока;
- номинальному напряжению катушек: 24...220 В постоянного тока и 24...660 В переменного напряжения;
- конструкции электромагнита: с прямоходным якорем и с якорем клапанного типа;
- способу гашения дуги: с дугогасительной катушкой, с дугогасительной камерой и т.п.

Основными элементами контактора (рис. 8.2) являются: втягивающий электромагнит (катушка 1, железный сердечник 2, подвижный якорь 3), главные контакты 4, блок-контакты 7, 8, возвратная пружина 5. При нажатии на пусковую кнопку SB1 включается катушка 1, которая притягивает якорь 3. При этом переключаются контакты: главные контакты 4 замыкаются, присоединяя двигатель *M* к сети; блок-контакты 8 (замыкающие) замыкаются, а блок-контакты 7 (размыкающие) размыкаются. Для остановки двигателя нажимают кнопку SB2. Катушка контактора обесточивается, якорь под действием пружины 5 и собственного веса отпадает, главные контакты 4 размыкаются, двигатель отключается от сети.

Более надежно работают контакторы с катушками постоянного тока, у которых отсутствуют гудение, вибрация, а пусковые броски тока минимальны. Поэтому в электроприводе ответственных механизмов (например, в металлургии и др.) используют в основном контакторы с катушками постоянного тока, получающими питание от специального выпрямителя небольшой мощности. Время включения контакторов 0,05...0,5 с, а время отключения 0,03...0,05 с.

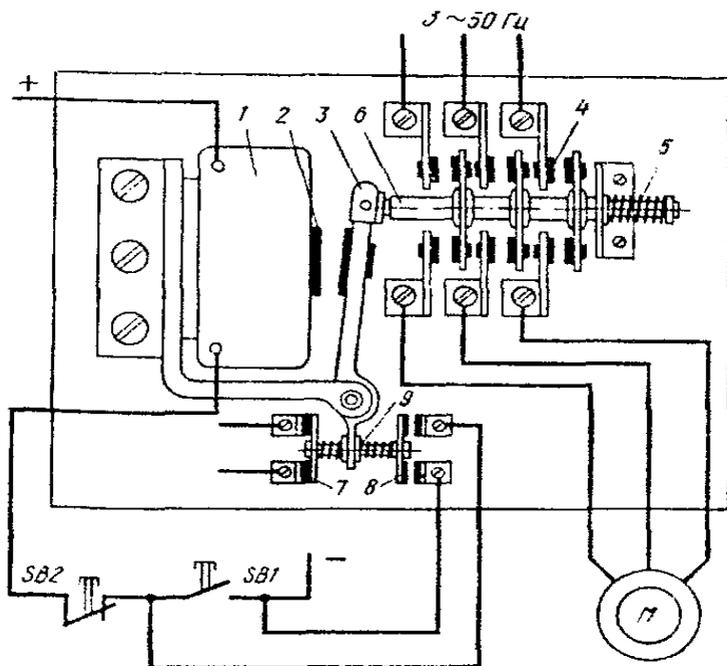


Рис. 8.2. Схема контактора

**Магнитные пускатели** применяют для дистанционного и автоматического управления (пуск, останов, реверс) трехфазными асинхронными двигателями. Их основные элементы – контактор и тепловые реле. Реверсивные магнитные пускатели имеют два контактора в одном корпусе и два тепловых реле (для защиты двигателя от перегрузок по току).

**Реле** осуществляют скачкообразное переключение цепей управления под воздействием различных сигналов (электрических, механических, тепловых и др.). По принципу действия реле делятся на электромагнитные, индукционные, электронные, тепловые и др. Реле могут быть контактными, бесконтактными и реагировать на изменение различных величин (электрических и неэлектрических). В соответствии с этим различают реле тока, напряжения, скорости, времени, температуры, давления и др. Значение параметра (тока, времени и т.п.), при котором реле срабатывает, называется

**уставкой реле.** Одной из основных характеристик реле является **коэффициент возврата  $K_v$** , равный отношению значений входной величины при отпуске якоря и срабатывании реле ( $K_v = 0,4 \dots 0,95$ ).

Наибольшее применение в схемах релейно-контакторного управления находят **электромагнитные реле напряжения и тока**. Основными элементами таких реле являются катушка постоянного или переменного тока, железный сердечник, якорь и контактная система. При увеличении входной величины (например, тока) до величины уставки реле оно срабатывает (включается) и переключает контакты. При уменьшении тока катушки до величины тока отпущения якоря реле отключается и его контакты под воздействием возвратной пружины вновь переключаются в исходное положение.

Многоконтактные электромагнитные реле, используемые для размножения поступающих на их входы сигналов, а иногда – для их усиления, называются **промежуточными реле**. Серийно выпускаемые универсальные промежуточные реле имеют до десяти пар контактов, на номинальный ток  $0,4 \dots 10$  А. Катушки их рассчитаны на номинальные напряжения  $24 \dots 660$  В.

Все более широкое применение находят герконовые реле с электромагнитной памятью (рис. 8.3). Геркон *1* помещен в магнитное поле магнитотвердого феррита *4* с наконечниками *2*. Импульс тока в катушке *3* приводит к срабатыванию реле – контакты *1* замыкаются, оставаясь замкнутыми и после окончания импульса тока за счет намагничивания ферритового сердечника. Для отпущения реле необходимо подать импульс тока обратного направления. Число контактов  $1 : 10$ ; потребляемая мощность катушки  $0,1 \dots 2$  Вт. Достоинства герконов: высокое быстродействие, износоустойчивость (до  $10^9$  срабатываний), малые габариты, невысокая стоимость.

В электроприводе используются и **реле времени** для отсчета требуемых временных задержек (выдержек). Наибольшее применение находят электромагнитные реле времени постоянного тока. Выдержка времени обеспечивается благодаря замедлению отпадания якоря реле после отключения его катушки. Для замедления отпадания якоря на магнитопровод насаживается

массивная металлическая гильза. После отключения катушки реле действующий в сердечнике магнитный поток спадает и наводит в гильзе ЭДС. Появляется ток в гильзе, который создает дополнительный магнитный поток в сердечнике, препятствующий исчезновению основного магнитного потока, т.е. результирующий магнитный поток в сердечнике спадает более замедленно, а выдержка времени при наличии гильзы увеличивается.

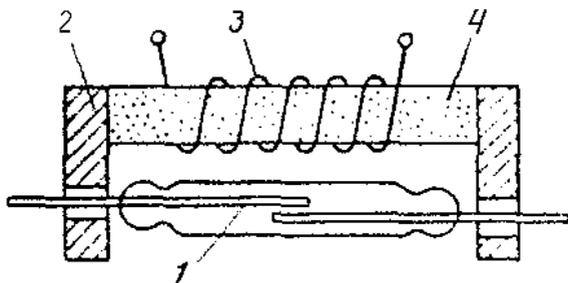


Рис. 8.3. Схема устройства геркона

Для грубого регулирования выдержки времени между якорем и сердечником крепят тонкую (0,1...0,5 мм) немагнитную прокладку, с помощью которой изменяется индуктивность магнитной цепи реле, а следовательно, и выдержка времени (она уменьшается). Более тонкое регулирование выдержки времени осуществляется винтом, действующим на натяжение пружины (при уменьшении натяжения пружины выдержка времени увеличивается).

**Двигательные реле времени** приводятся в движение маломощным синхронным двигателем. Вал двигателя соединен через редуктор с главным валиком, на котором укреплены упоры, воздействующие на контактную систему. Выдержку времени контакта можно изменить путем перестановки упора. Число контактов достигает 12; выдержка времени – от долей секунды до нескольких часов.

## Лекция 9. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Наиболее часто используются *принципиальные* электрические схемы, на которых в виде условных графических обозначений, установленных в стандартах ЕСКД, изображают все электрические аппараты и устройства со всеми электрическими связями между ними, а также электрические элементы (разъемы, зажимы и т.д.).

### **Основные правила выполнения схем:**

– схемы выполняются без масштабов; графические элементы аппаратов располагают на схеме там, где это наглядно для понимания работы схемы (используется принцип наибольшей наглядности). Если различные элементы одного аппарата на чертеже оказываются в разных частях схемы, они снабжаются *одинаковыми* буквенными или буквенно-цифровыми обозначениями;

– схемы изображают в *отключенном положении аппаратов*, когда катушки не обтекаются током, а кнопки и пружины отпущены. В соответствии с этим все контакты в схеме делятся на *закрывающие* (при обесточенной катушке разомкнуты) и *размыкающие* (при обесточенной катушке замкнуты). Силовые цепи на схеме вычерчивают жирными линиями, а цепи управления – более тонкими;

– каждому устройству и элементу на схемах присваивается *буквенно-цифровое обозначение*, составленное из буквенного обозначения и порядкового номера, проставленного после буквенного обозначения, одинаковой с ним высоты.

Приведем рекомендуемые одно- и двухбуквенные обозначения (первая буква означает тип элемента, вторая – его функциональное назначение):

А – усилители; В – преобразователи неэлектрических величин в электрические (датчики; например, ВR – тахогенератор); С – конденсаторы; D – интегральные схемы; F – разрядники, предохранители, защитные устройства (FA – дискретные элементы защиты по току; FU – плавкие предохранители); G – генераторы, источники питания; K – реле, контакторы, пускатели (KA – токовое реле, KK – электротепловое реле, KT – реле времени, KU – реле

напряжения, КМ – контактор, магнитный пускатель); М – двигатель; Q – выключатель в силовых цепях (QF – автоматический выключатель, QS – рубильник); S – коммутационные устройства для слаботочных цепей (SA – выключатель или переключатель, SB – выключатель кнопочный, SQ – выключатель путевой, SM – командоконтроллер); Т – трансформаторы (ТА – трансформатор тока, ТУ – трансформатор напряжения); U – преобразователи одних электрических величин в другие электрические величины (UZ – преобразователь частоты, выпрямитель, инвертор); V – приборы полупроводниковые (VD – диод, VT – транзистор, VS – тиристор); Y – устройства механические (YA – электромагнит, YB – тормоз, YC – электромагнитная муфта).

Но часто обозначение элементов электрических аппаратов составляют также и из начальных букв названия и назначения аппарата, например: РТ – реле тепловое, РП – реле промежуточное, П или КнП – кнопка «Пуск», С или КнС – кнопка «Стоп».

На рис. 9.1, а приведена простейшая схема управления пуском асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Для пуска включают рубильник QS и нажимают на кнопку SB1. Контактор КМ1 при этом включается (так как через размыкающий контакт кнопки SB2 и кнопку SB1 образуется замкнутая цепь для катушки контактора КМ1) и своими главными контактами (с дугогашением) КМ1 подключает статор двигателя к сети. Замыкающий блок-контакт контактора КМ1 шунтирует кнопку SB1 (это позволяет отпустить кнопку SB1, не отключая катушки контактора КМ1). Блок-контакт КМ1 называют контактом самопитания или контактом самоблокировки. Отключение электродвигателя от сети осуществляется нажатием кнопки SB2 (по катушке КМ1 протекание тока прерывается, контактор отключится, разомкнув три силовых контакта КМ1 в цепи двигателя М), после чего схема приходит в исходное состояние.

Данная схема обеспечивает так называемую *нулевую защиту* – защиту от самопроизвольного повторного включения асинхронного двигателя при восстановлении напряжения сети после аварийного понижения его до нуля или до недопустимо низких значений. При перебое в электроснабжении контактор КМ1 отпадает, размыкая все свои контакты, включая и блок-контакты, а при появлении напряжения в сети контактор КМ1 не включится сам, пока не будет

нажата кнопка SB1. То же самое будет происходить, если напряжение сети уменьшится до 50...60 % номинального при переменном токе и до 15...20 % при постоянном токе. Если электродвигатель включают рубильником, пакетным выключателем и контроллером, то при перебое в электроснабжении и остановке механизма схема электропривода не нарушается, а восстановление напряжения в сети вызывает самопроизвольное включение двигателя. Такой внезапный пуск двигателя и механизма может стать причиной аварии или несчастного случая.

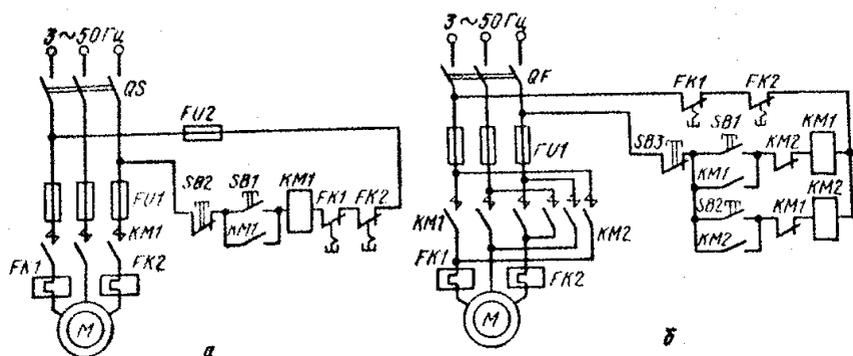


Рис. 9.1. Схемы пуска асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Замена кнопки SB1 аппаратом ручного управления без самовозврата, например тумблером, также приводит к тому, что схема теряет свойство нулевой защиты.

На рис. 9.1, б показана схема управления пуском асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с реверсивным магнитным пускателем. Для подачи командных импульсов имеются три кнопки SB1, SB2, SB3. При нажатии кнопки SB1 включается контактор KM1, который своими силовыми контактами KM1 подключает статор двигателя к сети. Одновременно он своим замыкающим блок-контактом шунтирует кнопку SB1, а размыкающим блок-контактом разрывает цепь катушки контактора KM2, чтобы исключить возможность короткого замыкания в силовой цепи двигателя через главные контакты контакторов KM1 и KM2 при одновременном нажатии обеих кнопок (SB1 и SB2). При нажатии

кнопки SB2 включается контактор KM2. Две фазы статора при этом меняются местами, и двигатель изменит направление вращения. В данной схеме для реверса электродвигателя необходимо предварительно нажать на кнопку SB3 («Стоп»), а затем уже на кнопку SB2.

В электроустановках с целью исключения аварий и повышения надежности работы при возможных нарушениях нормального режима могут применяться различные виды защит, блокировки и сигнализация. В релейно-контакторных схемах управления применяются (кроме нулевой) также максимально-токовая, тепловая и другие виды защит. Нулевая защита обеспечивает защиту от самозапуска двигателя при кратковременном исчезновении напряжения сети. При управлении от кнопок нулевую защиту осуществляет сам контактор, а при управлении от командоконтроллера – реле защиты по напряжению. Максимально-токовая и тепловая защиты обеспечивают защиту электрооборудования от коротких замыканий и перегрузок.

В схеме на рис. 9.1, а защита двигателя М осуществляется тепловыми реле FK1, FK2, включенными в две фазы статора, а также плавкими предохранителями FU1. Размыкающие контакты защитных реле FK1, FK2 включены в цепь катушки контактора KM1. Защита схемы управления двигателем осуществляется плавкими предохранителями FU2. При перегрузке или коротком замыкании срабатывает реле защиты FK1 или FK2. Контакт защитного реле размыкается и отключает катушку контактора KM1, который своими главными контактами KM1 отключит двигатель М от сети.

Реверсивные магнитные пускатели, содержащие по два контактора в общем корпусе, обычно снабжаются *механической блокировкой*. В этом случае посредством коромысла или кулачков не допускается включение одного контактора, когда другой уже включен или пока он полностью не отключится.

Часто необходимо, чтобы электропривод работал, лишь пока нажата кнопка «Пуск». Такое управление требуется при установочных перемещениях (при наладке), когда при кратковременном нажатии на кнопку должно произойти небольшое перемещение (толчок) узла станка. В данном случае не нужны контакты самопитания для кнопки «Пуск» и сама кнопка «Стоп»

(рис. 9.2, а). Нередко возникает необходимость управления одним и тем же электроприводом в обоих режимах: установочном и длительном (рис. 9.2, б). Для *длительного режима* работы электродвигателя нужно кратковременно нажать на кнопку П, что вызовет включение промежуточного режима РП. Один замыкающий контакт этого реле шунтирует кнопку П и дает возможность снять ее нажатие, не вызывая отключения реле; другой – включает катушку контактора 1К. Для осуществления установочных перемещений необходимо нажимать кнопку У.

