

Министерство образования Республики Беларусь
Белорусский национальный технический университет

С.Н. Павлович

**Электрооборудование цехов
металлургических заводов**

Учебное пособие

для студентов специальности 1-42 01 01

*«Металлургическое производство и металлообработка»
заочной формы обучения*

Учебное электронное издание

Минск БНТУ 2009

УДК 62-34-52 (075.4)

Автор:

С.Н. Павлович

Рецензенты:

Б.И. Фираго, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ, доктор технических наук, профессор;

В.П. Беляев, доцент кафедры «Полиграфическое оборудование и системы обработки информации» БГТУ, кандидат технических наук, доцент

В учебном пособии рассмотрены основные вопросы автоматизированного электропривода и управления им (*механика электропривода, электромеханические свойства электродвигателей постоянного и переменного тока, электрические аппараты и схемы управления электроприводами, расчет мощности и выбор электродвигателей при различных режимах их работы по нагреву, электробезопасность*), а также электрооборудование различных машин и установок металлургических цехов (*кранов, установок для производства агломерата и окатышей, доменных печей, прокатных станов, электротермических установок, выплавки стали*).

Белорусский национальный технический университет
Проспект Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел (017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37
Регистрационный № БНТУ/ФИТР46 – 4.2009

© БНТУ, 2009

© Павлович С.Н., 2009

© Павлович С.Н., компьютерный дизайн, 2009

Содержание

<i>Введение</i>	4
<i>Раздел 1. Основы электропривода и управления им</i>	9
Тема 1.1. Общие сведения и механика электропривода.....	9
Тема 1.2. Электромеханические свойства электродвигателей	25
Тема 1.3. Аппаратура и схемы управления электроприводами.....	35
Тема 1.4. Выбор электродвигателей для производственных механизмов.....	56
Тема 1.5. Электробезопасность.....	71
1.5.1. Воздействия электрического тока на человека.....	71
1.5.2. Основные мероприятия по повышению электробезопасности.....	73
<i>Раздел 2. Электрооборудование машин и установок металлургических цехов</i>	81
Тема 2.1. Электрооборудование металлургических кранов	81
Тема 2.2. Электрооборудование установок для производства агломерата и окатышей.....	92
Тема 2.3. Электрооборудование доменных печей.....	95
Тема 2.4. Электрооборудование сталеплавильных цехов.....	98
Тема 2.5. Электрооборудование прокатных станов	103
Тема 2.6. Электрооборудование электротермических установок	104
Тема 2.7. Электроснабжение металлургических цехов и установок	111
<i>Рекомендуемая литература</i>	114

Введение

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 19-м веке послужило мощным толчком к развитию производства (*поэтому 19-й век назван веком пара*). В 20-м веке основным источником механической энергии стал более совершенный электрический двигатель и основным видом привода рабочих машин в промышленном производстве – электрический привод (*поэтому 20-й век получил название века электричества*).

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

Назовём ряд достоинств использования электроэнергии и электродвигателей:

- возможность передачи электроэнергии на большие расстояния с малыми потерями;
- обратимость электрических машин;
- высокий КПД;
- большой диапазон мощностей электродвигателей (от долей Вт до МВт);
- большой диапазон регулирования скорости электропривода;
- жёсткость механических характеристик.

Что же понимается под словом “*привод*”? К.Маркс (Капитал, т. 1) написал: “Всякое развитое машинное устройство состоит из трёх существенно различных частей: машины-двигателя, передаточного механизма, наконец, машины орудия или рабочей машины”.

Назначение первых двух частей – привести в движение (вращательное или поступательное) рабочую машину или её исполнительный механизм. Поэтому эти части объединяют общим названием “*привод*”. Таким образом, *приводом* называют машинное устройство, сообщающее движение рабочим органам производственной машины и состоящее из двигателя и механических передач.

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 соответственно). Но для привода рабочих машин основным двигателем является электрический двигатель, на основе которого строится *электропривод*, а на современном этапе развития техники – *автоматизированный электропривод*.

Электрическим приводом называется *электрохимическое 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 привода, что **электропривод** – это привод, в котором в качестве двигателя используется именно электрический двигатель с аппаратурой его управления.

Автоматизированный электропривод (АЭП) – это *электрохимическое устройство, предназначенное для приведения рабочего органа производственной машины и управления её технологическим процессом и 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 определённым 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 его, но и регулирование скорости в соответствии с требованиями технологического процесса.

Структурная схема АЭП. Структурная схема АЭП представлена на рис. 1.

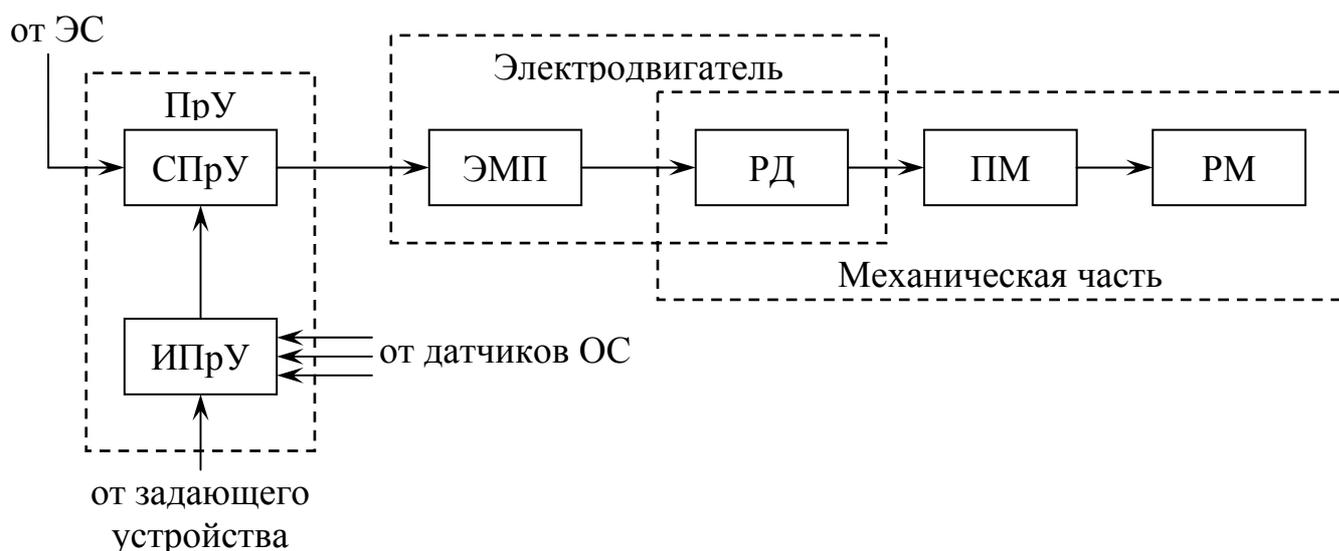


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного электропривода

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 электромагнитную механическую мощность, и массой ротора РД, на которую воздействует вращающий момент двигателя М при угловой скорости ω . Механическая мощность от ротора электродвигателя передаётся передаточному механизму ПМ, в котором она преобразуется (может изменяться как момент и угловая скорость, так и вид движения) и передаётся к исполнительному органу рабочей машины РМ.

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 определённые воздействия на СПрУ, а от него и на ЭМП двигателя, управляющие таким образом движением механической части и ходом технологического процесса РМ.

Краткий обзор исторического пути развития электропривода. Для получения механической энергии в 19-м веке долгое время применялись паровые машины. Котёл и 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 был изобретён в 1834 г. русским академиком Б.С. Якоби. 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 прошёл испытания на движение по Неве. Этим была доказана возможность практического применения электропривода.

Но всё же до конца 19-го века пар и вода оставались основной силой, приводившей в движение станки и механизмы в промышленности.

В 80-х годах 19-го века было открыто явление вращающегося магнитного поля (Г. Феррарис, Н. Тесла). В 1891 г. русский инженер М.О. Доливо-Добровольский, используя это явление, изобрёл трёхфазный асинхронный двигатель, который в силу своей простоты и надёжности до настоящего времени является широко распространённым на промышленных предприятиях.

Рассмотрим основные этапы развития электропривода.

После изобретения электрических двигателей, общезаводской паровой привод был заменён на *электрический привод*. 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 дворы 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, так как были велики потери в трансмиссиях. Групповой электропривод характерен для промышленных предприятий дореволюционной России.

Затем групповой электропривод был заменён *одиночным электроприводом*, в котором каждая производственная машина снабжалась отдельным электродвигателем. Ещё позже производственные установки и агрегаты с несколькими подвижными узлами стали снабжаться отдельными электродвигателями для перемещения каждого узла – это был уже *многодвигательный электропривод*.

Число электродвигателей, устанавливаемых на одной производственной установке (или, например, на производственной линии из нескольких агрегатов), могло доходить до нескольких десятков. Быстрое и точное ручное управление этими электродвигателями (с помощью кнопок, переключателей) для рабочего становится трудным, а иногда и непосильным. По этой причине стали применять *автоматизированный многодвигательный привод*, в котором управление электродвигателями (пуск, останов, реверс в нужное время и в требуемых сочетаниях) осуществляют с помощью *автоматизированных систем управления (АСУ)*. В таких АЭП для быстрого, точного и надёжного управления используют последние достижения электроавтоматики, электроники, микропроцессорной и полупроводниковой техники.

Характерной чертой развития АЭП современных производственных машин является непрерывное упрощение механических передач и приближение электродвигателей к исполнительным органам машины. АСУ электроприводами производственной машины обращает ее в автомат, даёт возможность создавать автоматические линии, автоматические участки, цехи и даже заводы-автоматы, при этом используются разного рода промышленные роботы: автоматические рули, транспортёры, подъёмники, поворотные столы, электроключи, электрогайковёрты и т.п.

Металлургическая промышленность является крупнейшим потребителем электрической энергии. В ней *электровооруженность труда* (*отношение количества потребляемой электроэнергии к среднесписочному промышленно-производственному персоналу*) достигает 1,4 ГВт·ч/чел, а в ферросплавных цехах – 7 ГВт·ч/чел. В металлургической промышленности примерно 40 % себестоимости продукции приходится на электроэнергию и до 70 % стоимости оборудования цехов приходится на электрооборудование.

Успехи в развитии полупроводниковой техники позволили широко использовать в металлургии регулируемые тиристорные источники питания с бесконтактными системами автоматического управления. Мощность отдельных тиристорных преобразователей достигает десятков тысяч киловатт. От технического уровня, режима работы, условий эксплуатации электрооборудования зависят все основные показатели (производительность, качество, себестоимость и др.), характеризующие эффективность работы как отдельных цехов, так и всего металлургического предприятия в целом. В этих условиях успех производственной деятельности инженера-металлурга существенно зависит от его готовности к выполнению целого ряда функций, касающихся грамотной эксплуатации электрооборудования цехов. Поэтому инженеру, конструирующему или эксплуатирующему современные

машины, агрегаты и установки металлургического производства, необходимо хорошо знать их электрооборудование: применяемые электродвигатели и на их основе автоматизированные электроприводы, основные их электромеханические свойства и характеристики, контактную и бесконтактную аппаратуру и системы управления электроприводами, методы и средства автоматизации металлургического производства. Изучению перечисленных основных вопросов электрооборудования металлургических цехов и предназначен данный предмет.

Раздел 1. Основы электропривода и управления им

Тема 1.1. Общие сведения и механика электропривода

Классификация электроприводов. Основные технологические агрегаты и машины металлургического производства имеют автоматизированный электропривод. *Все системы управления* автоматизированными электроприводами можно разделить на *разомкнутые* и *замкнутые*. Разомкнутая система управления электроприводом строится без обратных связей: воздействуя через задающее устройство на аппаратуру управления, оператор осуществляет пуск, остановку привода, устанавливает задание на скорость электропривода (или другой параметр). Достоинством такой системы управления является простота схемы, состоящей из простейших элементов. Однако она обладает невысокими качествами регулирования. Поэтому такие системы используют для механизмов, не требующих точного регулирования параметров или их стабилизации (электрические краны, механизмы поточно-транспортной системы, воздуходувки, компрессоры).

В приводах основных металлургических машин и агрегатов используются замкнутые системы электропривода (с обратными связями), работающие по принципу отклонения, т.е. сигнал, пропорциональный выходной величине, подается на вход и сравнивается с задающим сигналом. В электроприводе применяют в основном *отрицательные обратные связи*, сигнал которых имеет отрицательный знак по отношению к задающему сигналу.

По технологическому назначению различают *главный электропривод*, обеспечивающий основную операцию технологического процесса (например, привод вала прокатного стана или привод механизма поворота конвертера), и *вспомогательный*, например привод нажимного устройства, привод кантователя, заслонки печи и т.п.

По возможному направлению вращения электродвигателя различают *реверсивный* и *нереверсивный* (с одним направлением вращения) электропривод.

По соотношению числа электродвигателей и исполнительных органов на одной рабочей машине электропривод может быть *групповым, индивидуальным и многодвигательным* (см. введение).

По роду тока различают электроприводы *постоянного или переменного тока, по виду преобразовательного устройства – тиристорный, транзисторный* и др.

Электроприводы также классифицируют *по степени управляемости на нерегулируемые, обеспечивающие лишь одну скорость рабочего органа машины, и регулируемые, позволяющие регулировать скорость исполнительного органа машины.* Наиболее совершенным видом регулируемого электропривода является электропривод с автоматическим регулированием скорости, выполняемый по принципам стабилизации, программного управления, следящего или позиционного регулирования скорости. Перспективным является *адаптивный электропривод, автоматически регулирующий параметры системы в зависимости от изменяющихся условий работы (без участия оператора).*

Современный электропривод является в основном *регулируемым*, который благодаря своим достоинствам способствует повышению эффективности выполнения технологического процесса, качества продукции, производительности, экономических показателей работы агрегатов, цехов и всего металлургического предприятия.

Основные показатели регулируемых электроприводов. В металлургических цехах многие технологические процессы требуют регулирования скорости. Например, для каждого профиля и сорта прокатываемого металла имеются свои наиболее выгодные скорости, определяющие высокую производительность станка и качество прокатки. Весьма точного регулирования скорости требуют механизмы МНЛЗ, поворота конвертеров, миксеров, перемещения электродов дуговых электропечей.

В настоящее время в металлургическом производстве используются в основном электрические методы регулирования воздействием на параметры электрической цепи двигателя или на параметры источников питания.

Каждый метод регулирования скорости можно характеризовать совокупностью таких основных показателей:

1. **Диапазон регулирования** $D = \omega_{\max} / \omega_{\min}$ – отношение максимальной скорости к минимальной при номинальном значении момента статической нагрузки. Он записывается в виде отношения, например 10:1; 150:1 и т.п.

2. Плавность регулирования, которая оценивается коэффициентом плавности $K_{пл}$, представляющим собой отношение угловых скоростей на двух соседних ступенях регулирования скорости

$$K_{пл} = \omega_i / \omega_{i-1} ,$$

где ω_i , ω_{i-1} – значения угловых скоростей двигателя на i -той и на $(i-1)$ -й ступенях регулирования.

Плавность регулирования характеризуется еще числом дискретных значений скорости в заданном диапазоне регулирования. И чем больше это число, тем выше плавность регулирования.

3. Точность регулирования, определяемая способностью электропривода поддерживать действительную скорость в соответствии с заданным её значением при возможных возмущающих воздействиях. Для оценки точности регулирования пользуются величиной относительного отклонения скорости $\Delta\omega_{max}$ от заданного её значения ω :

$$\delta = (\omega_{max} - \omega) / \omega = \Delta\omega_{max} / \omega .$$

4. Стабильность скорости на механической характеристике, которая определяется жесткостью этой характеристики. Чем больше жесткость этой характеристики, тем меньше сказывается влияние колебания нагрузки на скорость электродвигателя, тем устойчивее будет работа электропривода.

5. Направление регулирования скорости (вверх, вниз от основной скорости на естественной характеристике).

6. Экономичность регулирования определяется стоимостью регулировочных устройств и величиной суммарных потерь мощности при регулировании.

7. При автоматическом регулировании важное значение имеют **динамические показатели регулирования** (быстродействие, колебания и время регулирования), оцениваемые по характеру переходного процесса при скачкообразных возмущениях.

8. Мощность и момент электродвигателя при регулировании зависят от способа регулирования. Если момент двигателя на валу при любых скоростях остается постоянным, то такое регулирование называется *регулированием с постоянным моментом*. Мощность двигателя в этом случае пропорциональна угловой скорости $P = M \cdot \omega$ и выбирается для случая $\omega = \omega_{max}$. Если же на валу двигателя мощность неизменна при всех скоростях, то регулирование осуществляется *при постоянной мощности*. Момент при этом изменяется по гиперболе $M = P / \omega$ и мощность двигателя выбирается для случая $M = M_{max}$.

9. Для оценки электродвигателей имеют также значение **пусковые характеристики**, основными из которых являются *величины пускового тока и*

пускового момента. Они особенно существенны для асинхронных короткозамкнутых электродвигателей.

Механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей. При выборе электродвигателя к производственному механизму приходится выяснять, насколько механические свойства электродвигателя соответствуют механической характеристике рабочей машины и характеру ее работы, так как соответствие механических характеристик электродвигателя конкретному 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.