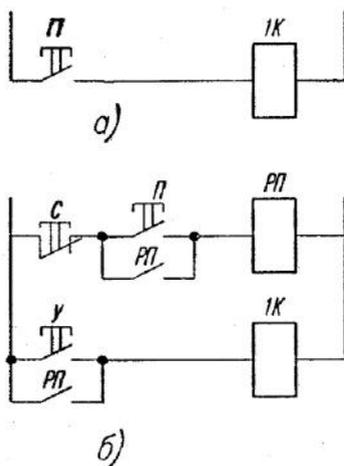


Рис. 9.2. Схемы пуска АД с короткозамкнутым ротором

**Блокировки** в электрических схемах обеспечивают правильный порядок работы схемы, исключают холостые и аварийные включения аппаратов, предупреждают несчастные случаи, возможные завалы перегрузочных пунктов, поломки машин и др. По назначению блокировки разделяют на технологические и защитные. *Технологические* блокировки используются для осуществления заданной последовательности работы схемы. *Защитные* блокировки предотвращают ошибочные переключения в схеме и защищают электрооборудование, механизмы, а иногда и оператора от последствий неправильных действий. К защитным относятся блокировки реверсивных пускателей, предупреждающие

их одновременное включение (см. рис. 9.2, б). Путевые блокировки ограничивают движение механизмов и защищают их от поломки.

**Пуск асинхронных электродвигателей с фазным ротором** средней и большой мощности производится в большинстве случаев с помощью реостата, включенного в цепь ротора (рис. 9.3), в автоматическом режиме. Пуск двигателей постоянного тока и асинхронных с фазным ротором обычно осуществляют в соответствии с заданной пусковой диаграммой, при этом закорачивание ступеней реостата происходит либо при достижении двигателем определенной скорости, либо при определенной силе тока, частоте или через заданные промежутки времени.

На рис. 9.3, а изображена пусковая диаграмма двигателя с тремя ступенями пускового реостата, из которой видно, что закорачивание ступеней реостата производится через время  $t_1$  (первая ступень), через время  $t_2$  (вторая ступень) и т.д. Ток двигателя при пуске изменяется в пределах от  $I_1$  до  $I_2$ .

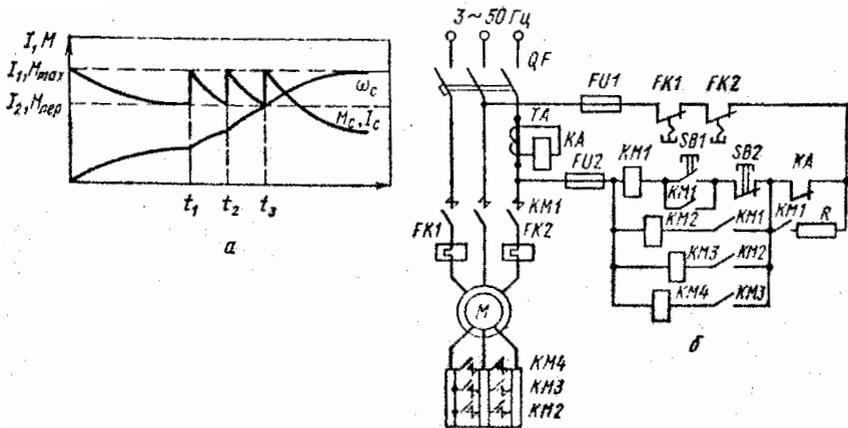


Рис. 9.3. Пусковая диаграмма (а) и схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором в функции тока

**Автоматическое управление в функции тока.** Величина тока во время пуска двигателя колеблется в заданных пределах (см. рис. 9.3, а)  $I_1 - I_2$ , где  $I_1$  — наибольший пусковой ток в момент включения электродвигателя. По мере разгона двигателя его ток снижается до

величины  $I_2$ , при которой часть пускового реостата шунтируется, что приводит к новому увеличению тока до значения  $I_1$  и т.д. Рассматриваемый метод управления основан на применении токовых реле с катушками, включаемыми в силовую цепь двигателя непосредственно или через трансформатор тока.

Схема пуска асинхронного электродвигателя в функции тока показана на рис. 9.3. После включения линейного контактора КМ1 двигатель запускается при полностью введенном в ротор реостате. Под действием пускового броска токовое реле КА включается и размыкает свой контакт. Катушка КМ1 при этом получает питание через блок-контакт КМ1 и резистор R. Замыкание блок-контакта КМ1 в цепи ускоряющего контактора КМ2 не вызывает включения последнего из-за значительной величины сопротивления резистора R.

Только после уменьшения тока двигателя до величины  $I_1$  реле КА, отрегулированное на соответствующую силу тока, отпустит свой якорь и замкнет размыкающий контакт КА. При этом контактор КМ2 своими силовыми контактами шунтирует первую секцию пускового реостата. Соответствующий этому бросок тока снова вызовет включение реле КА, которое своим блок-контактом препятствует мгновенному включению второго ускоряющего контактора КМ3. Контактор же КМ2 остается включенным через блок-контакт КМ1 и резистор R, так как его ток при этом достаточен для удержания якоря в притянутом положении. Аналогично происходит шунтирование остальных ступеней реостата. Достоинством данного способа пуска является автоматическое изменение выдержки времени при изменении нагрузки.

**Автоматическое управление в функции времени.** Наряду с автоматизацией технологических процессов реле времени применяют и для автоматизации процессов пуска и торможения электроприводов.

Широкое распространение получили *пневматические реле времени*, обеспечивающие выдержку времени от 0,4 до 180 с. В схемах постоянного тока широко используется *электромагнитные реле времени* (рис. 9.4). Электромагнитные реле времени обеспечивают выдержки времени от 0,3 до 16 с (в зависимости от исполнения).

В машиностроении используются и *моторные реле времени* на основе синхронного двигателя, электромагнита и фрикционной муфты. В различных исполнениях реле обеспечивает уставки от 2 с до 24 ч.

Когда от реле времени требуется большое количество срабатываний в час, применяют разнообразные электронные и полупроводниковые реле, обеспечивающие самые различные выдержки.

Схема автоматизации пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением посредством электромагнитных реле времени 1РУ и 2РУ, называемых в таких схемах реле ускорения, приведена на рис. 9.4.

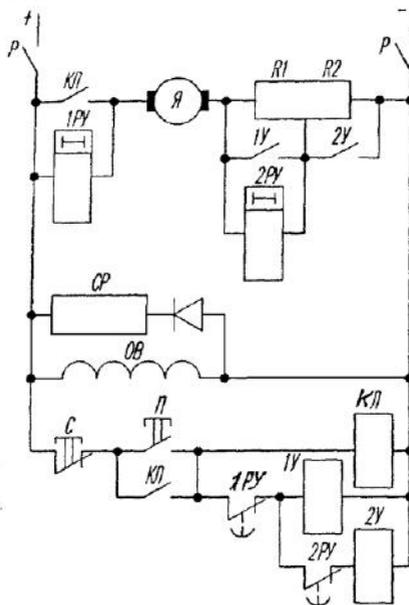


Рис. 9.4. Автоматизация пуска двигателя постоянного тока

При включении схемы ток проходит через обмотку 1РУ, якорь Я электродвигателя и две ступени пускового реостата R1 и R2. Реле 1РУ при этом включается и его размыкающий контакт открывается. Вследствие большого сопротивления катушки 1РУ ток в цепи включения реле мал и никакого действия на электродвигатель не оказывает. В обмотку реле 2РУ, включенную

параллельно ступени R1 пускового реостата, ответвляется очень небольшой ток, от которого реле сработать не может. По обмотке возбуждения электродвигателя ток протекает.

При нажатии кнопки П включается линейный контактор КЛ и становится на самопитание. Рабочий контакт КЛ замыкает цепь якоря электродвигателя, по которой проходит пусковой ток, ограниченный двумя ступенями реостата. Часть пускового тока ответвляется в катушку реле 2РУ, которое теперь включается и мгновенно открывает его контакт в цепи катушки 2У. Одновременно с включением цепи якоря рабочий контакт КЛ линейного контактора замыкает накоротко катушку реле времени 1РУ. Ток в катушке 1РУ убывает и через некоторое время реле отпадает, закрывая свой размыкающий контакт 1У в цепи катушки 1У. При этом включается контактор 1У, главный контакт которого замыкает накоротко ступень R1 пускового реостата и одновременно – катушку реле времени 2РУ. Реле это отпадает с выдержкой времени и размыкающим контактом 2РУ включает контактор 2У, а главный контакт последнего замыкает накоротко вторую ступень R2 пускового реостата.

Параллельно обмотке возбуждения ОВ включен разрядный резистор СР (его сопротивление в 4–5 раз больше сопротивления обмотки возбуждения), замедляющий уменьшение потока и предохраняющий изоляцию обмотки от повреждения в случае аварийного обрыва цепи возбуждения.

Схема автоматического пуска асинхронного двигателя с использованием реле времени электромагнитного типа показана на рис. 9.5. Нажатием кнопки SB1 подается питание на катушку контактора КМ1, который, включившись, своими главными контактами подключает электродвигатель М к сети при полностью введенном в цепь ротора реостате. Размыкающий блок-контакт КМ1 отключает реле времени КТ1, и последнее с выдержкой времени включает первый ускоряющий контактор КМ2, включившись, он шунтирует первую ступень пускового реостата. Аналогично шунтируются вторая и третья ступени пускового реостата, после чего двигатель выходит на естественную характеристику и пуск на этом заканчивается.

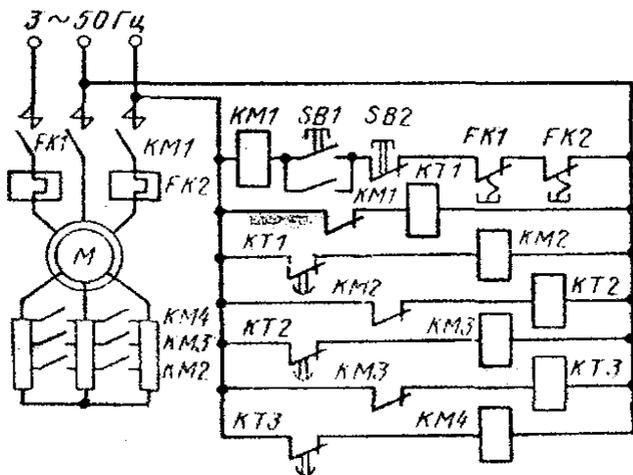


Рис. 9.5. Схема пуска АД с фазным ротором в функции времени

На рис. 9.6 представлена схема резисторного пуска двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением с использованием реле времени и командоконтроллера. Такие схемы в реверсивном исполнении используются на транспортных установках. Пуск осуществляется в три ступени. Командоконтроллер SM имеет четыре положения (0, 1, 2, 3). В нулевом положении командоконтроллера SM замкнуты его контакты 0-0, включено реле FV и замкнут его контакт FV, подающий питание на нижнюю часть схемы управления. Двигатель отключен от сети. В положении 1 командоконтроллера замкнут его контакт I-I, включается контактор KM1, который подключает двигатель к сети при полном сопротивлении в цепи якоря.

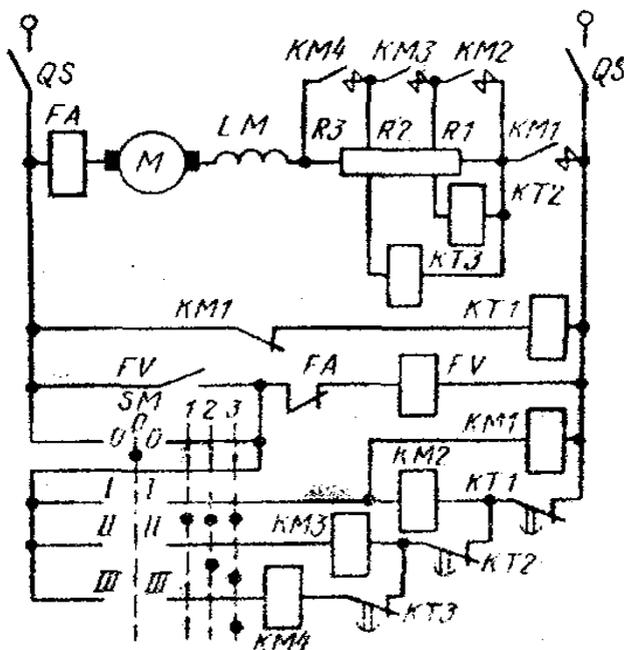


Рис. 9.6. Схема пуска двигателя постоянного тока

Разгон двигателя осуществляется автоматически с помощью реле времени  $KT1...KT3$ . Ручка командоконтроллера устанавливается в крайнее (3) положение, при котором замыкаются все его контакты I-I; II-II; III-III. Размыкающий блок-контакт включившегося ранее контактора  $KM1$  отключает реле времени  $KT1$ , которое с заданной выдержкой времени замкнет свой контакт в цепи ускоряющего контактора  $KM2$ . Последний, включившись, шунтирует секцию  $R1$  пускового реостата; при этом отключается реле времени  $KT2$ . Последнее с выдержкой времени включит контактор  $KM3$ , который шунтирует вторую секцию пускового реостата  $R2$ . Третья секция пускового реостата будет шунтирована аналогично. Реле напряжения осуществляет нулевую блокировку командоконтроллера. Включение двигателя и его разгон можно осуществлять только из нулевого положения командоконтроллера. Защита двигателя от перегрузки осуществляется максимальным

реле FA, размыкающий контакт которого включен в цепь катушки реле FV.

Схема автоматического управления асинхронным двигателем с фазным ротором с динамическим торможением в функции времени представлена на рис. 9.7. Перед пуском двигателя универсальный переключатель SA должен стоять в положении С («Стоп»), в котором замкнуты контакты 2–4, а контакты 1–3 разомкнуты. В этом положении переключателя катушки контакторов KM1 – KM4 отключены, двигатель неподвижен. При замыкании рубильника в схеме QS1 практически ничего не изменяется. При замыкании рубильника QS2, хотя двигатель остается неподвижным, через размыкающие контакты KM1 и KM2 включатся катушки реле времени KT1 и KT2. Размыкающие контакты реле KT1, KT2 разомкнутся в цепях контакторов KM2 и KM3, а контакт KT2 в цепи реле KV замкнется. Через контакты 2–4 универсального переключателя и контакт KT2 включается реле KV и замыкает свой контакт. Таким образом, схема готова к работе, двигатель неподвижен.

Для пуска двигателя переводим ручку SA в положение П («Пуск»). При этом замкнутся контакты 1–3 (контакты 2–4 разомкнутся). В катушку контактора KM1 будет подан ток по цепи: «плюс» источника постоянного тока, плавкий предохранитель FU1, контакт KV, контакты 1–3 переключателя SA, размыкающий контакт KM4, катушка контактора KM1, «минус» источника тока. Контакты контактора KM1 подключат двигатель к сети, и он пойдет в ход при полностью включенном в цепь ротора пусковом реостате R1, R2. Разгон двигателя осуществляется автоматически в функции времени с использованием электромагнитных реле времени KT1, KT2.

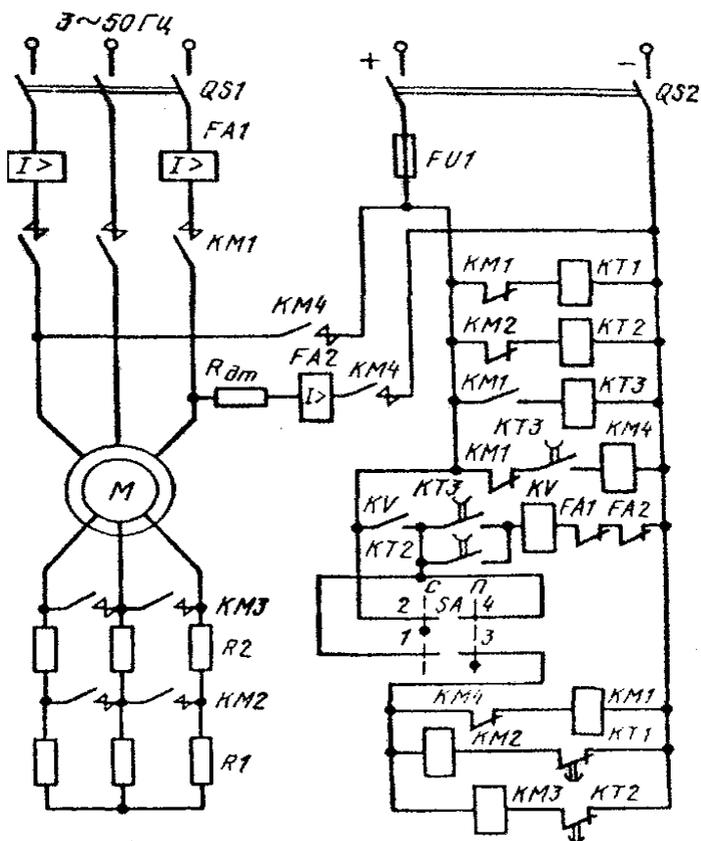


Рис. 9.7. Схема управления АД с фазным ротором с динамическим торможением

Работа схемы происходит следующим образом. Размыкающий контакт включившегося контактора KM1 размыкает цепь катушки реле времени KT1. Реле отключается и с выдержкой времени замыкает свой размыкающий контакт KT1 в цепи контактора KM2. Контактор включается и своими главными контактами KM2 шунтирует первую ступень реостата R1. Двигатель разгоняется по новой реостатной характеристике. Размыкающий блок-контакт KM2 размыкает цепь катушки реле KT2. Последнее отключается и с выдержкой времени замыкает свой размыкающий контакт KT2 в цепи контактора KM3. Контактор KM3 своими главными

120

контактами выводит оставшуюся ступень пускового реостата. При этом двигатель выходит на естественную характеристику и пуск заканчивается.