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

Различные 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 скорости ω ;

M_0 – момент сопротивления трения в движущихся частях механизма;

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

x – показатель степени, характеризующий изменение момента M_c при изменении скорости ω .

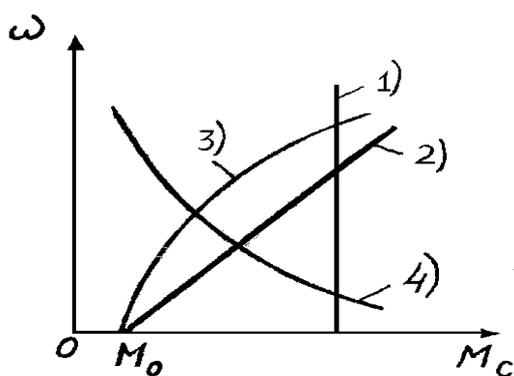


Рис. 2. Механические характеристики производственных механизмов

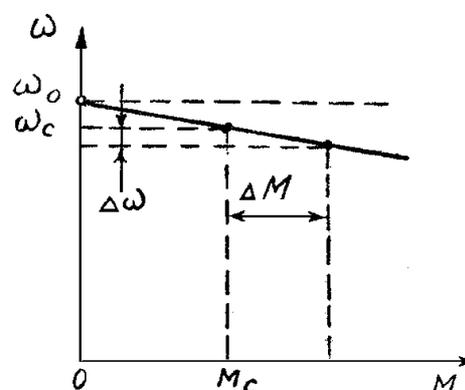


Рис. 3. К пояснению жесткости механической характеристики электродвигателя

Различают четыре основных вида (класса, категории) механических характеристик и соответственно производственных механизмов (рис. 2):

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

3) $x = 2$, $M_C = c \cdot \omega^2$. 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 скорости ω 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 параметрами, 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 ΔM к соответствующему приращению скорости $\Delta \omega$ (рис. 3):

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

Линейные механические характеристики имеют постоянную жесткость, а криволинейные – в каждой точке свою, равную первой производной от момента по скорости, т.е. $\beta = dM / d\omega$.

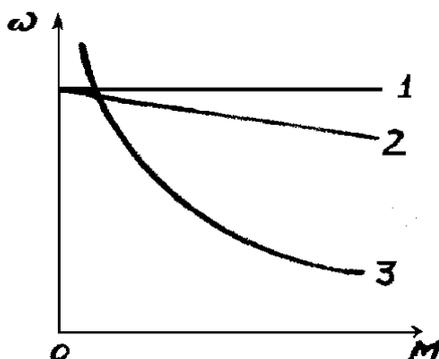


Рис. 4. Механические характеристики электродвигателей

Естественные механические характеристики электродвигателей по степени жесткости разделяются на следующие группы:

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

2) *Жесткая характеристика*, при которой скорость электродвигателя с возрастанием момента нагрузки уменьшается на небольшую величину ($\beta = 40 - 10$). К этой группе относятся асинхронные электродвигатели (работающие при скольжениях меньших критического) и двигатели постоянного тока с параллельным (и независимым) возбуждением.

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

Механические характеристики электродвигателей могут быть *жесткими* (прямые 1 и 2 на рис. 4), когда скорость не зависит или почти не зависит от вращающего момента, или *мягкими*, сильно наклоненными к оси моментов (кривая 3 на рис. 4).

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

$$M = M_c . \quad (1.1)$$

Такой режим работы электропривода называется *установившимся*.

При нарушении равенства (1.1) возникает динамический момент $M_{дин}$, характеризующий переходный режим. При этом уравнение равновесия моментов имеет вид:

$$M = M_c + M_{дин} , \quad (1.2)$$

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 (1.2).

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_B 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

$$M_B = M \pm M_0 .$$

Величина M_0 составляет несколько процентов от номинального момента M_H 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 двух слагаемых: 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** – моменты, которые во всех случаях являются тормозящими, противодействующими действию. 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 моментов **активные 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, $кг \cdot м^2$;

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

ω – угловая скорость, $рад / с$;

t – время, $с$.

При постоянном моменте инерции уравнение движения электропривода (1.2) запишется:

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} \quad \text{или} \quad M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} . \quad (1.3)$$

Знак перед $M_{дин}$, а следовательно, и перед $d\omega / dt$ зависит от соотношения величин и знаков M и M_c . При $M > M_c$ привод ускоряется, $d\omega / dt > 0$, $M_{дин}$ – положительная величина. При $M < M_c$ привод замедляется, $d\omega / dt < 0$, $M_{дин}$ – 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 ω .

В общем виде уравнение движения электропривода (1.3) с учетом режимов работы электродвигателя и знаков моментов можно записать так:

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

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 до нескольких кА при допустимом обратном напряжении до нескольких кВ. С помощью тиристора, включенного в цепь переменного тока, можно не только выпрямлять напряжение, но и регулировать его величину.

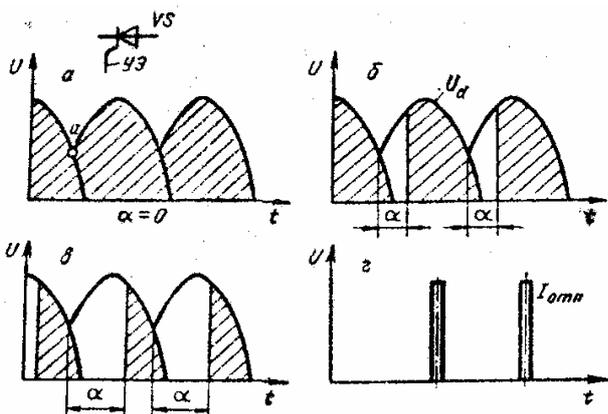


Рис. 5. Графики регулирования выходного напряжения тиристорного выпрямителя

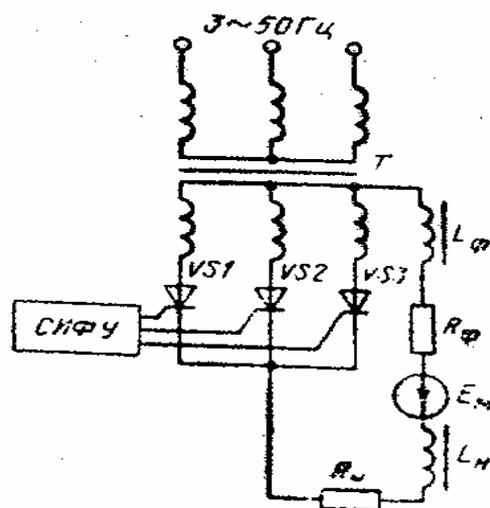


Рис. 6. Обобщенная схема тиристорного электропривода: VS1-VS3 - тиристоры; L_{ϕ} , R_{ϕ} - индуктивность и активное сопротивление фильтра; $L_{н}$, $R_{н}$ - то же нагрузки; E_m - ЭДС двигателя

Управление тиристором, т.е. включение, осуществляется с помощью управляющего электрода УЭ (рис. 5), 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. 5, a) тиристор запирается. Запереть тиристор с помощью управляющего электрода

невозможно, т.е. тиристор в отличие от транзистора является прибором полупроводяемым.

С помощью фазосдвигающего устройства схемы управления можно изменять фазу (момент) подачи отпирающего импульса (рис. 5, з) относительно точки естественной коммутации вентиля, т.е. можно изменять угол регулирования α .

Величина выпрямленного напряжения тиристорного преобразователя соответствует площади заштрихованного участка $U(t)$ (рис. 5, а – в).

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

где m – число фаз выпрямления;

U_2 – действующее значение линейного напряжения питающего трансформатора;

U_{d0} – максимальное выпрямленное напряжение преобразователя при полностью открытых тиристорах ($\alpha = 0$), $U_{d0} = \sqrt{2} \frac{m}{\pi} \sin(\pi/m) U_2$.

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

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. 6.

Виды передаточных механизмов. Электрические, механические и габаритные параметры электродвигателя взаимосвязаны. Например, номинальные мощность P_H , вращающий момент M_H , угловая скорость ротора (якоря) ω_H , диаметр D и длина L активной части якоря электрической машины связаны соотношениями:

$$P_H = M_H \omega_H; \quad M_H = C_k D^2 L,$$

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 ω_H , особенно для маломощных двигателей ($\omega_H = 100 - 600$ 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 при этом может изменять и характер движения, преобразуя вращательное движение в поступательное.

По конструктивному исполнению различают следующие основные виды ПМ (рис. 7):

- 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.

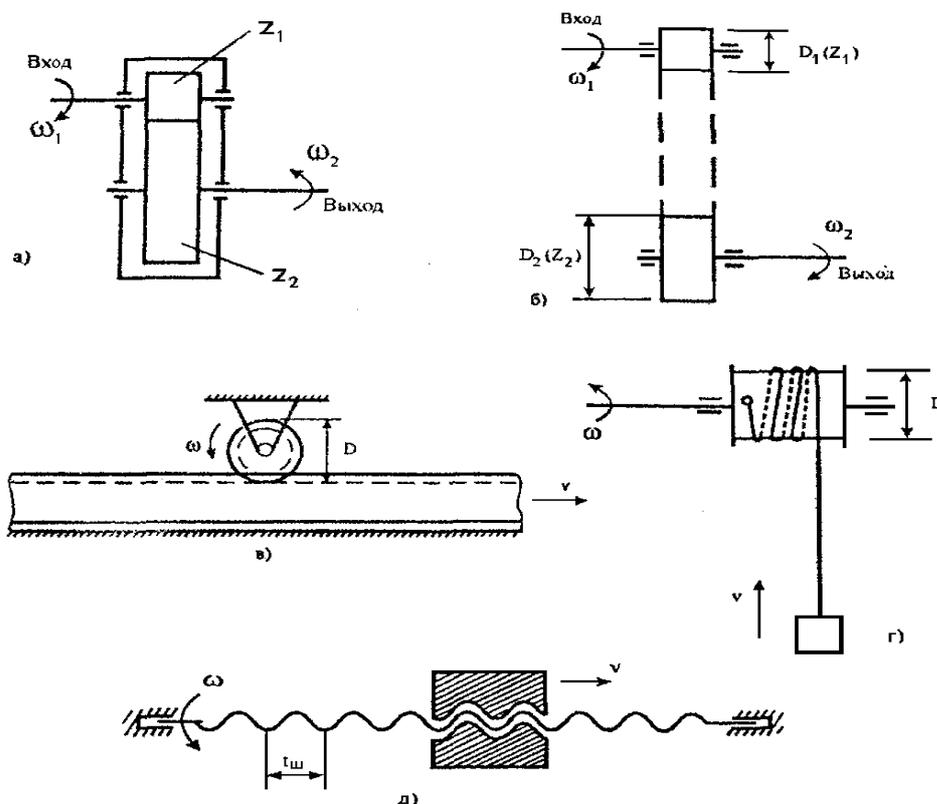


Рис. 7. Кинематические звенья:

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

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.

Редуктор характеризуется передаточным числом j :

$$j = \omega_1 / \omega_2 ,$$

где ω_1 – входная скорость,
 ω_2 – выходная скорость.

Передаточное число n-ступенчатого редуктора

$$j = j_1 j_2 \dots j_n ,$$

где j_1, j_2, \dots, j_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. Совместная компоновка электродвигателя и редуктора называется **мотор-редуктором**.

Ременные (цепные) передачи характеризуются передаточным числом

$$j = \omega_1 / \omega_2 = D_2 / D_1 = Z_2 / Z_1 ,$$

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 ρ* :

$$\rho = V / \omega , \text{ м/рад.}$$

Расчетные схемы механической части ЭП. Механическая часть ЭП может представлять сложную кинематическую схему с большим числом движущихся элементов, при этом одни элементы совершают вращательное движение, а 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 жестким*. При таком допущении движение одного элемента дает полную

информацию о движении и других элементах. Обычно в качестве такого первоначального элемента принимают вал двигателя. Тогда расчетная схема механизма многомассовой механической части ЭП (рис.8,а и рис.9,а) сводится к одному обобщенному жесткому механическому звену (рис.8,б и рис.9,б), имеющему эквивалентную массу с моментом инерции J , угловую скорость вращения ω , угол поворота φ , и на которое 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 механические потери в двигателе).

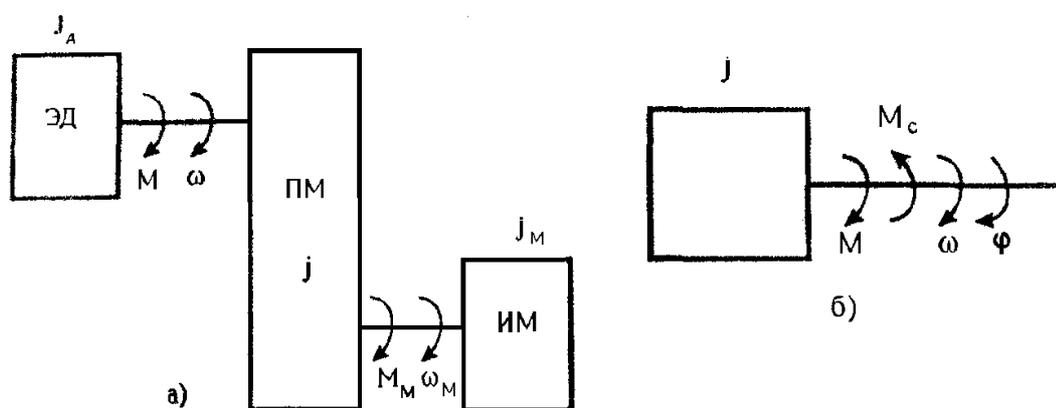


Рис. 8. Приведение многомассовой системы к одномассовой при вращательном движении механизма

Приведение моментов сопротивления и сил, моментов инерции и масс к валу электродвигателя. Сначала примем допущение, что передаточный механизм ПМ (рис.8,а) идеальный, т.е. не имеет потерь энергии ($\eta_{п} = 1$), не обладает массой и осуществляет только количественное преобразование механической энергии от двигателя к производственному механизму. Учет потерь в ПМ рассмотрим несколько позже.

Приведение статических моментов сопротивления к валу осуществляется из условия равенства передаваемой мощности на любом валу (рис. 8, а):

$$M_c \omega = M_M \omega_M .$$

Из этого равенства находим выражение для определения приведенного статического момента M_c :

$$M_c = M_M (\omega_M / \omega) = M_M / j , \quad (1.4)$$

где j – 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 j ПМ. В этом и заключается приведение момента сопротивления ИМ к валу электродвигателя.

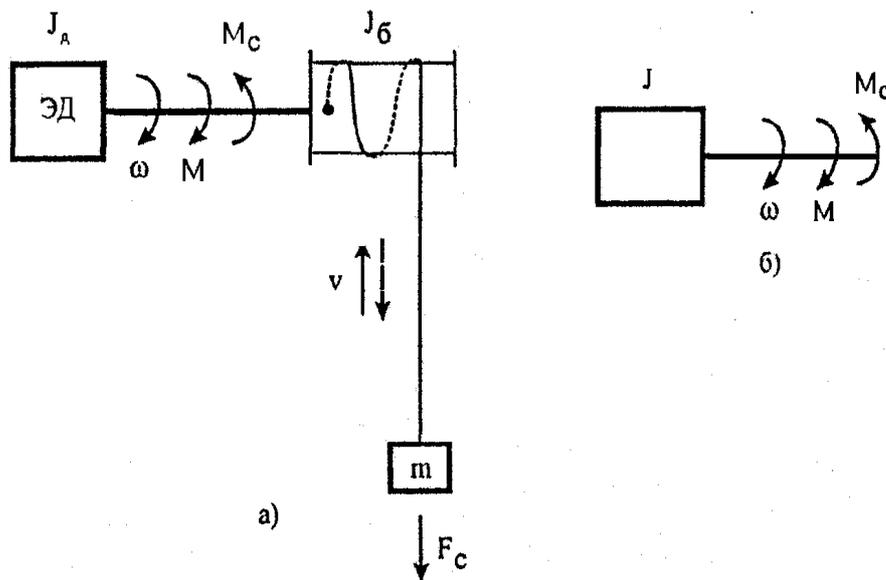


Рис. 9. Приведение многомассовой системы к одномассовой при поступательном движении механизма

При поступательном движении ИМ (рис. 9, 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 V – линейная скорость подъема груза;

F_c – сила сопротивления в установившемся режиме;

M_c – эквивалентный статический момент на валу ЭД одномассовой системы (рис. 9, б).

Тогда из этого равенства получаем:

$$M_c = F_c \cdot V / \omega = F_c \cdot \rho , \tag{1.5}$$

где ρ – 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 ρ .

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

Приведение моментов инерции ИМ к валу ЭД осуществляется из условия, что величина суммарного запаса кинетической энергии системы, приведенной к валу ЭД, остается неизменной (рис. 8):

$$J \omega^2/2 = J_{\text{д}} \omega^2/2 + J_{\text{М}} \omega_{\text{М}}^2/2 .$$

Из этого равенства находим, что суммарный момент инерции приведенной системы равен:

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

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:

$$J_{\text{М}}' = J_{\text{М}} / j^2 .$$

Для поступательного движения ИМ (рис.9) приведение поступательно движущихся масс к вращательному движению вала ЭД осуществляется на основании равенства кинетических энергий приведенной и неприведенной систем:

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

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 $J_{\text{М}}'$ – приведенный к валу ЭД момент инерции поступательно движущейся массы m , $J_{\text{М}}' = m\rho^2$.