Остановка двигателя происходит в режиме динамического торможения. Для остановки двигателя универсальный переключатель SA переводят в положение С («Стоп»). При этом его контакты 1–3 размыкаются и отключают контакторы КМ1 – КМ3. Kontakтами КМ1 двигатель отключается от сети переменного тока, а в цепи ротора вводится весь пусковой реостат, поскольку контакты КМ2, КМ3 разомкнутся. Одновременно с перечисленными выше переключениями разомкнется контакт КМ1 в цепи реле времени КТ3 и замкнется контакт КМ1 в цепи контактора КМ4. Хотя катушка КТ3 обесточивается, контакт реле КТ3 в течение времени выдержки останется замкнутым. Через контакты КМ1 и КТ3 в катушку контактора КМ4 будет проходить ток. Замкнувшиеся контакты КМ4 через дополнительный резистор  $R_{д.т}$  подадут постоянный ток в две фазы статора асинхронного двигателя. Двигатель остановится в режиме интенсивного динамического торможения.

По истечении выдержки времени контакты реле времени КТ3 отключат контактор КМ4 и последний своими контактами отключит источник постоянного тока от статора двигателя. На этом торможение оканчивается.

Защита схемы управления осуществляется плавкими предохранителями FU1, защита двигателя от перегрузок и коротких замыканий – максимальным двухкатушечным реле FA1, защита цепи постоянного тока в режиме динамического торможения – максимальным реле FA2. Максимальная защита работает следующим образом: при перегрузке или коротком замыкании срабатывает (включается) максимальное реле и размыкает свой контакт FA1 (или FA2) в цепи реле KV. Реле KV отключается, своим контактом размыкает цепь контактора КМ1, и двигатель отключается от сети.

**Автоматическое управление в функции скорости.** Простейшим командным аппаратом в системах автоматического управления в функции скорости является *индукционное реле контроля скорости* (рис. 9.8). Валик 1 реле связывают с валом электродвигателя, скорость которого необходимо контролировать.

На этом валике закреплен цилиндрический постоянный магнит 2. На том же валике 1 на отдельных подшипниках установлено кольцо 3 из листовой стали. На внутренней поверхности кольца уложена обмотка 4, аналогичная обмотке ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя.

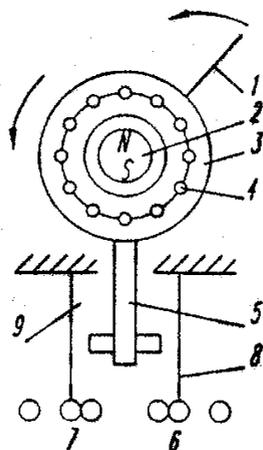


Рис. 9.8. Схема реле контроля скорости

При вращении магнита 2 в стержнях обмотки 4 наводятся ЭДС и появляется ток, в результате чего кольцо 3 поворачивается в сторону вращения магнита так же, как ротор асинхронного двигателя начинает вращаться вслед за полем. При повороте кольца 3 толкатель 5 в зависимости от направления вращения вала электродвигателя воздействует на контактную систему 6 или 7. Во время остановки и приближения его частоты вращения к нулю толкатель 5 перестает нажимать на контактные пружины 8 и 9, и контактная система приходит в нормальное положение.

Наиболее широкое применение в машиностроении реле контроля скорости получило в схемах торможения *противовключением* асинхронных двигателей. Одна из таких схем представлена на рис. 9.9. При нажатии на кнопку П срабатывает рабочий контактор КР, который своими главными контактами включает электродвигатель. При этом открывается размыкающий блок-контакт КР и закрывается замыкающий блок-контакт в цепи катушки

промежуточного реле РП. Когда электродвигатель разгонится до некоторой небольшой частоты вращения, замыкающий контакт реле контроля скорости РКС закрывается и включает реле РП. Это реле замыкает контакт, включенный параллельно замыкающему блок-контакту КР. Через катушку КТ ток при этом не протекает, так как цепь ее разорвана замыкающим контактом КР. В таком состоянии схема находится во время работы станка.

Когда нажимают кнопку С, контактор КР отпадает и своими главными контактами отключает двигатель от сети. Размыкающий блок-контакт КР при этом закрывается, через замкнутые контуры РКС и РП включается тормозной контактор ТК. Его главные контакты включают электродвигатель на реверс, магнитное поле начинает вращаться в обратную сторону и происходит торможение электродвигателя противовключением. При снижении частоты вращения до определенной малой величины контакт РКС размыкается, реле РП и контактор КТ отпадают и электродвигатель отключается от сети. Если вал неподвижного электродвигателя повернуть от руки (например, дернув за ремень), то замыкающий контакт РКС включится. Однако двигатель при этом вращаться не начнет, так как замыкающие контакты РП и КР открыты. Наличие промежуточного реле РП предотвращает возможность такого аварийного пуска двигателя.

Реле контроля скорости пригодно также для торможения и реверсивного электродвигателя. В этом случае контактор, включающий двигатель вперед, используют как тормозной при вращении двигателя в обратную сторону, и наоборот.

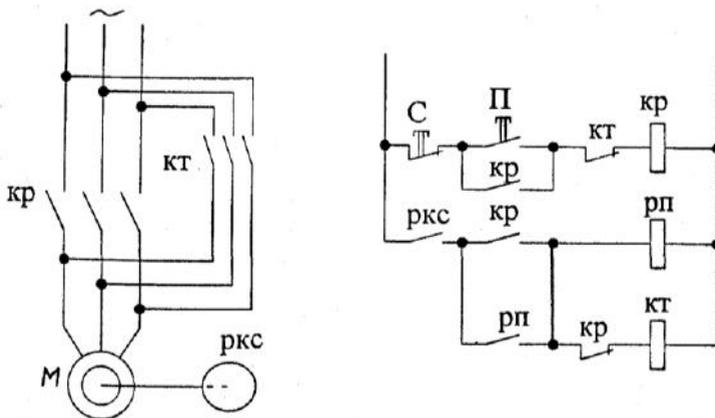


Рис. 9.9. Схема торможения противоключением неререверсивного двигателя  
 Лекция 10. АППАРАТУРА И СХЕМЫ ЗАЩИТЫ  
 ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Простейшими аппаратами, обеспечивающими защиту электродвигателей и сети от чрезмерно больших токов (при коротких замыканиях), являются *плавкие предохранители*. Отключение участка короткого замыкания этими аппаратами происходит путем перегорания специально рассчитанной плавкой вставки предохранителя, представляющей собой калиброванную проволоку или металлическую (цинковую) пластинку.

В машиностроении применяют резьбовые и трубчатые предохранители. Последние имеют цинковую плавкую вставку, помещенную внутри фибрового патрона, закрытого с обоих концов металлическими обоймами. При перегорании плавкой вставки дуга не выходит за пределы патрона, а давление газов, образующихся при этом, способствует быстрому гашению дуги. Трубчатые предохранители изготавливают на 15, 60, 100, 200, 450, 600, 1000 А при напряжении 500 В.

Для электродвигателей постоянного тока и асинхронных с фазным ротором, пускаемых посредством реостата, плавкую вставку выбирают по номинальному току электродвигателя. Для короткозамкнутых асинхронных двигателей плавкую вставку выбирают на силу тока, в 2–2,5 раза меньшую пускового. Пуск

электродвигателей происходит кратковременно, поэтому плавкая вставка при пуске не успевает перегореть. Однако предохранитель с плавкой вставкой, выбранной таким образом, не защищает электродвигатель при длительных перегрузках (сравнительно небольших по величине). Для защиты электродвигателя от недопустимого перегрева при длительных небольших перегрузках применяют **тепловые реле** (рис. 10.1). Ток защищаемого электродвигателя проходит через нагревательный элемент 1. Вблизи него расположена пластинка, состоящая из двух наложенных одна на другую и сваренных между собой полос 2 и 3 из металлов с различными коэффициентами теплового расширения. При нагревании пластинка изгибается вправо, воздействует на рычаг 4, который под действием пружины 5 повернется против часовой стрелки и разомкнет контакт 6. Этот контакт, включенный в цепь управления электродвигателя, отключит электродвигатель от сети. После остывания биметаллической пластинки нажатием кнопки возврата 7 рычаг 4 возвращается в исходное состояние и контакт 6 замыкается.

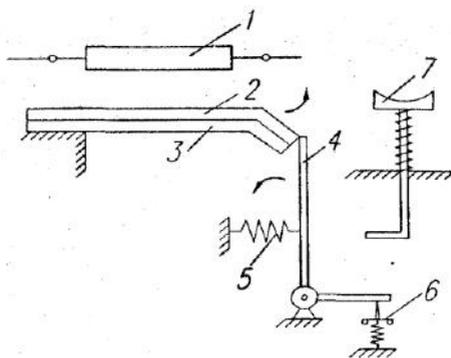


Рис. 10.1. Схема теплового реле

Правильно выбранное и отрегулированное тепловое реле срабатывает при перегрузках электродвигателя по току на 20 % за время 20 мин и не срабатывает при пуске двигателя или значительных, но кратковременных перегрузках.

При больших токах тепловое реле отключает электродвигатель значительно позже, чем плавкий предохранитель. Поэтому для

надежной защиты электродвигателя в схему вводят тепловые реле и плавкие предохранители.

Для защиты электродвигателя от перегрузки обычно применяют два тепловых реле. При установке одного реле двигатель оказался бы незащищенным от двухфазной работы. При перегорании предохранителя, включенного последовательно с нагревательным элементом теплового реле, двигатель продолжал бы работать с резко возросшим током. Размыкающие контакты обоих тепловых реле включают последовательно с катушкой контактора, поэтому срабатывание любого реле вызывает отключение электродвигателя.

Тепловые реле изготавливают в виде отдельных аппаратов или пристроенными к контакторам магнитных пускателей, причем у многих тепловых реле два нагревательных элемента через биметаллические пластинки и рычажную систему воздействуют на один и тот же контакт.

Для защиты от коротких замыканий и чрезмерных перегрузок кроме плавких предохранителей применяют *реле* постоянного и переменного тока. Схема устройства электромагнитного реле переменного тока ЭТ-520 показана на рис. 10.2. Когда через катушки 2 протекает ток, в магнитопроводе 3 появляется магнитный поток. Стальной якорь 1, укрепленный на оси 5, поворачивается, преодолевая противодействие пружины 8. При достаточном увеличении тока в катушках якорь повернется на такой угол, что контакты 9 будут разомкнуты серебряным мостиком 4.

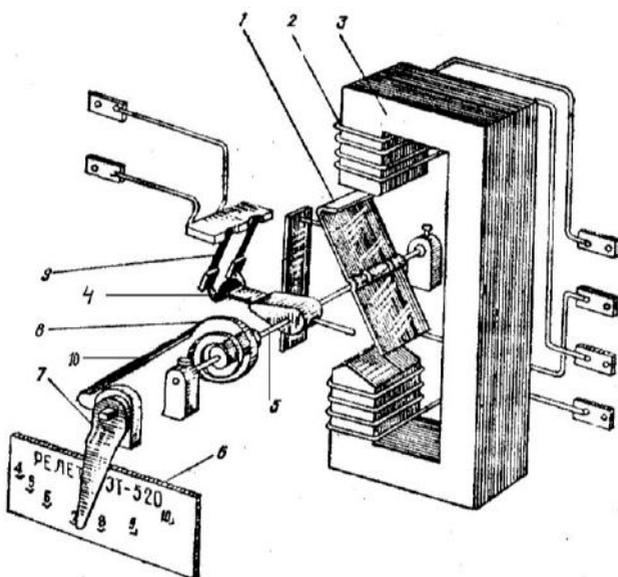


Рис. 10.2. Конструктивная схема электромагнитного реле тока

Уменьшение тока позволит пружине 8 повернуть подвижную систему реле в исходное положение. Изменение тока срабатывания, называемого *установкой реле*, производят поворотом указателя 7 на шкале 6, изменяя смещением поводка 10 степень закручивания пружины 8. Шкала 6 указывает токи срабатывания реле при последовательном соединении катушек. При параллельном соединении катушек токи срабатывания удваиваются.

Реле тока обеспечивает более надежную и быстродействующую защиту, чем плавкие предохранители.

Широкое распространение в машиностроении получили **автоматические выключатели**. Включают и отключают их вручную. При возрастании тока аппарат отключается автоматически тепловыми или электромагнитными расцепителями. Выключатель может быть снабжен тремя тепловыми расцепителями, сходными по устройству с биметаллическими тепловыми реле.

Автоматический выключатель может быть снабжен тремя электромагнитными расцепителями максимального тока, катушки которых включаются в цепи рабочего тока фаз. Эти расцепители

практически мгновенно отключают аппарат при токе, превышающем номинальный в 6...10 раз (величину этого тока можно регулировать). Выпускают также автоматические выключатели с расцепителями минимального напряжения, которые обеспечивают нулевую защиту установки.

В схемах с аппаратами ручного управления для обеспечения нулевой защиты применяют промежуточные реле (рис. 10.3). Перед началом работы станка необходимо нажать на кнопку ПП (подготовка пуска). Включится промежуточное реле РП и замкнет свой контакт РП, после чего кнопку ПП можно отпустить, а нижняя часть схемы с контактами контроллера КК-1, переключателя управления ПУ и т.д. и катушками контакторов оказывается под напряжением. При уменьшении напряжения питания до нуля или до недопустимо низких значений реле РП отпадает и его контакт РП отключает питание нижней части схемы. Наличие напряжения питания сигнализируется лампой ЛС.

Если все цепи управления схемы замыкаются одним *командоконтроллером*, можно применить схему, изображенную на рис. 10.3, б здесь промежуточное реле РП включается контактом КК-0 командоконтроллера, когда контроллер установлен в нулевое положение (другие контакты контроллера разомкнуты). При повороте контроллера в любое рабочее положение контакт КК-0 разомкнется, а другие замкнутся, при этом реле РП будет питаться через контакт самоблокировки. Если напряжение питания исчезнет, реле РП отключится. Для нового включения контакторов 1К и др. при появлении напряжения питания необходимо предварительно вернуть командоконтроллер в нулевое положение.

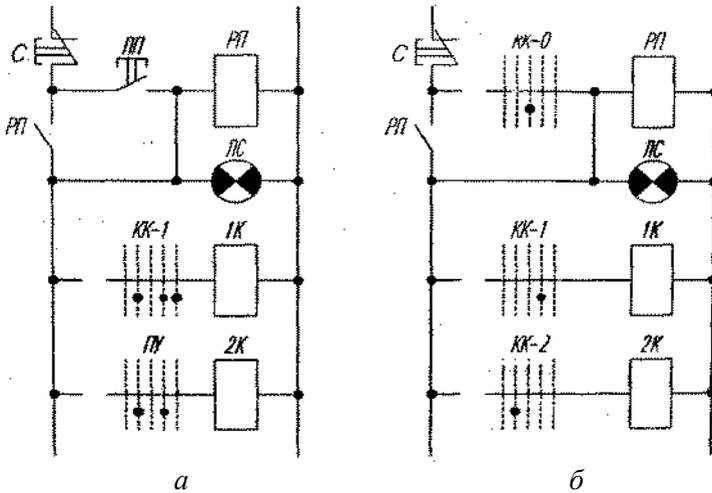


Рис. 10.3. Нулевая защита в схемах с командоконтроллером

## Лекция 11. БЕСКОНТАКТНАЯ АППАРАТУРА. ДАТЧИКИ

Бесконтактная аппаратура находит все более широкое применение в электрооборудовании машиностроительного производства благодаря таким достоинствам, как высокая допустимая частота включений, долговечность, быстродействие, надежность и др. Функции реле выполняют логические элементы, а функции контакторов – бесконтактные переключающие устройства (тиристорные и транзисторные). В качестве командоаппаратов используются бесконтактные аппараты, в основном сельсинного типа. Для контроля различных физических величин применяются разнообразные датчики: скорости, тока, положения, температуры и др.