Следовательно, приведенный к валу ЭД момент инерции поступательно движущейся массы m равен произведению этой массы на радиус приведения ρ 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. 39).

Механическая часть ЭП (рис. 10) включает ротор ЭД, вращающийся с угловой скоростью ω и приложенным моментом M , передаточный механизм ПМ с КПД $\eta_{\text{П}}$ и передаточным числом j и исполнительный механизм ИМ, вращающийся со скоростью $\omega_{\text{И}}$ и приложенным моментом сопротивления $M_{\text{И}}$. 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 $M_{\text{С}}$, который учитывает момент сопротивления $M_{\text{И}}$ ИМ и момент потерь в ПМ, т.е. $M = M_{\text{С}}$. Для наглядности обозначим $M_{\text{С}}$ в двигательном режиме ЭП через $M_{\text{С}}^{\uparrow}$, а в тормозном – через $M_{\text{С}}^{\downarrow}$. Тогда, исходя из закона сохранения энергии, можно записать равенства:

$$\omega M_{\text{С}}^{\uparrow} \eta_{\text{П}} = M_{\text{И}} \omega_{\text{И}} \quad \text{для двигательного режима,}$$

$$M_{\text{И}} \omega_{\text{И}} \eta_{\text{П}} = M_{\text{С}}^{\downarrow} \omega \quad \text{для тормозного режима,}$$

из которых следует, что:

$$M_{\text{С}}^{\uparrow} = (M_{\text{И}} \omega_{\text{И}}) / (\omega \eta_{\text{П}}) = M_{\text{И}} / (j \eta_{\text{П}}) = M_{\text{И}}' / \eta_{\text{П}},$$

$$M_{\text{С}}^{\downarrow} = M_{\text{И}} \omega_{\text{И}} \eta_{\text{П}} / \omega = M_{\text{И}} \eta_{\text{П}} / j = M_{\text{И}}' \eta_{\text{П}},$$

где $M_{\text{И}}'$ – момент ИМ, приведенный к валу ЭД без учета потерь в ПМ.

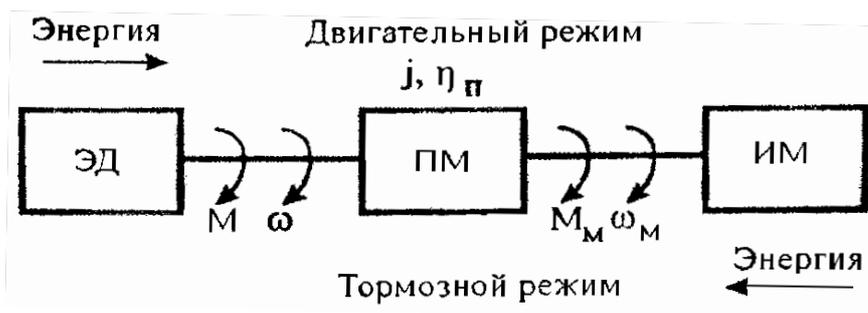


Рис. 10. Механическая часть электропривода

Следовательно, для учета потерь в ПМ при приведении статических моментов и сил сопротивления ИМ в формулах (1.4) и (1.5) необходимо в двигательном режиме работы ЭП учесть КПД $\eta_{\text{П}}$ в знаменателе, а в тормозном режиме – в числителе, т.е.:

$$M_{\text{С}}^{\uparrow} = M_{\text{И}} / (j \eta_{\text{П}}) = F_{\text{С}} \rho / \eta_{\text{П}},$$

$$M_{\text{С}}^{\downarrow} = M_{\text{И}} \eta_{\text{П}} / j = F_{\text{С}} \rho \eta_{\text{П}}.$$

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

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

где α коэффициент постоянных потерь, который для ряда передач приводится в справочниках.

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

Тема 1.2. Электромеханические свойства электродвигателей

Механические характеристики асинхронных электродвигателей.

Асинхронные электродвигатели нашли широкое применение в промышленности благодаря простоте конструкции, надёжности и экономичности в эксплуатации, минимальной стоимости и возможности питания от электрической сети переменного тока.

Схема асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором приведена на рисунке 11, а, с фазным ротором – на рис. 11, в, а соответствующие им механические характеристики в двигательном режиме – на рис. 11, б и г.

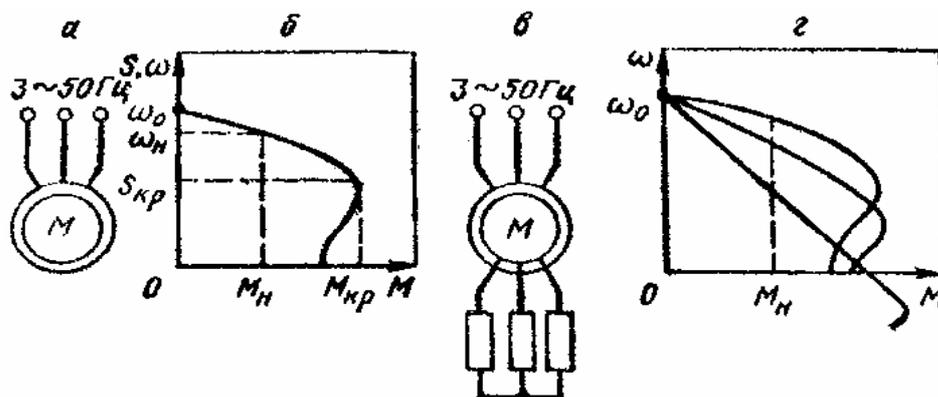


Рис. 11. Схемы и механические характеристики асинхронных двигателей

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

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

Угловая скорость ω_0 и частота вращения n_0 магнитного поля статора, называемые синхронными, равны:

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p ; \quad n_0 = 60 f_1 / p ,$$

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

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 его режиме, называют его **номинальной мощностью**. Соответствующие этой мощности значения тока I_n , частоты вращения n_n , скольжения S_n называют **номинальными значениями** этих величин. Номинальное скольжение асинхронного двигателя составляет 1,5-1,7% (меньшие значения относятся к двигателям большей мощности).

Электромагнитный вращающий момент асинхронного двигателя, как и любой электрической машины, пропорционален магнитному потоку Φ 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**

$$S_k \approx R_2' / X_{k-3} ,$$

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

X_{k-3} – индуктивное сопротивления цепи короткого замыкания ($X_{k-3} = X_1 + X_2'$).

Величина критического момента M_k определяет перегрузочную способность электродвигателя. У асинхронных короткозамкнутых электродвигателей нормального исполнения кратность критического момента $\lambda_k = M_k / M_n = 1,8 \div 2,5$, у двигателей краново-металлургической серии $\lambda_k = 2 \div 3,5$. Величина критического момента пропорциональна квадрату напряжения в сети $\dot{U}1$:

$$M_k = 3U_1^2 / (2\omega_0 X_{k-3}) .$$

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 равной $\lambda = 0,9^2 \lambda_k$.

Уравнение механической характеристики асинхронного электродвигателя имеет вид (упрощённая формула Клосса):

$$M = 2M_k / (S/S_k + S_k/S). \quad (1.6)$$

По данной формуле, зная значения M_k и S_k , можно рассчитать соответствующие значения момента M для разных положительных и отрицательных значений S (в том числе и значений $S < 1$), а затем по ним построить механическую характеристику.

В каталогах обычно приводят следующие технические данные асинхронного двигателя: P_n (кВт), n и n_0 (об/мин), λ_k и $\lambda_{II} = M_{II} / M_H$ (M_{II} – пусковой момент). По этим данным можно определить значение всех величин, необходимых для расчета и определения механических характеристик по (1.6), из выражений:

$$\omega_H = \pi n_H / 30; \quad \omega_0 = \pi n_0 / 30; \quad M_H = P_H / \omega_H; \quad M_k = \lambda_k M_H;$$

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0}; \quad s_k = s_H (\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1}).$$

На рисунке 5, б и г изображены механические характеристики асинхронного электродвигателя, из которых видно, что верхний (рабочий) участок естественной характеристики обладает большой жёсткостью β ($\beta = dM/ds$). Увеличение сопротивления в цепи ротора приводит к увеличению критического скольжения S_k , а критический момент M_k остается неизменным, т. е. жесткость искусственных механических характеристик уменьшается с увеличением активного сопротивления в цепи ротора.

Асинхронный двигатель может работать во всех трёх известных тормозных режимах.

Рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть возможно при угловой скорости выше синхронной ($\omega > \omega_0$), например, при спуске груза. При этом скольжение будет отрицательным $S = (\omega_0 - \omega) / \omega_0 < 0$. Активная мощность при этом изменит знак, т.е. электрическая машина будет работать генератором, преобразуя кинетическую энергию опускающегося груза в электрическую и отдавая её в сеть. Механические характеристики являются продолжением характеристик двигательного режима и располагаются во II и IV квадратах (рис. 12, линии с двумя засечками).

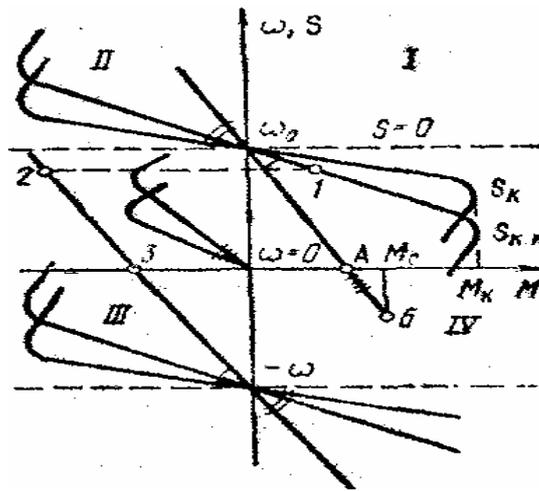


Рис. 12. Совмещенные механические характеристики АД

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. Поэтому для ограничения тока в цепь ротора вводят ступень реостата. Механические характеристики в этом режиме торможения являются продолжением характеристик двигательного режима (при $S > 1$ или $\omega < 0$) и располагаются во II и IV квадратах (рис.12, линии с двумя засечками). Таким образом, ротор двигателя, включённого на подъём, вращается в противоположную сторону, так как в цепь ротора введено большое сопротивление и момент электродвигателя достигает момента сопротивления лишь при отрицательном скольжении (на рис.12 точка б). Такой режим часто используется в металлургических кранах при спуске грузов в тормозном режиме.

Торможение **противовключением** может осуществляться реверсом магнитного поля статора (путём перемены местами двух фаз статора). Одновременно в цепь ротора вводится ступень реостата, ограничивающая ток и увеличивающая тормозной момент. На рис. 12 показан график перехода асинхронного двигателя с фазным ротором в режим 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 начнёт вращаться в противоположном направлении.

В режиме **динамического торможения** двигатель отключают от сети переменного тока и две фазы обмотки статора подключают к источнику постоянного тока. В результате в статоре создаётся неподвижное в пространстве магнитное поле, которое индуцирует в обмотках вращающегося ротора ток. Взаимодействие этого тока с неподвижным полем статора создаёт тормозной момент. На рис. 12 показаны

механические характеристики в этом режиме при различных значениях сопротивления цепи ротора (линии с тремя засечками).

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, фехраля и других сплавов с повышенным сопротивлением. По мере разгона двигателя реостат выводится ступенями или путём замыкания соответствующих контактов.

В случае если питающая сеть недостаточно мощная, применяется пуск асинхронных двигателей при пониженном напряжении с помощью реактора L или автотрансформатора (рис. 13). При реакторном пуске вначале замыкается линейный контактор $KM1$, а после разгона двигателя замыкается контактор $KM2$, а $KM1$ отключается. При автотрансформаторном пуске вначале включаются контакторы $KM1$ и $KM3$, а после разгона двигателя контакторы $KM1$ и $KM3$ отключаются, а контактор $KM2$ включает двигатель на полное напряжение сети.

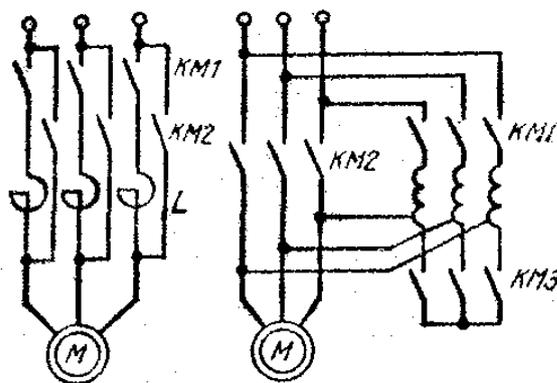


Рис. 13. Схема пуска при пониженном напряжении

Электромеханические свойства синхронных двигателей. Синхронные двигатели в основном применяются в приводах средней и большой мощности, когда режим работы длительный и регулирования скорости не требуется: воздуходувки, эксгаустеры, компрессоры, вентиляторы и насосы, дробилки, мельницы, приводы черновых клетей прокатных станов, ножниц. Достоинствами этих двигателей являются простота конструкции, надежность, высокие значения $\cos\varphi$ и КПД, возможность работы с $\cos\varphi = 1$ и даже с опережающим током, что позволяет осуществлять компенсацию реактивной мощности других электроприемников сети.

Механическая характеристика синхронного двигателя (рис. 14, б) 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 (θ) оси полюсов ротора и полюсов вращающегося поля статора (или угол сдвига вектора напряжения статора относительно вектора ЭДС, индуцированной в обмотке статора полем ротора).

Электромагнитный момент синхронного двигателя $M = M_{\text{макс}} \text{Sin}\theta$.

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 . А 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 $\theta = 20\text{-}30^\circ$. Поэтому перегрузочная способность синхронного двигателя $\lambda_{\text{к}} = M_{\text{макс}}/M_{\text{н}} = 2\text{-}3$.

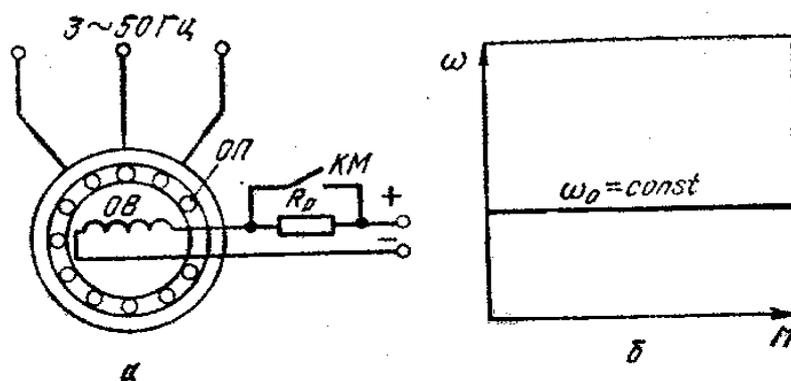


Рис. 14. Схема синхронного двигателя и его механическая характеристика

Максимальный момент $M_{\text{макс}}$ пропорционален фазному напряжению сети и току в обмотке возбуждения. Поэтому перегрузочная способность синхронного двигателя может быть повышена путем увеличения тока возбуждения. А это позволяет обеспечить устойчивую работу двигателя при значительных толчках нагрузки и колебаниях напряжения сети. Синхронный двигатель менее чувствителен к колебаниям напряжения сети, чем асинхронный двигатель, 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 торможение. 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, то такое торможение нежелательно.

При динамическом торможении возбуждение синхронного двигателя сохраняется, а обмотка статора отключается от сети и замыкается на тормозной резистор. Механические характеристики его 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 этих 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 металлургических цехов или всего завода. В этом случае синхронный двигатель выполняет кроме основной функции также и функцию синхронного компенсатора, что дает большой экономический эффект.

Механические характеристики электродвигателей постоянного тока.

Электродвигатели постоянного тока могут иметь независимое, параллельное, последовательное или смешанное возбуждение (рис. 15).

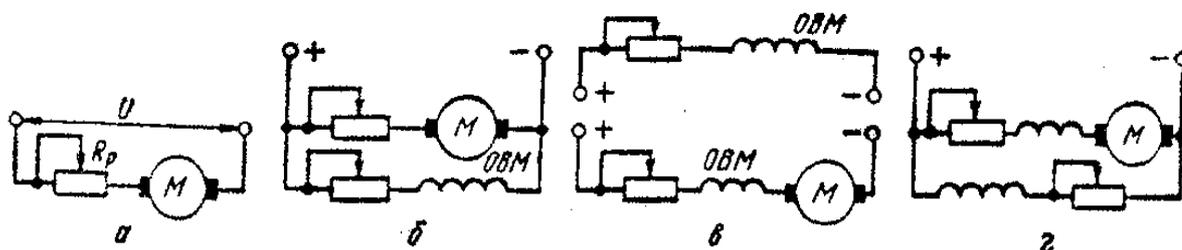


Рис. 15. Схемы электродвигателей постоянного тока независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения (верхняя часть схемы «в» принадлежит схеме «а»)

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 якорю 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

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_a ; \quad E = k \cdot \Phi \cdot \omega ,$$

где k – конструктивный коэффициент двигателя;

ω – угловая скорость, рад/с;

Φ – магнитный поток, Вб;

I_a – ток якоря, А.