В электроприводе металлорежущих станков в качестве **датчиков положения** широко используются путевые и конечные выключатели. Все более широкое применение находят переключатели, срабатывающие без механического воздействия.

На рис. 11.1 представлена схема датчика положения на основе Геркона, управляемого полем постоянного магнита. В немагнитном

корпусе 1 расположены геркон 2 и воздействующий на его контакты постоянный магнит 3. При вхождении в щель ферромагнитной полосы 4 магнитный поток  $\Phi$  постоянного магнита шунтируется, контакты геркона переключаются, переходя в исходное положение.

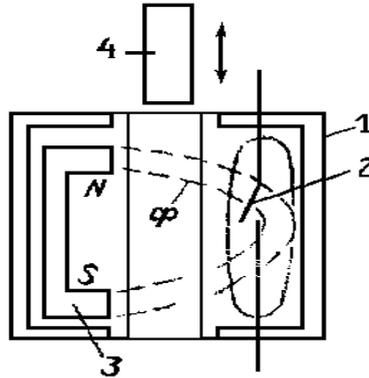


Рис. 11.1. Схема датчика положения на герконе

В бесконтактных системах управления в качестве датчиков положения и задающих устройств широко используются сельсинные командоаппараты в различных исполнениях (рычажном, педальном).

На рис. 11.2, а представлена схема *сельсинного командоаппарата*. Однофазная статорная обмотка возбуждения сельсина *ОВ* питается от сети переменного тока частотой 50 Гц. Она создает магнитный поток, который в каждой фазе трехфазной обмотки ротора индуцирует ЭДС. Выходным напряжением сельсина является разность ЭДС фаз 1 и 3 (обмотка фазы 2 не используется):

$$U_{\text{ВЫХ}} = E_1 - E_3 = \sqrt{3} \cdot E_{\text{max}} \cdot \sin \beta,$$

где  $\beta$  – угол сдвига фаз вторичной и первичной обмоток;

$E_{\text{max}}$  – максимальное значение индуцируемой ЭДС, при совпадении оси данной обмотки (1 или 3) с осью обмотки *ОВ* (рис. 11.2, в).

Изменяя угол поворота ротора сельсина, можно изменять величину управляющего сигнала, подаваемого в схему управления электроприводом, и этим самым управлять работой двигателя (включать, отключать, изменять скорость). Рукоятка бесконтактного командоаппарата имеет ряд положений (фиксированных). Выходное напряжение сельсина составляет 0–10 В, выходной ток – до 0,4 А. Выходное напряжение сельсина через трансформатор Т подается на фазочувствительное выпрямительное устройство ФВУ и после его преобразования – в схему управления.

При использовании сельсина в качестве датчика положения на его ротор воздействует перемещающийся механизм.

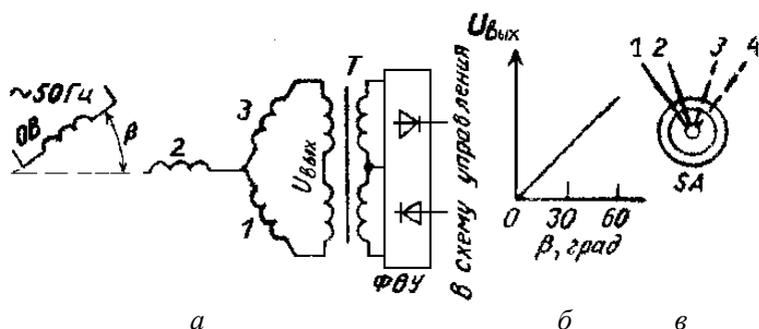


Рис. 11.2. Сельсинный командоаппарат:  
а – схема; б – статическая характеристика; в – условное обозначение

**Датчик скорости** используется для контроля угловой скорости двигателей. Наиболее широко в качестве датчиков скорости применяются тахогенераторы постоянного и переменного тока, представляющие собой электрические машины малой мощности, работающие в режиме генератора. Тахогенераторы переменного тока не имеют контактов, что является их достоинством. Различают синхронные и асинхронные тахогенераторы. Синхронные тахогенераторы представляют собой небольшую синхронную машину с ротором в виде постоянного магнита. Выходной величиной такого тахогенератора наряду с ЭДС является и частота.

В электроприводе применяются также импульсные датчики скорости, основанные на модуляции светового потока, направленного от источника излучения через диск с прорезями на

фотоприемник. Частота выходного сигнала пропорциональна угловой скорости.

В качестве **датчиков тока** используются шунты, трансформаторы тока, датчики с использованием эффекта Холла.

Для управления автоматизированным электроприводом широко используются бесконтактные **логические элементы**.

На рис. 11.3 приведены условные графические обозначения основных бесконтактных логических элементов и эквивалентные им контактные схемы. Входные сигналы обозначены  $X1$ ,  $X2$ , выходной –  $Y$ .

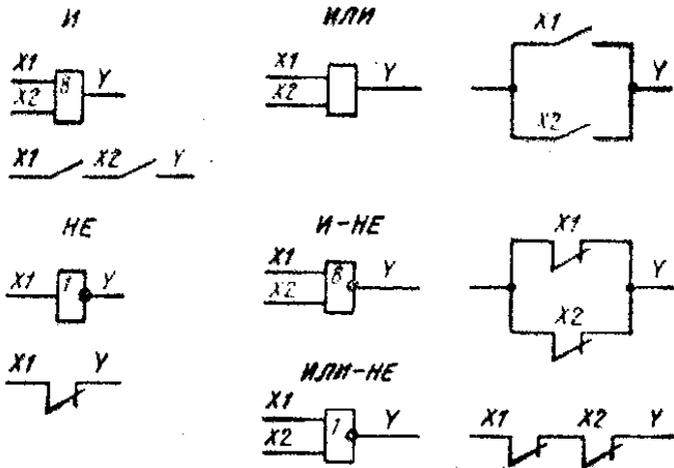


Рис. 11.3. Графическое изображение логических элементов

Логический элемент так же, как и обычное реле, может находиться в одном из двух противоположных состояний: «Включено» или «Отключено», что соответствует логическим понятиям «Да» (цифра «1») или «Нет» (цифра «0»).

Элемент И осуществляет логическое умножение (сигнал  $Y$  появится при наличии сигналов  $X1$  и  $X2$ ), элемент ИЛИ – логическое сложение (сигнал  $Y$  появится при наличии хотя бы одного сигнала  $X1$  или  $X2$ ). Элемент НЕ осуществляет логическое отрицание (сигнал на выходе появится лишь при отсутствии сигнала на входе).

Элемент И–НЕ является комбинацией двух логических элементов. Сигнал на выходе исчезнет ( $Y = 0$ ) лишь при наличии сигналов на обоих входах. Во всех остальных случаях входных сигналов на выходе будет сигнал «1».

Элемент ИЛИ–НЕ характеризуется тем, что сигнал на выходе появится лишь при отсутствии сигналов на обоих входах. При подаче сигнала на любой вход (или на оба входа) сигнал на выходе исчезнет ( $Y = 0$ ).

Элемент ПАМЯТЬ имеет два входа и характеризуется тем, что при подаче сигнала на первый вход появляется сигнал на выходе, который остается там после снятия сигнала с этого входа, а для снятия сигнала с выхода необходимо подать сигнал на второй вход. На рис. 11.4 элемент ПАМЯТЬ выполнен на триггере Т и элементах ИЛИ–НЕ. При нажатии на кнопку SB1 на первый вход триггера Т подается сигнал «1», который сохраняется и после отпускания кнопки SB1. При нажатии на кнопку SB2 на второй вход триггера Т подается сигнал «1», который обеспечивает переключение триггера и появление на его выходе «0», остающегося также и после отпускания кнопки SB2.

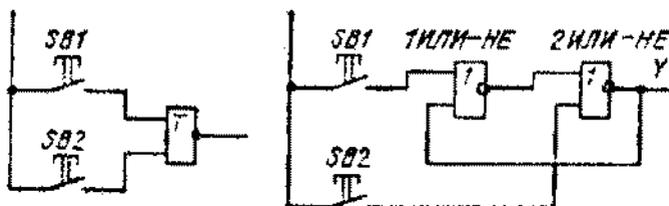


Рис. 11.4. Схема элемента ПАМЯТЬ

Мощность выходных цепей серийных логических элементов не превышает 5 Вт. Поэтому для управления исполнительными устройствами (контакторами, электромагнитами и т.п.) используют промежуточные усилители, входящие в номенклатуру серии логических устройств.

На рис. 11.50 представлена схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором в функции времени с использованием логических элементов. Пуск осуществляется в три ступени. В схеме предусмотрена ячейка ПАМЯТЬ на триггере Т. При нажатии на кнопку SB1 на выходе триггера Т появится сигнал «1» и с помощью

усилителя А включится линейный контактор КМ1. Сигнал на выходе триггера Т сохранится и после отпускания кнопки SB1. Сигнал с выхода триггера Т подается одновременно через цепочку R-C1 (задержка времени) и усилитель А1 на контактор ускорения КМ2, который включится с заданной задержкой времени и выведет первую ступень пускового реостата. Затем аналогично включатся с задержками времени (R-C2, R-C3) ускоряющие контакторы КМ3 и КМ4, после чего пуск двигателя будет закончен.

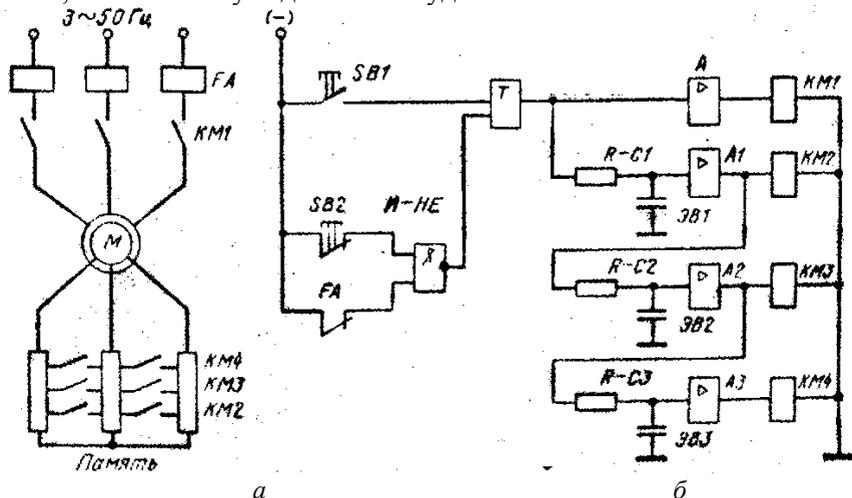


Рис. 11.5. Схема автоматического пуска АД с использованием логических элементов

Отключение двигателя осуществляется либо кнопкой SB2, либо размыкающими контактами максимального реле FA. При этом триггер Т перебрасывается, сигнал на его выходе исчезает, все контакторы отключаются и двигатель останавливается.

Более совершенными являются схемы, выполненные полностью на бесконтактных элементах. Вместо контакторов там используются тиристорные или транзисторные выходные элементы, командные элементы также выполняются бесконтактными.

## Лекция 12. КРИТЕРИИ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО НАГРЕВУ

## ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

*Цель:* изучить основные критерии выбора электродвигателей, режимы работы электродвигателей по нагреву и методы расчета их номинальной мощности при различных режимах работы (продолжительном с постоянной и переменной нагрузками, повторно-кратковременном и кратковременном).

Наиболее трудоемким и ответственным этапом проектирования электропривода для производственного механизма является выбор электродвигателя. Задача выбора состоит в поиске такого двигателя, который обеспечит по мощности заданный технологический цикл рабочей машины, будет соответствовать условиям окружающей среды, компоновке с рабочей машиной и при этом иметь нормативный (допустимый) нагрев. В общем случае электропривод должен удовлетворять ряду требований, даже противоречивых (поэтому при выборе электродвигателя в конкретном случае приходится руководствоваться технико-экономическими соображениями).

Для электропривода производственного механизма следует выбирать наиболее простой двигатель по устройству и управлению, экономичный и надежный в эксплуатации, имеющий наименьший вес, габариты и стоимость. Вместе с тем двигатель должен полностью удовлетворять требованиям технологического процесса и соответствовать условиям окружающей среды, в которой он будет находиться во время эксплуатации.

Для правильного выбора электродвигателя для конкретного производственного механизма следует руководствоваться критериями выбора по следующим показателям: мощности, скорости, напряжению, роду тока, условиям эксплуатации, конструктивному исполнению монтажа.

*Мощность электродвигателя* должна соответствовать нагрузке на его валу, так как *недостаточная* мощность может привести к нарушению нормальной работы механизма, снижению его производительности, перегреву электродвигателя (из-за возможных перегрузок) и сокращению его срока службы и даже к возникновению аварийной ситуации, а *излишняя мощность* увеличивает капитальные затраты и эксплуатационные расходы

вследствие недогрузки электродвигателя и снижения его КПД (у АД коэффициента мощности). Поэтому определение номинальной мощности электродвигателя выполняются в соответствии с нагрузочными диаграммами механизмов и режимами их работы.

**Скорость электродвигателя** выбирается такой, чтобы обеспечить необходимый технологический процесс производственного механизма. При заданном передаточном числе редуктора или другой передачи этот вопрос решается однозначно, т.е. по известному передаточному отношению и заданной скорости производственного механизма. Выбор номинальной скорости электродвигателя и передаточного числа редуктора вновь проектируемого электропривода должен производиться путем технико-экономического сравнения нескольких вариантов, исходя из определенного критерия оптимальности: быстродействия, минимума стоимости редуктора, двигателя и др.

**Выбор электродвигателя по напряжению** для механизмов действующего предприятия производится по напряжениям существующих на предприятии сетей переменного и постоянного тока. Выбор напряжения для питания электродвигателей вновь сооружаемого предприятия решается совместно с выбором напряжений для всего предприятия в целом путем технико-экономического сравнения нескольких вариантов электроснабжения.

АД малой и средней мощности выпускаются с номинальными напряжениями 220/127, 380/220 и 660 В. АД и СД средней и большой мощности выпускаются на напряжения 3, 6 и 10 кВ. Наиболее распространенными номинальными напряжениями двигателей постоянного тока (ДПТ) являются 110, 220 и 440 В. При значительной мощности ДПТ номинальные напряжения лежат в пределах 660...900 В.

**По роду тока** для производственных механизмов могут применяться ДПТ с различным возбуждением (параллельного, независимого, последовательного, смешанного) и переменного тока: АД с короткозамкнутым или фазным ротором и СД.

Наиболее простыми по устройству и управлению, надежными и экономичными в эксплуатации, имеющими наименьший вес, габариты и стоимость при определенной мощности, являются АД с

короткозамкнутым ротором. Их вес на единицу мощности в 1,5...2,0 раза ниже, чем у ДПТ.

АД по сравнению с ДПТ имеют еще одно преимущество: питание их осуществляется непосредственно от сети трехфазного тока, т.е. для них не требуются сложные и дорогие преобразовательные устройства переменного тока в постоянный.

Чаще всего АД применяются при невысокой частоте включений, когда не требуется регулирование скорости или возможно ее ступенчатое регулирование. В настоящее время перспективными являются и установки с глубоким регулированием скорости АД при частотном управлении.

В установках, где требуется регулирование в относительно небольших пределах, плавный пуск, хорошие тормозные качества, ограничение токов в переходных режимах, применяются АД с фазным ротором. Характерной особенностью этих двигателей является уменьшение с помощью реостатов их пусковых токов при одновременном увеличении пускового момента. АД с фазным ротором широко применяется для привода механизмов с частыми пусками и торможениями.

Для механизмов средней и большой мощности, где не требуется регулирование скорости, перспективным является использование СД, которым присущи такие положительные качества, как жесткость механической характеристики, высокая перегрузочная способность, меньшая по сравнению с АД зависимость критического момента от напряжения сети, высокие энергетические показатели, возможность компенсации реактивной энергии.

Для механизмов с высокими требованиями в отношении регулирования скорости, качества работы в динамических режимах, с частыми пусками и остановками применяются электродвигатели постоянного тока, при этом в зависимости от характера статического момента на валу и диапазона регулирования используются ДПТ независимого (параллельного), последовательного или смешанного возбуждения. Их использование в этих случаях связано с необходимостью применения преобразователей переменного тока в постоянный.

В регулируемых электроприводах применяют системы, которые при выполнении технологических требований оказываются более выгодными экономически. Поэтому чаще всего экономическое сравне-

ние регулируемых электроприводов ведут в такой последовательности: полюсно-переключаемые АД, АД с фазным ротором и реостатным регулированием скорости, система «управляемый преобразователь напряжения – ДПТ», система «преобразователь частоты – АД».

При выборе электродвигателя необходимо учитывать *условия эксплуатации*, под которыми понимают воздействие климатических факторов и состояние окружающей среды. Электродвигатели изготавливаются для работы в умеренном климате, умеренном и холодном, тропическом, морском. Климатические условия характеризуются максимальной, минимальной и средней температурами. Например, эти температуры составляют + 40, -45 и +10 °С – для умеренного климата, +45, -10 и +27 °С – для тропического, +40, -40 и +10 °С – для морского климата.

*По способу защиты* электродвигателя от воздействия окружающей среды различают:

– *защищенные электродвигатели*, у которых все вращающиеся и токоведущие части предохранены от случайного прикосновения человека и попадания внутрь посторонних предметов и капель воды, падающих отвесно или под углом не более 60° к вертикали (у этих двигателей имеются защитные приспособления в виде коробов, решеток, сеток);

– *закрытые электродвигатели*, которые бывают обдуваемые, продуваемые и герметические. У *обдуваемых* электродвигателей (с самовентиляцией) на валу укреплен вентилятор, который засасывает воздух и прогоняет его через ребристый корпус. У *продуваемых* электродвигателей (с независимой вентиляцией) воздух для охлаждения подводится через трубы отдельным от двигателя вентилятором. Герметические (взрывозащитные) электродвигатели предназначены для работы во взрывоопасных помещениях.

По способу вентиляции двигатели выполняются с естественной, с самовентиляцией и независимой вентиляцией. При *естественной* вентиляции двигатели не имеют каких-либо специальных устройств для охлаждения. У двигателей с *самовентиляцией* охлаждение осуществляется вентилятором, смонтированным на валу двигателя. При *закрытом исполнении* вентилятор устанавливается снаружи под

кол-паком. Он обдувает ребристую поверхность двигателя (такие двигатели называются *обдуваемыми*).

Интенсивность охлаждения электродвигателей с естественной вентиляцией и самовентиляцией зависит от угловой скорости вала двигателя и ухудшается при ее снижении. Охлаждение двигателей при независимой вентиляции осуществляется с помощью специального вентилятора, приводимого в движение дополнительным двигателем, что позволяет несколько повысить нагрузку главного двигателя, особенно при снижении его скорости.

*Закрытые электродвигатели* более сложны по конструкции защитных устройств. Они не имеют специальных отверстий для обмена воздухом между двигателем и окружающей средой. Взрывозащищенные двигатели снабжаются специальным кожухом, который без повреждений может противостоять взрыву внутри двигателя и препятствует распространению пламени в окружающую среду. *Водозащищенные двигатели* выполняются с усиленными уплотнениями крышек при помощи резиновых прокладок, а выступающий конец вала проходит через специальный сальник. У *герметичных двигателей* все отверстия и соединения закрыты и уплотнены так тщательно, что исключается всякое сообщение между внутренним пространством машины и внешней газовой средой или жидкостью. Герметичные двигатели могут работать погруженными в воду.

Выбор электродвигателя по способу защиты от действия окружающей среды должен производиться в зависимости от условий, в которых он будет работать.

Большое значение имеет правильный выбор электродвигателя по ***конструктивному исполнению в отношении монтажа***. Для большинства производственных механизмов применяют электродвигатели с горизонтальным расположением вала и лапами для крепления к несущим конструкциям. Для некоторых механизмов целесообразным является применение двигателей с вертикальным расположением вала и креплением на лапах. Выпускаются электродвигатели с вертикальным или горизонтальным расположением вала и фланцевым креплением. В наибольшей степени в конструктивные формы механизмов вписываются встраиваемые электродвигатели, которые не имеют станины, подшипниковых щитов, а иногда и вала. Монтируются

они в корпусах производственных механизмов и иногда непосредственно выполняют функции рабочих органов.

Для обозначения конструктивного исполнения по способу монтажа применяют латинские буквы IM (от англ. International Mounting) и следующие за ними четыре цифры. Первая цифра показывает группу конструктивного исполнения (на лапах, без лап, с фланцем и т.д.), вторая и третья – способы монтажа, а четвертая – исполнение конца вала (цилиндрический, конический и др.). Например: IM1001 – электродвигатель с двумя подшипниковыми щитами, на лапах, вал горизонтальный; IM1011 – то же, но с вертикальным валом.

**Нагрев и охлаждение электродвигателей.** Процесс преобразования электрической энергии в механическую в электродвигателе сопровождается потерями мощности  $\Delta P$ , которые превращаются в тепло. В результате отдельные части электродвигателя нагреваются. Особенно чувствительна к повышению температуры изоляция обмоток, срок службы которой в значительной мере определяет срок службы электродвигателя. Поэтому наибольшая допустимая температура  $t^{\circ}_{\text{доп}}$  электродвигателя определяется применяемыми изоляционными материалами для изготовления его обмоток.

Изоляционные материалы по нагревостойкости делятся на 7 классов (*Y, A, E, B, F, H, C*), из которых наиболее распространенными для электроприводов являются:

**класс A** – хлопчатобумажные ткани и шелк, пропитанные в жидком диэлектрике,  $t^{\circ}_{\text{доп}} = 105^{\circ}\text{C}$ ;

**класс E** – синтетические органические пленки (эмали),  $t^{\circ}_{\text{доп}} = 120^{\circ}\text{C}$ ;

**класс B** – слюда, асбест, стекловолокно,  $t^{\circ}_{\text{доп}} = 130^{\circ}\text{C}$ ;

**класс F** – слюда, асбест, стекловолокно с синтетическими связывающими веществами и с пропитыванием диэлектрическими составами,  $t^{\circ}_{\text{доп}} = 155^{\circ}\text{C}$ .

Срок службы изоляции при указанных предельных температурах примерно 15–20 лет.

Номинальная мощность электродвигателя относится к температуре окружающей среды  $+40^{\circ}\text{C}$ . При меньшей температуре, чем  $+40^{\circ}\text{C}$ , допустимая длительная нагрузка электродвигателя

может быть больше номинальной, а при температуре окружающей среды более +40 °С допустимая длительная нагрузка должна быть меньше номинальной.

Для электродвигателей нормируется не допустимая температура обмоток, а допустимое превышение их температуры над температурой окружающей среды, называемое *перегревом  $\tau$* .

При постоянной нагрузке нагрев электродвигателя описывается уравнением

$$\tau = t^{\circ} - t_{\text{окр ср}}^{\circ} = \tau_y (1 - e^{t/T_n}) + \tau_0 e^{-t/T_n},$$

где  $\tau_y = Q / A$  – установившийся перегрев, °С;

$Q$  – количество тепла, выделяемое электродвигателем в единицу времени, Дж / с;

$A$  – количество тепла, отдаваемое электродвигателем в окружающую среду в единицу времени при разности температур в 1 °С (теплоотдача), Дж / (с · °С);

$\tau_0$  – начальный перегрев (в момент времени  $t = 0$ );

$T_n = C / A$  – *постоянная времени нагрева*, т.е. скорость нарастания температуры электродвигателя;

$C$  – теплоемкость электродвигателя, т.е. количество тепла, необходимое для повышения температуры двигателя на 1 °С, Дж / °С.

Зависимость  $\tau = f(t)$  представлена на рис. 12.1 кривой 1. Величина  $\tau_y$  является асимптотой этой кривой. Практически процесс нагревания считается законченным, когда  $t = (3-4) T_n$ . Например, при  $t = 4T_n$   $\tau = 0,982 \tau_y$ , т.е. разница между  $\tau$  и  $\tau_y$  меньше двух процентов.

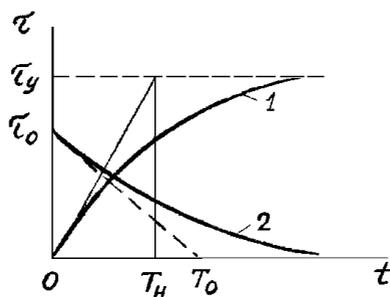


Рис. 12.1. Кривые нагрева (1) и охлаждения (2) двигателя

При отключении от сети нагретого электродвигателя он начнет охлаждаться. Уравнение его охлаждения имеет вид (см. рис. 12.1):

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T_0}.$$

Остывание электродвигателя происходит медленнее, чем нагревание, что объясняется отсутствием его вентиляции при  $\omega = 0$ .

Из приведенных уравнений следует, что процессы нагревания и охлаждения электродвигателя зависят практически от величин  $\tau_y$ ,  $T_n$  и  $T_0$ . Величина  $\tau_y$  прямо пропорциональна количеству тепла, выделяемого в электродвигателе и определяемого в основном потерями в обмотках, и обратно пропорциональна коэффициенту теплоотдачи, который в значительной степени зависит от вентиляции двигателя: чем лучше вентиляция, тем меньше  $\tau_y$ . Установившийся тепловой режим наступает тогда, когда все выделяемое в двигателе тепло отдается в окружающую среду, т.е. когда температура двигателя становится неизменной ( $\tau = \tau_y = \text{const}$ ).

Величина  $T_n$  зависит от размеров электродвигателя и его конструкции: чем больше размеры, тем больше теплоемкость. А так как  $T_n$  прямо пропорциональна теплоемкости  $C$ , то с увеличением габаритов электродвигателя она увеличивается. У защищенных электродвигателей малой мощности  $T_n$  составляет 20...30 мин, а у закрытых двигателей большой мощности 2–3 ч.

**Основные режимы работы электродвигателей по нагреву.** Величина нагрузки электродвигателя в процессе его работы может

изменяться различным образом, при этом он может периодически или эпизодически отключаться от сети на некоторое время. Поэтому нагрев электродвигателя при его работе не является постоянным. Стандарт устанавливает восемь номинальных режимов работы электропривода с условными обозначениями от S1 до S8. Из них основными являются режимы S1...S3, а остальные (S4...S8) – это модификации основных режимов. Рассмотрим основные режимы:

**S1 – продолжительный** (или *длительный*) – перегрев электродвигателя достигает установившегося значения  $\tau_y$  (рис. 12.2, а). Длительность рабочего периода  $t_p > 3T_n$ , длительность паузы роли не играет. В продолжительном режиме работают двигатели насосов, компрессоров, конвейеров, прокатных станков и т.п. Различают продолжительный режим с постоянной и с переменной нагрузкой;

**S2 – кратковременный** – периоды постоянной нагрузки чередуются с отключениями, при этом  $\tau$  не достигает  $\tau_y$  ( $t_p \leq 3T_n$ ), а во время отключения электродвигатель охлаждается до температуры окружающей среды ( $t_0 > 3T_0$ ), рис. 12.2, б. Для кратковременного режима рекомендуется продолжительность рабочего периода 15, 30, 60, 90 мин. В таком режиме работают электродвигатели подъемников, приводов заслонок, задвижек и т.п.;

**S3 – повторно-кратковременный** – периоды с постоянной нагрузкой (рабочие периоды) чередуются периодически с отключениями электродвигателя (паузами), при этом перегрев  $\tau$  за время одного рабочего цикла  $t_{ц}$  не достигает  $\tau_y$  (рис. 12.2, в). При повторно-кратковременном режиме время цикла не более 10 мин (в противном случае двигатель считается работающим в продолжительном режиме по нагреву).

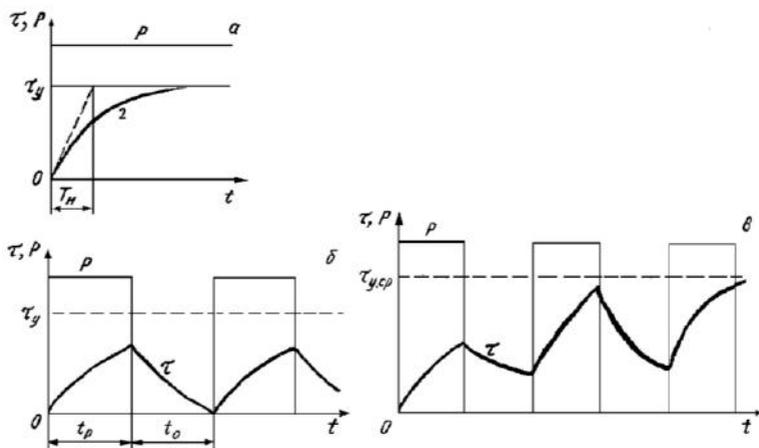


Рис. 12.2. Графики номинальных режимов электроприводов

Повторно-кратковременный режим характеризуется относительной продолжительностью включения ПВ в процентах:

$$ПВ = t_p / (t_p + t_o) 100 \% = (t_p / t_{ц}) 100 \%$$

Стандартные значения ПВ = 15, 25, 40 и 60 %.

Повторно-кратковременный режим характеризуется условиями  $t_p < 3T_n$ , т.е. за время одного рабочего периода перегрев не достигает  $\tau_y$ , а за время паузы не становится равным нулю. При многократном повторении циклов процесс нагрева устанавливается (температура перегрева в начале и в конце цикла одинакова,  $\tau$  колеблется около среднего значения  $\tau_{y,ср}$ ). В повторно-кратковременном режиме работают электроприводы кранов, некоторых вспомогательных механизмов прокатных станков и т.п.

### **Лекция 13. ПОСТРОЕНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ ДИАГРАММ МЕХАНИЗМА И ЭЛЕКТРОПРИВОДА. МЕТОДЫ РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКЕ**

Принято различать нагрузочные диаграммы механизма и электропривода. Под нагрузочной диаграммой механизма понимают за-висимость момента сопротивления механизма  $M_M$  или

мощности  $P_M$  от времени. Вместе с нагрузочной диаграммой механизма дается или рассчитывается скоростная диаграмма  $\omega_M(t)$ .

Для электропривода нагрузочная диаграмма ( $M = f(t)$  или  $P = f(t)$ ) более сложна, так как она определяется не только статическими режимами работы, но и переходными процессами электропривода. Переходные процессы в системе электропривода оказывают заметное влияние на момент, развиваемый двигателем, и соответственно на зависимость  $M(t)$ . К ним прежде всего относятся: включение двигателя в сеть и его отключение, изменение параметров подводимого напряжения, главных цепей и цепей возбуждения и т.п. В таких случаях  $d\omega/dt \neq 0$ . Поэтому при построении нагрузочной диаграммы электропривода  $M(t)$  следует пользоваться уравнением движения.

Для электроприводов, работающих длительно с постоянной нагрузкой и скоростью, можно не учитывать потери энергии в переходных процессах, т.е. не учитывать динамическую составляющую момента двигателя и считать  $M(t) = M_c = \text{const}$  и  $P(t) = P_c = \text{const}$ .

Формулы для расчета мощности и момента производственных механизмов определяются спецификой их работы и относительно просты. Например, мощность насоса зависит от массы перекачиваемой жидкости и скорости ее движения, мощность подъемного механизма определяется весом поднимаемого груза и скоростью подъема, мощность двигателя шпинделя металлорежущего станка – усилием резания и скоростью резания и т.д.

Более сложным представляется построение нагрузочной диаграммы электропривода, когда скорость, ускорение и другие показатели системы не остаются постоянными в процессе работы механизма. В качестве примера рассмотрим построение нагрузочной диаграммы лифта для рабочего участка, на котором кабина лифта разгоняется до определенной скорости, движется некоторое время с постоянной скоростью, а затем затормаживается.