Уравнения электромеханической $\omega = f(I_a)$ и механической $\omega = f(M)$ характеристик имеют вид:

$$\omega = U / (k\Phi) - (R_a + R_p) / (k\Phi) I_a;$$

$$\omega = U / (k\Phi) - (R_a + R_p) / (k^2 \Phi^2) M. \quad (1.7)$$

Угловая скорость идеального холостого хода (при $I_a = 0$ или $M = 0$)

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

На рис. 16 представлены механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТНВ) во всех режимах работы. Характерными точками характеристик в двигательном режиме являются: точка идеального холостого хода ($\omega_0, M = 0$); точка номинального режима (ω_n, M_n); точка короткого замыкания ($\omega = 0, M = M_k$).

Жесткость механической характеристики определяется потоком возбуждения и сопротивлением якорной цепи:

$$\beta = dM/d\omega = -k^2 \Phi^2 / (R_a + R_p) = -M_k / \omega_0.$$

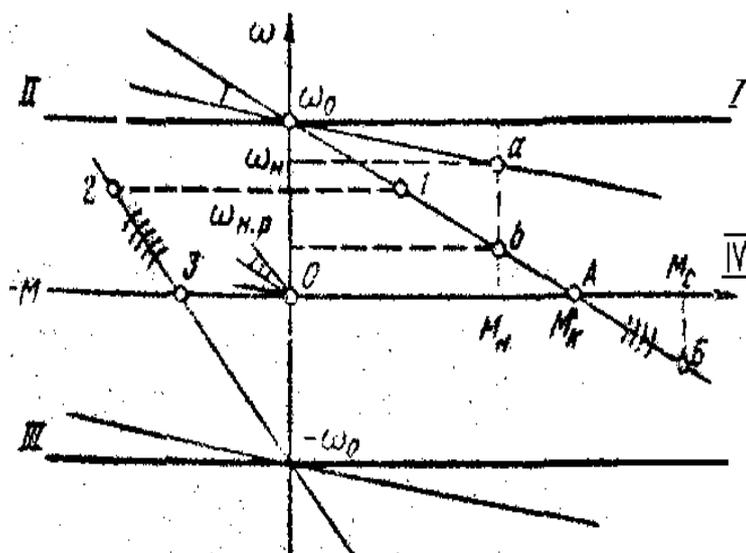


Рис. 16. Совмещенные механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Наибольшее значение модуля жесткости соответствует естественной механической характеристике, так как ток возбуждения равен номинальному и регулировочное сопротивление $R_p = 0$. По мере увеличения сопротивления реостата R_p наклон механической характеристики возрастает, а угловая скорость при этом снижается (см. рис. 16). При заданном значении сопротивления R_p и номинальном моменте M_n угловая скорость двигателя

$$\omega_{н,р} = \omega_0 (1 - I_n (R_{я} + R_p)) / U_n .$$

Для расчета механических характеристик необходимо знать сопротивление якоря двигателя $R_{я}$, которое задается в каталогах. При отсутствии заводских данных величину $R_{я}$ находят ориентировочно по формуле: $R_{я} = 0,5 (1 - \eta_n) (U_n / I_n)$.

Так как механические характеристики ДПТНВ прямолинейны, то 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 ДПТНВ возможны следующие три режима электрического торможения.

1. Рекуперативное торможение, которое происходит при скорости 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 квадрант (на рис. 16 линии с двумя засечками). Схема двигателя при рекуперативном торможении не изменяется.

2. Динамическое торможение, когда 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 этом режиме торможения проходят через начало координат (на рис. 16 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. 16 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 (ДПТВ) ток якоря одновременно является и током возбуждения. Поэтому магнитный поток возбуждения растет с увеличением нагрузки, вследствие чего угловая скорость снижается согласно уравнению (1.7) и механическая характеристика двигателя будет мягкой (рис. 17). Благодаря этому ДПТВ сравнительно легко и плавно преодолевает перегрузки и имеет высокий пусковой момент. Эти свойства двигателя позволяют широко применять его в приводе транспортных механизмов, а также механизмов, производящих слив жидкого металла (конвертеров, миксеров, кранов). Механические характеристики двигателя значительно смягчаются при введении в цепь якоря реостата (см. рис. 17, линии с одной засечкой).

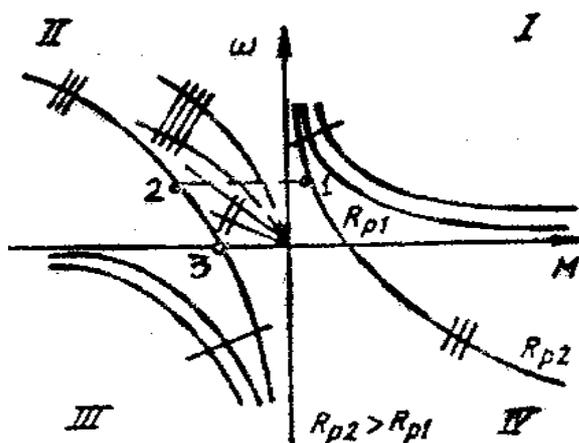


Рис. 17. Механические характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

У ДПТВ 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, при этом во избежание 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. 17 кривые с четырьмя засечками).

Механические характеристики двигателя в режиме динамического торможения с независимым возбуждением аналогичны соответствующим характеристикам двигателя с независимым возбуждением (на рис. 17 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 ДПТНВ, двумя способами: 1) включением в цепь якоря большого сопротивления и 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. 17 линия с тремя засечками). При втором способе торможение осуществляется по линии 1-2-3.

Тема 1.3. Аппаратура и схемы управления электроприводами

Контактная аппаратура непосредственного (ручного) управления. К этой группе относятся простейшие 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, 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 контактов 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 стенками 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 выше 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. Их применяют для снятия напряжения со схемы электроустановки при ремонтах, осмотрах и длительных остановках (в перерывах между сменами и т.п.).

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

Командоконтроллеры. Они служат для ручного дистанционного управления механизмами кранов, прокатных станов. На рис.18,а приведено устройство контактной части кулачкового командоконтроллера. При повороте рукоятки командоконтроллера 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.

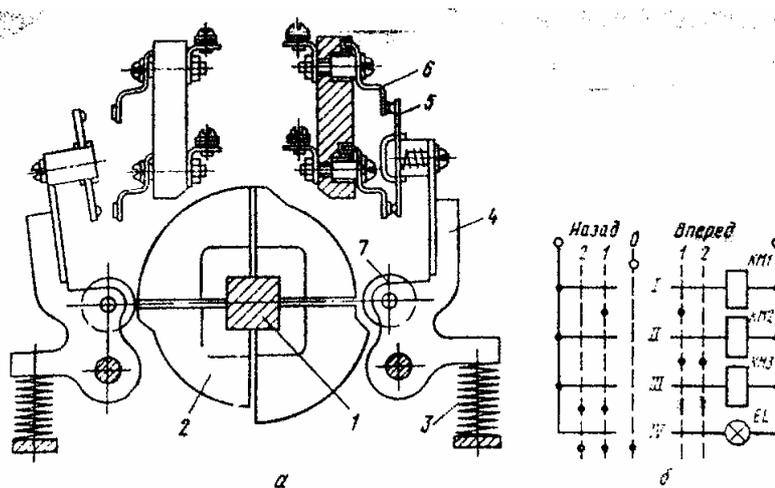


Рис. 18. Кулачковый командоконтроллер

На рис. 18, 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.

Релейно-контакторная аппаратура. Основными элементами релейно-контакторной аппаратуры являются контакторы, магнитные пускатели и реле.

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

Контакторы различаются:

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

Основными элементами контактора (рис. 19) 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 М 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 и пусковые броски тока минимальны. Поэтому в электроприводе металлургических механизмов используют в основном контакторы с катушками постоянного тока, получающими питание от специального выпрямителя небольшой мощности. Время включения контакторов составляет 0,05-0,5 с, а время отключения – 0,03-0,05 с.

Магнитные пускатели применяют для дистанционного и автоматического управления (пуск, останов, реверс) трехфазными асинхронными двигателями. Его основные элементы: контактор и тепловые реле. Реверсивные магнитные пускатели имеют два контактора в одном корпусе и 2 тепловых реле (для защиты двигателя от перегрузок по току).