По соответствующим формулам можно рассчитать статическую нагрузку лифта  $M_c(t)$ . Заданными для кабины лифта являются скорость движения кабины  $\omega$ , а также максимальные значения величин  $d\omega/dt$  и  $d^2\omega/dt^2$ , которые обуславливаются соответствующими нормами.

Нагрузочная диаграмма лифта строится в виде графика (рис. 13.1), состоящего из семи участков. Первым строится участок 4-го графика, на котором  $d\omega/dt = \text{const}$ . Затем можно построить участки 2 и 6, на которых постоянными являются ускорение и замедление, а скорость увеличивается и уменьшается по линейному закону. Участки 1, 3, 5, 7 характеризуются линейным изменением ускорения (замедления), когда вторая производная от скорости по времени (рывок) остается постоянной, обусловленной нормами, а скорость изменяется по параболическому закону.

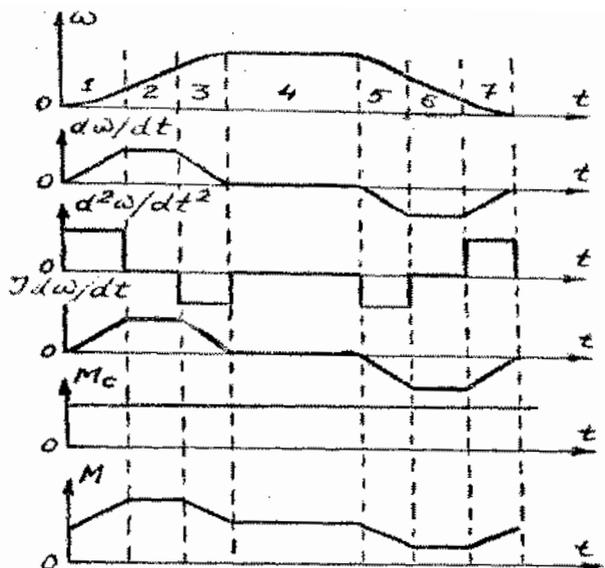


Рис. 13.1. К построению нагрузочной диаграммы ЭП пассажирского лифта

По известному моменту инерции  $J$  системы электропривода лифта можно построить график  $J d\omega/dt = f(t)$ , так как  $d\omega/dt$  известна.

Таким образом, имеются все данные для построения графика  $M(t)$ :

$$M(t) = M_c + J d\omega/dt.$$

На основании графиков  $M(t)$  и  $\omega(t)$  можно построить зависимость  $P(t) = M(t) \cdot \omega(t)$  и далее перейти к выбору электродвигателя по мощности, если по данной методике будут построены нагрузочные графики и для других участков движения кабины лифта.

**Методы расчета мощности электродвигателя при переменной нагрузке.** В электроприводах, у которых мощность на валу электродвигателя изменяется по определенному нагрузочному графику (рис. 13.2), электродвигатель сначала *выбирают по наибольшей мощности* этого графика с учетом его перегрузки, а затем выбранный электродвигатель *проверяют по нагреву*. Примерами электропривода с переменной нагрузкой на валу электродвигателя являются электроприводы многооперационных станков, кулачковых автоматов и др. Форма нагрузочного графика зависит от обрабатываемой детали, мощности и продолжительности отдельных переходов цикла обработки детали. При этом электродвигатель вращается непрерывно почти с постоянной скоростью, хоть его механическая характеристика имеет большую жесткость.

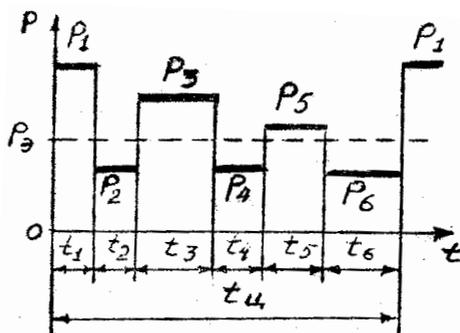


Рис. 13.2. Нагрузочный график при переменной нагрузке

Для проверки выбранного электродвигателя по нагреву при переменной нагрузке существуют следующие четыре метода:

- 1) метод эквивалентного тока  $I_3$ ;
- 2) метод эквивалентного момента  $M_3$ ;
- 3) метод эквивалентной мощности  $P_3$ ;
- 4) метод средних (эквивалентных) потерь.

Рассмотрим эти методы.

**Метод средних (эквивалентных) потерь.** При переменной нагрузке (в станкостроении и других областях) наиболее часто используют обычные электродвигатели, предназначенные для длительного режима работы с постоянной нагрузкой. Поэтому электродвигатель выбирают на такую постоянную мощность  $P_3$  длительного режима работы, при которой в электродвигателе выделяется столько же тепла за время цикла работы  $t_{ц}$ , сколько и при работе при переменной нагрузке:

$$Q_3 \cdot t_{ц} = \sum(Q_i \cdot t_i) \quad \text{или} \quad \Delta P_3 \cdot t_{ц} = \sum(\Delta P_i \cdot t_i),$$

где  $Q_3$  – количество тепловой энергии, выделяемой в электродвигателе мощностью  $P_3$  в единицу времени;

$\Delta P_3$  – потери мощности в электродвигателе при работе с мощностью  $P_3$ ;

$\Delta P_i$  – потери мощности в электродвигателе при работе с мощностью  $P_i$ .

Отсюда получаем формулу средних потерь:

$$\Delta P_3 = \sum(\Delta P_i \cdot t_i) / t_{ц}. \quad (13.1)$$

Метод средних (эквивалентных) потерь для проверки электродвигателя по нагреву, предварительно выбранного по перегрузке, основан на использовании этой формулы средних потерь и состоит в следующем:

1. Используя нагрузочный график, определяют:

$$\Delta P_i = P_i / \eta_i - P_i,$$

где  $\eta_i$  – КПД электродвигателя при работе с мощностью  $P_i$ .

В достаточно подробных технических данных АД приводят значения КПД при нагрузках 1/4, 2/4, 3/4, 4/4 и 5/4 от  $P_n$ . По этим данным строят график  $\eta = f(P)$ , из которого определяют значения  $\eta_i$ .

Для приближенных расчетов (и при отсутствии данных для построения графика  $\eta = f(P)$ ) можно использовать формулу

$$\eta_i \approx \eta_n \sqrt[3]{P_i/P_n}.$$

2. Вычисляют  $\Delta P_3$  по формуле (13.1) и проверяют выполнение условия  $\Delta P_3 \leq \Delta P_n$ .

Если это условие не выполняется, берут следующий по номинальной мощности электродвигатель из каталога и т.д. до выполнения данного условия.

**Метод эквивалентного тока.** Если в формуле (13.1) потери мощности разделить на *постоянные* и *переменные*, пропорциональные квадрату тока нагрузки  $I^2$ , получим

$$\Delta P_{\text{пост}} + b \cdot I_3^2 = \sum ((\Delta P_{\text{пост}} + b \cdot I_i^2) \cdot t_i) / t_{\text{ц}}, \quad (13.2)$$

где  $b$  – величина, постоянная для конкретного двигателя.

Так как  $\Delta P_{\text{пост}} \cdot t_{\text{ц}} = \Delta P_{\text{пост}} \cdot \sum t_i$ , то после преобразований и решения (13.2) относительно  $I_3$  получим

$$I_3 = \sqrt{\sum (I_i^2 \cdot t_i) / t_{\text{ц}}}. \quad (13.3)$$

Эта формула соответствует нагрузочному графику (см. рис. 13.2) с прямоугольными участками. Если нагрузочный график  $I = f(t)$  содержит треугольные и трапециевидальные участки (рис. 13.3), в формулу (13.3) вместо  $I_1$  и  $I_5$  следует подставлять

$$I_{13} = I_1 / \sqrt{3}; \quad I_{53} = \sqrt{(I_4^2 + I_4 \cdot I_5 + I_5^2) / 3}.$$

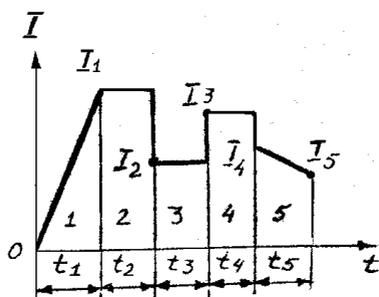


Рис. 13.3. Нагрузочный график  $I = f(t)$

*Метод эквивалентного тока* основан на использовании формулы (13.3) при проверке электродвигателя по нагреву и состоит в следующем:

1. Рассчитывают  $I_3$  по (13.3), используя нагрузочный график  $I = f(t)$ .

2. По каталогу (зная предварительно род тока, напряжение, скорость вращения и другие данные) выбирают электродвигатель с номинальным током  $I_n \geq I_3$ .

Данный метод применим к электродвигателю любого типа.

**Метод эквивалентного момента.** Для ДПТ НВ и АД метод эквивалентного тока можно заменить методом эквивалентного момента, использующего формулу эквивалентного момента

$$M = \sqrt{\sum (M_i^2 \cdot t_i) / t_{ц}},$$

так как для ДПТ при  $\Phi = \text{const}$  ток пропорционален моменту, а для АД при небольших значениях скольжения (на рабочем участке) момент можно считать примерно пропорциональным току.

**Метод эквивалентной мощности.** Если скорость вращения электродвигателя во время работы изменяется незначительно, что характерно для электродвигателей с жесткими механическими характеристиками, то мощность примерно пропорциональна моменту. Тогда можно пользоваться методом эквивалентной мощности, использующим формулу эквивалентной мощности,

$$P_3 = \sqrt{\sum (P_i^2 \cdot t_i) / t_{ц}}$$

Эта формула более удобна, чем формула средних потерь, в которой необходимы дополнительные вычисления КПД  $\eta_i$ .

Данный метод используют также и при небольшом числе пусковых процессов (до 20 в час), пренебрегая их влиянием на нагрев электродвигателя.

#### **Лекция 14. РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ**

**А. Нагрузка постоянная.** Если электродвигатель должен работать с постоянной или мало изменяющейся нагрузкой (электроприводы насосов, вентиляторов, конвейеров, крупных металлорежущих станков), его мощность рассчитывается по эмпирическим формулам с учетом поправочных коэффициентов.

**Примеры** таких формул:

1. Если известны усилие резания  $F$  (Н) и скорость резания  $V$  (м/мин), то мощность электродвигателя  $P$  (кВт) на валу (с учетом потерь в механических передачах)

$$P = F \cdot V / (1000 \cdot 60 \cdot \eta_{пер}).$$

2. Для электропривода насоса

$$P = Q \cdot H \cdot \gamma \cdot 10^{-3} / (\eta_{нас} \cdot \eta_{пер}), \text{ кВт},$$

где  $Q$  – производительность, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – высота напора, м;

$\gamma$  – плотность жидкости, Н/м<sup>3</sup>;

$\eta_{нас}$  – КПД насоса.

По каталогу выбирается электродвигатель с номинальной мощностью  $P_n \geq P$ . Тип двигателя выбирается с учетом окружающей среды, сопряжения с механизмом, рода тока, напряжения, скорости вращения и других технических требований (по пусковому моменту, например). Так как двигатель выбирается

по условию  $P_n \geq P$ , то выполняются и условия  $\Delta P_n \geq \Delta P_n$  и  $\tau_y \leq \tau_{\text{доп}}$ . Поэтому *при постоянной продолжительной нагрузке дополнительных расчетов по определению нагрева двигателя не требуется.*

**Б. нагрузка переменная.** При продолжительном режиме работы с переменной нагрузкой электродвигатель должен быть выбран по мощности так, чтобы он мог работать с наибольшей из графика нагрузки мощностью (это так называемый выбор по перегрузке) и не перегревался больше нормы (это выбор по нагреву). Из двух мощностей выбирают большую.

*Мощность по перегрузке* определяется как

$$P_1 = P_{\text{max}} / \lambda,$$

где  $P_{\text{max}}$  – наибольшая мощность из графика нагрузки;

$\lambda$  – коэффициент допустимой перегрузки:

для ДПТ  $\lambda = 1,8 \dots 2,5$  (из условий коммутации);

для АД  $\lambda = 0,9^2 \cdot \lambda_k$  ( $\lambda_k = M_k / M_n$  – берется из каталога);

коэффициент 0,9 учитывает возможность снижения напряжения сети на 10 % от номинального.

Обычно сначала рассчитывают мощность электродвигателя по нагреву и выбирают конкретный двигатель (с учетом и других критериев выбора), а затем проверяют его по перегрузке  $P_n \geq P_1$ .

Если это условие перегрузки не соблюдается, из каталога выбирают следующий по шкале мощностей электродвигатель.

**Примечание.** Для АД нужна еще проверка и по пусковому моменту:

$$0,9^2 \cdot M_n \geq M_1,$$

где  $M_1$  – момент на первом участке нагрузочного графика.

**Пример.** Выбрать электродвигатель для механизма, работающего по нагрузочному графику, представленному на рис. 14.1. Угловая скорость вращения вала  $\omega = 146$  рад/с ( $n = 1460$  об/мин).

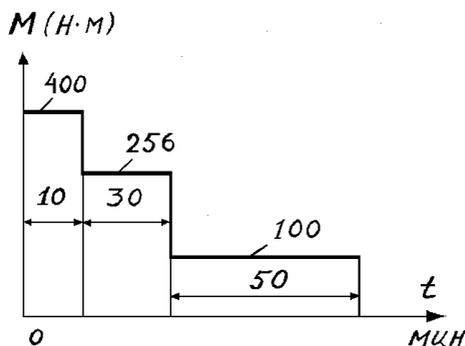


Рис. 14.1. Нагрузочный график  $M = f(t)$

### Решение

Эквивалентный момент (из графика)

$$M_{\text{э}} = \sqrt{(400^2 \cdot 10 + 256^2 \cdot 30 + 100^2 \cdot 50) / 90} = 213 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Расчетная мощность электродвигателя

$$P = M_{\text{э}} \cdot \omega = 213 \cdot 146 \cdot 10^{-3} = 31 \text{ кВт}.$$

Принимаем по каталогу АД типа А02 – 81 – 4 с  $P_{\text{н}} = 40 \text{ кВт}$ ,  
 $n = 1460 \text{ об/мин}$ ,  $\lambda_{\text{к}} = 2$ ,  $\lambda_{\text{п}} = M_{\text{п}} / M_{\text{н}} = 1,1$ .

Номинальный момент АД

$$M_{\text{н}} = P_{\text{н}} / \omega_{\text{н}} = (40 / 146) \cdot 10^3 = 274 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Максимальный и пусковой моменты АД с учетом снижения напряжения сети на 10 %

$$0,9^2 M_{\text{к}} = 0,9^2 \cdot 2 \cdot 274 = 444 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$0,9^2 M_{\text{п}} = 0,9^2 \cdot 1,1 \cdot 274 = 244 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Сопоставление полученных данных с данными нагрузочного графика показывает, что принятый электродвигатель удовлетворяет тре-

бованиям перегрузки ( $444 > 400 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ), но не проходит по пусковым условиям ( $244 < 400 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ).

Следующим большим по мощности будет электродвигатель типа АО2-82-4с при  $P_n = 55 \text{ кВт}$ ;  $n_n = 1460 \text{ об/мин}$ ;  $\lambda_k = 2,0$ ;  $\lambda_{п1} = 1,1$ . Данный электродвигатель, как показывают расчеты, также не проходит по пусковым условиям.

В подобных случаях, когда момент сопротивления при пуске значительно превышает момент при установившемся режиме, целесообразно принимать электродвигатель с повышенным пусковым моментом. Поэтому примем АД типа АОП – 81 – 4с при  $P_n = 40 \text{ кВт}$ ;  $n_n = 1470 \text{ об/мин}$ ;  $\lambda_k = 2,2$ ;  $\lambda_{п1} = 1,8$ .

Проверим данный электродвигатель по пусковому моменту:

$$0,9^2 \cdot 1,8 \cdot 40 \cdot 10^4 / 1470 \approx 400 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Так как пусковой момент равен моменту сопротивления, то данный электродвигатель выбран правильно.

### **Лекция 15. РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОМ И КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

Для повторно-кратковременного режима работы выпускаются специальные серии электродвигателей. В каталогах на них указывается номинальная мощность  $P_n$  при нормативной (стандартной) про-должительности включения  $ПВ_n = 15, 25, 40, 60$  %.

Если при повторно-кратковременном режиме расчетная мощность  $P_s$  и фактическая продолжительность включения  $ПВ_{ф}$  равны (или очень близки к номинальным данным двигателя), то *проверка его по нагреву не требуется*, поскольку работа при таких параметрах нагрузочной диаграммы гарантируется заводом-изготовителем. Но когда  $ПВ_{ф}$  заметно отличается от  $ПВ_n$ , *проверка двигателя по нагреву необходима* и проводится следующим образом:

1) по заданной нагрузочной диаграмме рассчитывают  $PВ_{\phi}$  и эквивалентную мощность  $P_3$  (по одному из методов эквивалентных величин);

2) приводят рассчитанную мощность  $P_3$  к ближайшей нормативной величине  $PВ_{н}$  по формуле  $P'_3 = P_3 \sqrt{(PВ_{\phi} / PВ_{н})}$  ;

3) по каталогу подбирают электродвигатель, номинальная мощность которого  $P_{н} \geq P'_3$ , а номинальное значение угловой скорости  $\omega_{н}$  и исполнение соответствуют требуемым. Далее выбранный двигатель проверяют на перегрузочную способность (и по пусковым условиям для АД), как и для двигателей при продолжительном режиме работы с переменной нагрузкой.

От электродвигателя, предназначенного для продолжительного режима работы, но используемого для повторно-кратковременной нагрузки, требуется, чтобы он развивал необходимую наибольшую мощность при обработке детали и не перегревался свыше нормы при обработке любого числа деталей. Поэтому мощность электродвигателя в данном случае рассчитывают по перегрузке и по нагреву, как и для продолжительного режима с переменной нагрузкой, при этом для расчета номинальной мощности двигателя по нагреву могут быть использованы методы эквивалентного тока, эквивалентного момента и средних потерь (метод эквивалентной мощности здесь не применим, так как в течение всего времени цикла не соблюдается пропорциональность между током электродвигателя и его мощностью).

Для подъемно-транспортных механизмов следует выбирать специальные крановые электродвигатели, так как они предназначены для использования в тяжелых условиях работы (частые пуски, торможения, колебания нагрузки, превышающие номинальную) и имеют повышенные максимальный и пусковой моменты.

Один и тот же электродвигатель для разных ПВ имеет различную номинальную мощность: чем больше ПВ, тем меньше мощность. Пересчет номинальной мощности электродвигателя с одного значения ПВ на другое осуществляется на основе приближенного равенства

$$P_{15}^2 \cdot \text{ПВ}_{15} \approx P_{25}^2 \cdot \text{ПВ}_{25} \approx P_{40}^2 \cdot \text{ПВ}_{40} \approx P_{60}^2 \cdot \text{ПВ}_{60}.$$

Повторно-кратковременный режим характерен и для электроприводов металлорежущих станков, обрабатывающих однотипные детали, когда цикл содержит паузы, необходимые для смены заготовки и измерений детали. Мощность электродвигателя при этом целесообразно определять по методу (формуле) средних потерь:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum \Delta A_i / t_{\Sigma}, \quad (15.1)$$

где  $\Delta A_i$  – потери энергии на каждом значении нагрузки, включая процессы пуска и торможения.

Когда электродвигатель не работает ( $t_0$  на рис. 15.1), условия его охлаждения значительно ухудшаются. Это обстоятельство учитывают введением экспериментальных коэффициентов ( $\beta_0 < 1$ ) ухудшения охлаждения, умножая время  $t_0$  на  $\beta_0$ . Тогда в (15.1) знаменатель уменьшается, а эквивалентные потери и номинальная мощность электродвигателя увеличиваются.

У АД защищенного исполнения с  $n_0 = 1500$  об/мин и  $P_n = 1...100$  кВт коэффициент  $\beta_0 = 0,5...0,2$  (с увеличением  $P_n$  коэффициент  $\beta_0$  убывает), у АД с обдувом  $\beta_0 = 0,45...0,3$ , у закрытых АД  $\beta_0 = 0,98...0,93$ .

Во время пуска и торможения средняя скорость вращения электродвигателя ниже номинальной, охлаждение двигателя ухудшается. Поэтому в формуле (15.1) ухудшение охлаждения учитывается путем умножения времени пуска  $t_n$  и торможения  $t_T$  на коэффициент

$$\beta_1 = (1 + \beta_0) / 2.$$

**Расчет номинальной мощности электродвигателя при кратковременном режиме работы.** Вспомогательные электроприводы станков (установочные перемещения суппортов, бабок, поперечин и др.) обычно работают в кратковременном режиме нагрузки. Продолжительность работы вспомогательных приводов обычно не превышает 5...15 с (1...1,5 мин у крупных

станков). За это время при перегрузке в допустимых пределах электродвигатель не успевает нагреться даже до нормального перегрева. Номинальную мощность электродвигателя в кратковременном режиме работы определяют только по *условиям перегрузки*, а затем проверяют по *пусковому моменту*. Мощность, расходуемая на преодоление сил трения при перемещении горизонтально движущегося узла:

$$P_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \cdot v \cdot 10^{-3} = G \cdot \mu \cdot v \cdot 10^{-3} \text{ кВт},$$

где  $F_{\text{тр}}$  – сила трения, Н;

$v$  – скорость, м/с;

$G$  – сила тяжести (вес) перемещаемого узла, Н;

$\mu$  – коэффициент трения движения.

Мощность на валу электродвигателя

$$P_{\text{н}} = P_{\text{тр}} / (\lambda \cdot \eta) = P / \lambda,$$

где  $\lambda$  – коэффициент допустимой перегрузки.

Приближенно можно считать, что характеристика АД в рабочей части прямолинейна. Тогда угловая скорость электродвигателя при работе с перегрузкой

$$\omega_{\lambda} = \omega_0 \cdot (1 - \lambda \cdot s_{\text{н}}),$$

где  $\omega_0 = \pi n_0 / 30$  – синхронная угловая скорость АД;

$s_{\text{н}}$  – номинальное скольжение.

Момент АД при перегрузке

$$M = P \cdot 10^3 / (\omega_0 \cdot (1 - \lambda \cdot s_{\text{н}})), \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Момент сил сопротивления в начале пуска больше, чем во время его работы:

$$M_{\text{со}} = P \cdot 10^3 \cdot \mu_0 / (\omega_0 \cdot \mu \cdot (1 - \lambda \cdot s_{\text{н}})) \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где  $\mu_0$  – коэффициент покоя.

Выбор мощности АД сводится к следующему. Пользуясь формулой для  $P_n$ , по каталогу подбирают электродвигатель, затем вычисляют момент  $M_{co}$  и сопоставляют его с пусковым моментом  $0,9^2 \cdot M_n$ . Если выполняется условие  $0,9^2 \cdot M_n > M_{co}$ , выбранный электродвигатель пригоден.

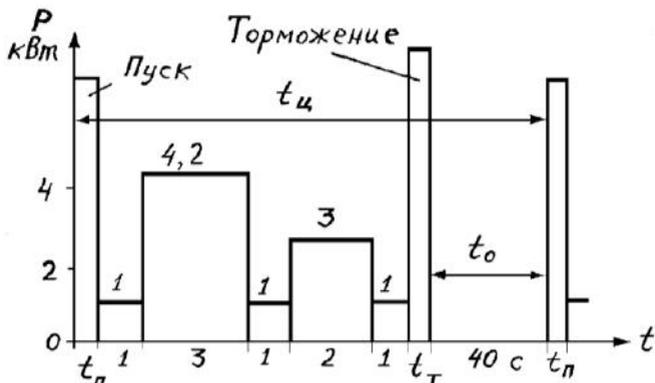


Рис. 15.1. Нагрузочный график  $P = f(t)$

## Лекция 16. ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЧЕЛОВЕКА

### ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

**Цель:** изучить воздействие электрического тока на человека и основные мероприятия по повышению электробезопасности людей.

**Электротравмы** – это явные или скрытые повреждения в человеке при попадании его под воздействие электрического тока (напряжения). Поражение человека электрическим током происходит главным образом из-за несоблюдения правил техники безопасности (ПТБ), правил устройства и эксплуатации электроустановок (ПУЭ), прикосновения человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением. К электротравмам относятся электрические знаки, ожоги и электрические удары.

**Электрический знак** – это омертвленная кожа в виде мозоли, которая возникает на входе электрического тока в тело человека и

на выходе из него. С течением времени (иногда через годы) электрические знаки исчезают.

**Ожоги** вызывает электрическая дуга, возникающая после прикосновения человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением, при коротких замыканиях, а также сам электрический ток при непосредственном контакте тела человека с токоведущими частями электрооборудования.

**Электрический удар** – это судорожное сокращение мышц различной степени тяжести (потеря сознания, нарушение дыхания, работы сердца и даже его остановка). Если в течение 5–6 мин удается восстановить деятельность сердца (искусственное дыхание, непрямой массаж сердца), то можно рассчитывать на возвращение человека к жизни.

Характер поражения электрическим током и его последствия определяются такими факторами, как род и величина тока (постоянный или переменный ток, а при переменном токе – и его частота), величина напряжения, путь и продолжительность протекания тока через тело человека, состояние кожи в местах прикосновения к металлическим частям, физическая и психическое состояние человека.

Наиболее опасен переменный ток частотой 50...60 Гц. Наименее опасными считаются токи до 10 мА и постоянный до 20 мА, так как человек при этих значениях тока может освободиться от токоведущих частей электрооборудования самостоятельно. Токи промышленной частоты и постоянные величиной 0,1 А и более считаются смертельными. При частоте переменного тока в десятки и сотни килогерц его поражающее действие снижается из-за явления поверхностного эффекта, но при очень высоких частотах могут быть ожоги из-за нагревания поверхности тела.

Электрическое сопротивление тела человека состоит из сопротивления кожи и сопротивления внутренних тканей. Наибольшее сопротивление имеет верхний слой кожи (доли миллиметра). Сопротивление тела человека – величина нелинейная, с увеличением прикладываемого напряжения от 10 до 140 В оно резко уменьшается – от 10 кОм до 800 Ом, соответственно увеличивается опасность поражения человека. Сопротивление тела человека уменьшается и с увеличением продолжительности воздействия на него тока, площади и плотности контакта с

токоведущей частью, а также при неудовлетворительном физическом и психическом состоянии человека. Особенно значительно сопротивление тела человека снижает наличие в нем алкоголя. В расчетах по электробезопасности за наименьшее сопротивление тела человека принимают величину, равную 1000 Ом.

Так как сопротивление тела человека зависит от большого числа факторов, то в технике безопасности объем и характер защитных мероприятий устанавливаются по величине напряжения: переносный электроинструмент, освещение выполняют на 36 и 12 В, электросварку – на 65 В и др.

Понятие **безопасное напряжение** (12, 36 В) является относительным. Бывали случаи со смертельным исходом при напряжении переменного тока 36, 24 и даже 12 В.

**Классификация помещений электроустановок по степени опасности поражения электрическим током.** Все электроустановки подразделяют по напряжению на установки до 1000 и свыше 1000 В. Специальным видом электроустановки является **электропомещение** – помещение (или огороженные его части) с находящимся там электрооборудованием, к которому имеет доступ только обслуживающий персонал.

**Техникой безопасности** называется система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих воздействие на работающих опасных производственных факторов. В электроустановках опасным производственным фактором является электрический ток. Конкретные организационные и технические меры защиты зависят от класса помещения, напряжения и назначения электроустановки.

Все помещения электроустановок по степени опасности поражения электрическим током делятся на 3 класса:

1) **повышенной опасности** – помещения, характеризующиеся наличием одного из следующих условий:

- сырость (относительная влажность более 75 %);
- токопроводящая пыль;
- токопроводящие полы (металлические, кирпичные, земляные и т.д.);
- высокая температура (выше +35 °С);

– возможность одновременного прикосновения человека к металлическим частям, имеющим соединение с землей, и к металлическим корпусам электрооборудования, которые могут оказаться под напряжением при повреждении изоляции;

2) **особо опасные** – помещения, характеризующиеся наличием одного из следующих условий:

– большая сырость (относительная влажность близка к 100 %);

– химически активная или органическая среда;

– два или более условий повышенной опасности (например, сырость и токопроводящий пол);

3) **без повышенной опасности** – помещения, в которых отсутствуют условия, которые создают повышенную или особую опасность (перечислены выше).

## *Лекция 17. ОСНОВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ*

Основным мероприятием по повышению электробезопасности в электроустановках напряжением как до 1000 В, так и выше является **защитное заземление** – преднамеренное электрическое соединение с заземляющим устройством металлических нетоковедущих частей электрооборудования, которые могут оказаться под напряжением. Основные элементы заземляющего устройства: *заземлитель* (металлические проводники, имеющие непосредственный контакт с землей) и *заземляющие проводники*, соединяющие заземляемые элементы электрооборудования с заземлителем.

Основная задача защитного заземления – снизить до безопасной величины (не более 40 В) напряжение, возникающее на нетоковедущих металлических частях электроустановок при пробое изоляции.

В трехфазных установках напряжением до 1000 В защитное заземление имеет некоторые особенности в зависимости от режима нейтрали.

*В установках с изолированной нейтралью* (рис. 17.1) при пробое изоляции на корпус электродвигателя Д он окажется под напряжением, величина которого равна падению напряжения на

сопротивлению заземления  $r_3$  от протекающего через него тока  $I_3$ . Этот ток определяется напряжением  $U_2$  и полным сопротивлением изоляции проводов  $Z_n$ . При нормальном сопротивлении изоляции ток  $I_3$  небольшой, напряжение на корпусе электродвигателя при пробое изоляции мало и прикосновение к нему человека малоопасно. Но допускать длительное замыкание на землю нельзя, так как напряжение исправных фаз по отношению к земле возрастают до линейных, что способствует возникновению второго замыкания на землю в другой фазе. А двойное замыкание на землю создает большую опасность для человека.

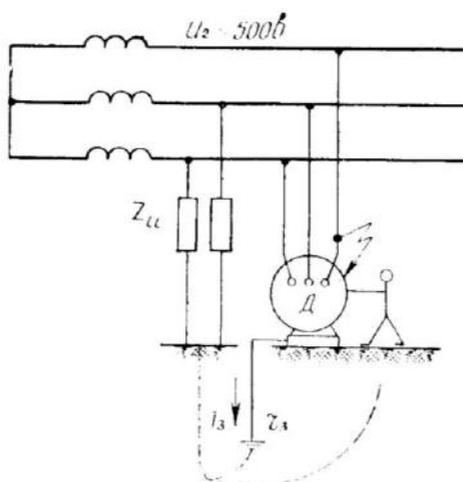


Рис. 5.1. Заземление корпуса электроприемника в сети с изолированной нейтралью

**В системе с глухозаземленной нейтралью** (рис. 17.2) все металлические нетоковедущие части электроустановок соединяют электрически с заземленной нейтралью трансформатора через нулевой провод сети или через специальный заземляющий проводник. Такая система называется **защитным занулением**. Здесь при пробое изоляции на корпус электроприемника возникает ток короткого замыкания  $I_{к.з.}$ , что приводит к срабатыванию защитного аппарата и отключению поврежденного участка.

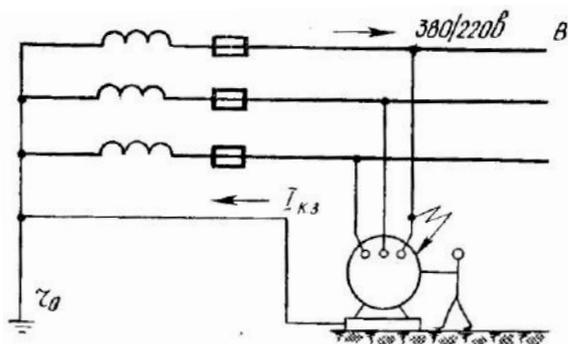


Рис. 17.2. Зануление корпуса электроприемника в сети с глухозаземленной нейтралью

Простое заземление корпуса электроприемника без соединения с нейтралью правилами запрещается, так как такое защитное заземление не обеспечивает надежной защиты (при пробое изоляции ток  $I_{кз}$  ограничивается сопротивлениями двух заземлителей – электроприемника  $r_з$  и нейтрали  $r_0$  – и может оказаться недостаточным для срабатывания защиты, а на корпусе поврежденного электроприемника может быть опасное напряжение).

Если одновременно соединить корпус электроприемника с нейтралью и заземлить его, то это не нарушит действия защиты и улучшит условия безопасности (при замыкании на корпус дополнительное заземление уменьшит напряжение на аварийном корпусе). Такое дополнительное заземление называется **повторным заземлением нулевого провода**. Правила предписывают устраивать повторные заземления нулевого провода на воздушных линиях через каждые 250 м, а также на концах линий и ответвлений длиной более 200 м.

Более совершенной мерой защиты является **защитное отключение**, так как защитное заземление и зануление иногда не защищают человека от поражения электрическим током: в сетях с изолированной нейтралью однофазные замыкания не отключаются при системе заземления, а в сетях с глухозаземленной нейтралью хотя и отключаются, но время их отключения может быть велико

(десятьки секунд) при малых токах короткого замыкания и завышенных токах плавной вставки предохранителей.

**Защитным отключением** называется система защиты, которая обеспечивает безопасность путем быстродействующего отключения аварийного участка или сети в целом при возникновении замыкания на корпус или непосредственно на землю с временем действия 0,1...0,2 с и ниже. Наиболее совершенные системы защитного отключения срабатывают также и при прикосновении человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением.

Области применения защитного отключения:

- в передвижных электроустановках напряжением до 1000 В;
- дополнительно к защитному занулению для отключения электрооборудования, находящегося на больших расстояниях от пункта электроснабжения;
- если невозможно выполнить необходимое заземление в скальных, многолетнемерзлых грунтах и т.п.

Принцип выполнения защитного отключения зависит от типа входного сигнала, поступающего на датчик (реле максимального тока или реле напряжения – основной элемент схемы). Замыкание фазы электрической сети на землю или снижение изоляции приводит к несимметрии трехфазных токов и напряжений, а на корпусе поврежденного элемента появляется напряжение относительно земли. То-ки короткого замыкания, напряжения или их несимметрия действуют на соответствующие датчики, которые отключают коммутационный аппарат в цепи питания аварийного участка.

Устройство защитного отключения (УЗО) является высокоэффективным электрозщитным средством. Обычно УЗО совмещают с автоматическими выключателями (например УЗО на 220 и 380 В Гомельского завода «Электроаппаратура», УЗО типа ВАД2 Московского концерна «Энергомер»).

**Для непрерывного контроля состояния изоляции** в сетях до 1000 В можно использовать простые схемы, приведенные на рис. 17.3. В качестве индикаторов КИ можно применять **высокоомные вольтметры**, а лучше – **электронные или газоразрядные лампы**. Когда изоляция сети исправна, токи, протекаемые через индикаторы КИ или через конденсатор К *асимметра*, равны друг

другу, а их сумма в нулевой точке равна нулю. Поэтому индикаторы дают одинаковые показания (или лампы светятся одинаково ярко), а в схеме 17.3, б ток по обмотке реле Р будет равен нулю. При пробое изоляции на землю соединенная с поврежденной фазой лампа гаснет (или вольтметр показывает нуль), а в схеме асимметра по обмотке реле Р потечет ток, реле сработает и своим размыкающим контактом подаст сигнал дежурному или команду на отключение поврежденного участка. Если сопротивление изоляции одной из фаз резко уменьшилось и ей угрожает пробой, то вольтметры в схеме рис. 17.3, а будут давать различные показания.

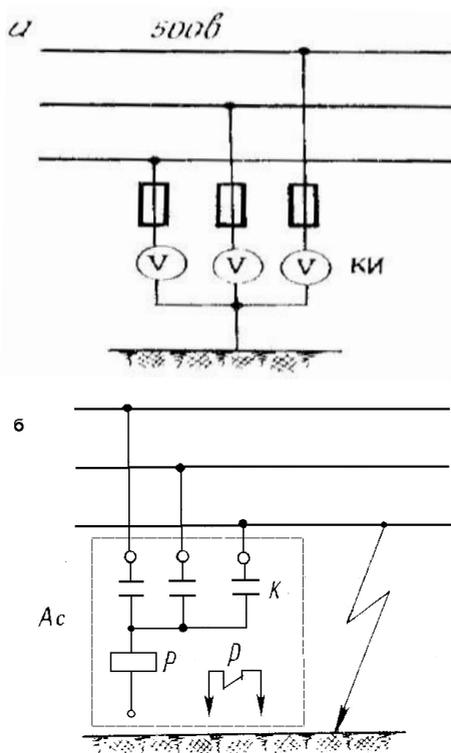


Рис. 17.3. Схемы включения приборов контроля изоляции:

а – схема включения ламп или вольтметров;

б – схема включения асимметра

Асимметры типа РА-74/2 (см. рис. 17.3, б) предназначены для защитного отключения в электроустановках напряжением 500 В

при однофазных замыканиях на землю. В последние годы появились более совершенные приборы контроля изоляции и защитного отключения на основе вентильных схем.

На рис. 17.4 приведена схема аппарата защитного отключения и контроля изоляции для сетей с изолированной нейтралью напряжением до 380 В типа НРР – Н51. Принцип действия схемы аналогичен работе асимметра (см. рис. 17.3, б).

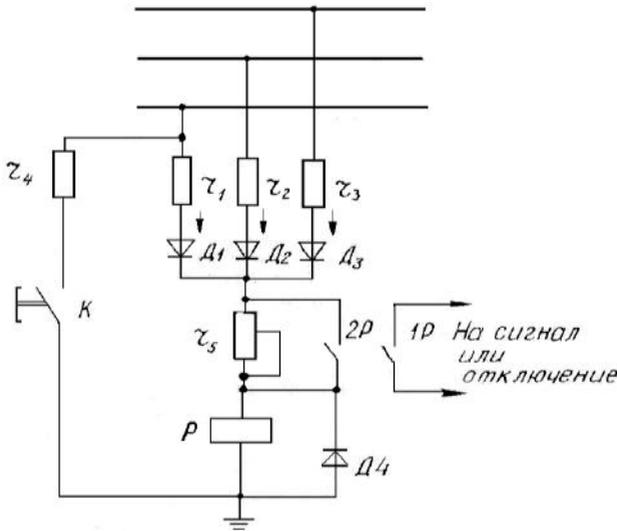


Рис. 17.4. Схема аппарата защитного отключения и контроля изоляции для сетей с изолированной нейтралью

Реле Р включено в нулевую цепь выпрямительного моста на диодах Д1 – Д3. Сопротивления  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  служат для ограничения тока в случае пробоя одного из диодов или междуфазного короткого замыкания. Переменное сопротивление  $r_5$  предназначено для регулирования чувствительности по сопротивлению изоляции.

В нормальных условиях через нулевую цепь протекает небольшой ток небаланса постоянного напряжения, недостаточный для срабатывания реле. При снижении сопротивления изоляции в фазах сети через обмотку реле будет протекать дополнительный выпрямленный ток, величина которого зависит от сопротивлений

изоляции фаз и величины сопротивления  $r_5$ . При определенной величине тока реле Р сработает и замкнет цепь отключения 1Р. Реле срабатывает и при прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением, так как происходит снижение изоляции фазы, к которой прикоснулся человек.

Вторые контакты 2Р шунтируют сопротивление  $r_5$ , что позволяет избежать подгорания контактов реле при неустойчивых замыканиях на землю.

Проверка действия защиты производится кнопкой К. При срабатывании реле отключается вся сеть, питающаяся от трансформатора.

Реле может также служить для контроля изоляции сети.

**Средства защиты работающих в электроустановках.** Средствами защиты называются средства, использование которых предотвращает или уменьшает воздействие на работающих опасных или вредных производственных факторов.

*Электрозащитные средства* предназначены для защиты людей от поражения электрическим током, воздействия электрической дуги и электромагнитного поля. К электрозащитным средствам относят:

- изолирующие штанги (оперативные, для наложения заземления, измерительные), изолирующие клещи, электроизмерительные указатели напряжения для фазировки;

- изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ под напряжением свыше 1000 В и слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками для работы в электроустановках напряжением до 1000 В;

- диэлектрические перчатки, боты, галоши, коврики, изолирующие накладки и подставки;

- индивидуальные изолирующие комплекты;

- переносные заземления;

- оградительные устройства и диэлектрические колпаки;

- плакаты и знаки безопасности.

*Изолирующие штанги* выполняют из прочного и высококачественного диэлектрика. Они состоят из изолированной части, ограничительного кольца и ручки.

*Изолирующие клещи* состоят из двух частей, каждая из которых имеет изолированную рабочую губку, ограничительное кольцо и ручку-захват.

*Токоизмерительные клещи* представляют собой переносный трансформатор тока с разъемным сердечником, вторичной обмоткой и амперметром.

*Указатель напряжения* выше 1000 В – это изолирующая штанга с индикатором напряжения (неоновой лампой или светодиодом). Для напряжения до 500 В используют указатели (токоискатели) типа ТИ-2, УНН-90 или МИН-1 с неоновой лампой в качестве индикатора.

*Резиновые диэлектрические перчатки, боты, галоши и коврики* изготовляют из высококачественной технической резины.

*Изолирующая подставка* – деревянный настил размером 0,5 × 0,5 м на опорных изоляторах. Используется для дополнительной изоляции при операциях с предохранителями, разъединителями и т.д.

*Изолирующие рукоятки* слесарно-монтажного инструмента должны иметь ограничительный упор и гладкое изоляционное покрытие длиной не менее 10 см.

При работах в электроустановках могут применяться также *средства индивидуальной защиты*: очки, каски, противогазы, рукавицы, предохранительные пояса и страховочные канаты.

Электрозащитные средства разделяют на основные и дополнительные.

*Основные* – это электрозащитные средства, изоляция которых длительное время выдерживает рабочее напряжение электроустановок и которые позволяют прикасаться к токоведущим частям, находящимся под напряжением. Поэтому их изготавливают из материалов с устойчивой диэлектрической характеристикой (пластмасса, бакелит, фарфор, эбонит, гетинакс и т.п.).

*Дополнительными* называются средства для защиты от напряжения прикосновения и напряжения шага, которые при данном напряжении сами не могут обеспечить защиту от поражения током, а применяются вместе с основными электрозащитными средствами.

Классификация электрозащитных средств приведена в таблице.

Вид электрозащитных средств	Электрозащитные средства, используемые при напряжении электроустановки до 1000 В	Электрозащитные средства, используемые при напряжении электроустановки свыше 1000 В
Основные	Изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, диэлектрические перчатки, слесарно-монтажные инструменты с изолирующими рукоятками, указатели напряжения	Изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения и приспособления для ремонтных работ: изолирующие лестницы, площадки, тяги, канаты, корзины телескопических вышек и др.
Дополнительные	Диэлектрические галоши, диэлектрические коврики, изолирующие подставки и накладки, переносные заземления	Диэлектрические перчатки, боты, коврики, индивидуальные экранирующие комплекты, изолирующие подставки и накладки, диэлектрические колпаки, переносные заземления, ограждающие устройства, плакаты и знаки безопасности

В энергосистеме Беларуси используются новейшие электрозащитные средства, обеспечивающие безопасность труда. С 1994 г. успешно эксплуатируется более 1000 бесконтактных светозвуковых указателей высокого напряжения с самоконтролем на напряжение 6...400 кВ типа КД-400 (разработаны и изготовлены в Польше). Такой указатель имеет переключатель диапазонов напряжения (6...35, 110...220 и 400 кВ) и поэтому заменяет несколько указателей на разные классы напряжения, которые применялись раньше. Принцип работы основан на регистрации электрического поля, усилении его за счет энергии встроенных аккумуляторов и выдачи ярких световых сигналов (от светодиодов) и звукового сигнала.

На электростанциях, трансформаторных подстанциях и преимущественно в распределительных электрических сетях (6...10 кВ) применяются комбинированные указатели высокого напряжения типа УВНК-10Б (разработаны и изготовлены МО «Шанс», Минск), они используются отдельно и вместе с универсальной электроизолирующей штангой типа ШЭУ-10 и др. Работоспособность бесконтактной части таких указателей подтверждается возникновением звукового или светового сигнала (свечение от светодиода красного цвета). Проверка отсутствия напряжения на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) (6...10 кВ или 35...110 кВ) контактным способом с помощью указателя УВНК-10Б на штангах ШЭУ производится непосредственно с земли или с телескопических вышек на всех проводах ВЛ с соблюдением безопасных расстояний для проводов этих линий, которые могут оказаться под напряжением.

Вместо указателей УВНФ-10, УВНФ-10МК и других, не подлежащих восстановлению, можно применить указатели для проверки совпадения фаз в электроустановках (6...10 кВ) типа УПСФ-10 (МО «Шанс»). Этот указатель при касании разноименных фаз выдает световой сигнал красного цвета, который виден на расстоянии 7 м даже при ярком освещении.

Кроме этого, в энергосистеме Беларуси применяются новые приборы для определения напряжения:

- бесконтактный индикатор напряжения типа БИН-10 (ОАО «Белэнергоремналадка»), используется оперативным и оперативно-ремонтным персоналом;

- универсальный контактный указатель напряжения типа УНУ-12-400 (Витебский опытно-экспериментальный завод концерна «Белэнерго»), применяется для проверки напряжения от 12 до 400 В переменного тока и в цепях постоянного тока с определением полярности;

- бесконтактный прибор индикации опасного напряжения типа ПИОН (МО «Шанс»), который также можно использовать для определения места расположения скрытой проводки, находящейся под напряжением;

– электрический фонарь – бесконтактный сигнализатор наличия напряжения типа «Шанс-Ф», совмещающий осветительный и звуковой приборы.

Переносные заземления применяют для защиты от ошибочной подачи напряжения на отключенные для ремонтных работ части электроустановок и появления на них наведенного напряжения.

### **Л и т е р а т у р а**

1. Фираго, Б.И. Теория электропривода / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2007.
2. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981.
3. Харизоменов, И.В. Электрооборудование и электроавтоматика металлорежущих станков / И.В. Харизоменов. – М.: Машиностроение, 1975.
4. Сандлер, А.С. Электропривод и автоматизация металлорежущих станков / А.С. Сандлер. – М.: Высшая школа, 1972.
5. Москаленко, В.В. Электрический привод / В.В. Москаленко. – М.: Высш. школа, 1991.



## С о д е р ж а н и е

<i>Лекция 1.</i>	Введение. . . . .	3
<i>Лекция 2.</i>	Виды передаточных механизмов и кинематические схемы электроприводов. . . . .	9
<i>Лекция 3.</i>	Расчетные схемы механической части электропривода. . . . .	17
<i>Лекция 4.</i>	Уравнение вращательного движения электропривода. . . . .	23
<i>Лекция 5.</i>	Механические характеристики электродвигателей переменного тока. . . . .	29
<i>Лекция 6.</i>	Механические характеристики электродвигателей постоянного тока. . . . .	44
<i>Лекция 7.</i>	Тиристорный электропривод постоянного тока. . . . .	53
<i>Лекция 8.</i>	Контактная аппаратура управления. . . . .	60
<i>Лекция 9.</i>	Основные схемы релейно-контакторного управления. . . . .	68
<i>Лекция 10.</i>	Аппаратура и схемы защиты электродвигателей. . . . .	83
<i>Лекция 11.</i>	Бесконтактная аппаратура. Датчики. . . . .	87
<i>Лекция 12.</i>	Критерии выбора электродвигателей. Основные режимы работы электродвигателей по нагреву. . . . .	92
<i>Лекция 13.</i>	Построение нагрузочных диаграмм механизма и электропривода. Методы расчета мощности электродвигателей при переменной нагрузке. . . . .	101
<i>Лекция 14.</i>	Расчет номинальной мощности электродвигателя при длительном режиме работы. . . . .	107
<i>Лекция 15.</i>	Расчет номинальной мощности электродвигателя при повторно-кратковременном и кратковременном режимах работы. . . . .	111
<i>Лекция 16.</i>	Воздействия электрического тока на человека. . . . .	114
<i>Лекция 17.</i>	Основные мероприятия по повышению электробезопасности. . . . .	117
<b>Л и т е р а т у р а.</b> . . . . .		127

Учебное издание

ПАВЛОВИЧ Сергей Николаевич

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Курс лекций

для студентов дневной и заочной форм обучения  
машиностроительного факультета специальности 1-36 01 03  
«Технологическое оборудование машиностроительного  
производства»

Редактор Т.Н. Микулик

Компьютерная верстка Н.А. Школьниковой

---

Подписано в печать 22.05.2008.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 7,50. Уч.-изд. л. 5,86. Тираж 100. Заказ 63.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.