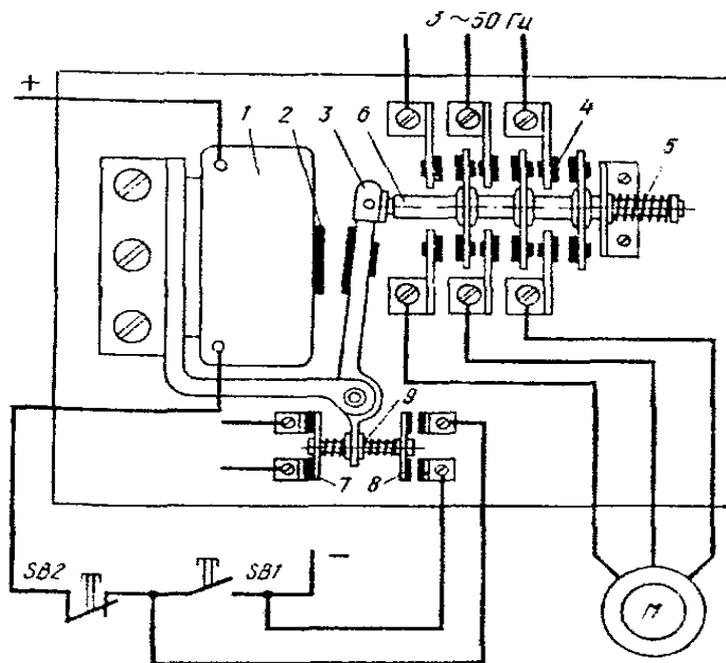


Рис. 19. Схема контактора

Реле. Они 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 и бесконтактными. Они могут 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 ($K_v=0,4-0,95$).

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 переключаются вновь под воздействием возвратной пружины в исходное положение.

Многоконтактные электромагнитные реле, используемые для размножения поступающих на его вход сигналов, а иногда для их усиления, называются промежуточными реле. Серийно выпускаемые универсальные промежуточные реле имеют до 10 пар контактов, на номинальный ток 0,4-10 А. Катушки их рассчитаны на номинальные напряжения 24-660 В.

Все более широкое применение находят *герконовые* реле с электромагнитной памятью (рис. 20). 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 отпускания реле необходимо подать импульс тока обратного направления. Число контактов 1:10; потребляемая мощность катушки 0,1-2 Вт. Достоинствами герконов являются: высокое быстродействие, износостойчивость (до 10^9 срабатываний), малые габариты, невысокая стоимость.

Широкое распространение получили *пневматические реле времени*, обеспечивающие выдержку времени от 0,4 с до 180 с. В электроприводе используются и *реле времени* для отсчета требуемых временных задержек (выдержек). Наибольшее применение находят электромагнитные реле времени постоянного тока, обеспечивающие выдержки времени от 0,3 до 16 секунд (в зависимости от исполнения).

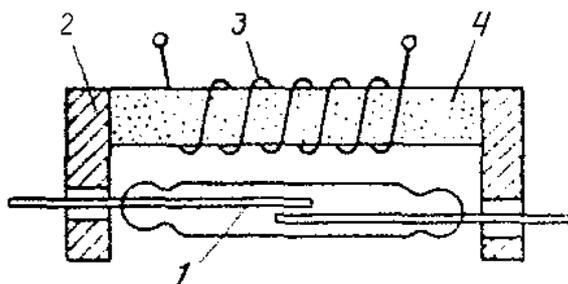


Рис. 20. Схема устройства геркона

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 уставки.

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

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). При этом различные элементы одного аппарата на чертеже оказываются в разных частях схемы и поэтому 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*):

A – усилители; **B** – преобразователи неэлектрических величин в электрические (датчики; например, **BR** – тахогенератор); **C** – 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, **KM** – контактор, магнитный пускатель); **M** – 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); **T** – трансформаторы (**TA** – трансформатор тока, **TU** – трансформатор напряжения); **U** – преобразователи 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 иногда 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. 21,а приведена простейшая схема управления пуском асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Для пуска включают рубильник **QS** и нажимают на кнопку **SB1**. Контактор **KM1** при этом включается (так как через размыкающий контакт кнопки **SB2** и кнопку **SB1** образуется замкнутая цепь для катушки контактора **KM1**) и своими главными контактами (с дугогашением) **KM1** подключает статор двигателя к сети. Замыкающий блок-контакт контактора **KM1** шунтирует кнопку **SB1** (это позволяет отпустить кнопку **SB1**, не отключая катушки контактора **KM1**). Этот блок-контакт **KM1** называют контактом *самопитания* или контактом *самоблокировки*. Отключение электродвигателя от сети осуществляется нажатием кнопки **SB2** (по катушке **KM1** протекание тока прерывается, контактор отключится, разомкнув три силовых контакта **KM1** в цепи двигателя **M**), после чего схема приходит в исходное состояние.

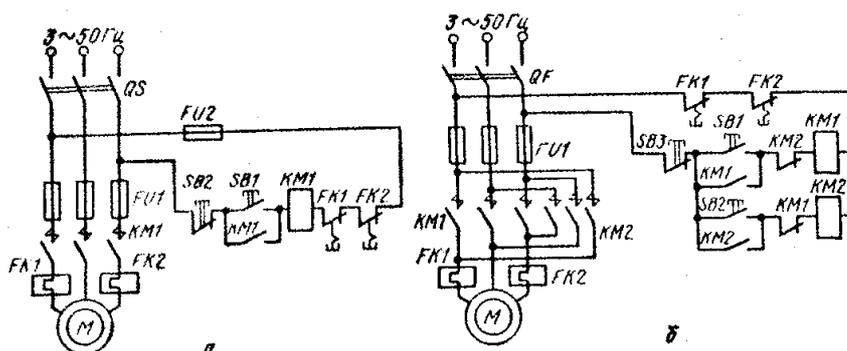


Рис. 21. Схемы пуска асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

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 **KM1** отпадает, размыкая все свои контакты, включая и блок-контакты, а при появлении напряжения в сети контактор **KM1** 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 явиться причиной аварии или несчастного случая.

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

На рис. 21, 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 рис. 21 защита двигателя *M* 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 *M* 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.

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. 21, 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. 22), 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, либо через заданные промежутки времени.

На рис. 22, 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 .

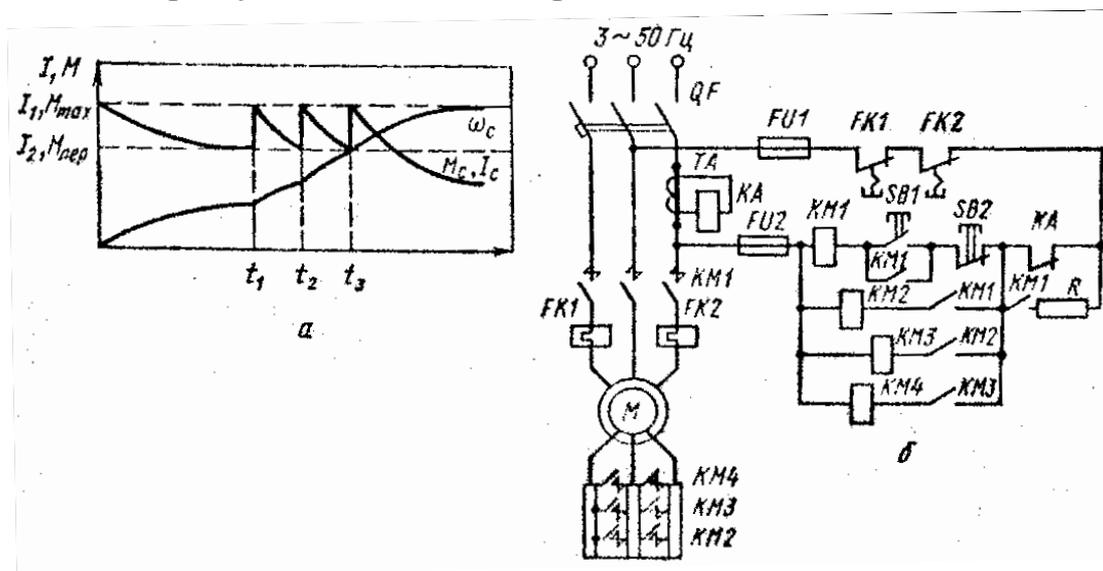


Рис.22. Пусковая диаграмма (а) и схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором в функции тока (б)

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

Схема автоматизации пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением посредством электромагнитных реле времени $1PY$ и $2PY$, называемых в таких схемах реле ускорения, приведена на рис. 23.

При включении схемы ток проходит через обмотку $1PY$, якорь $Я$ электродвигателя и две ступени пускового реостата $R1$ и $R2$. Реле $1PY$ при этом включается и его размыкающий контакт открывается. Вследствие большого сопротивления катушки $1PY$ ток в цепи включения реле мал и никакого действия на электродвигатель не оказывает. В обмотку реле $2PY$, включенную параллельно ступени $R1$ пускового реостата, ответвляется очень небольшой ток, от которого реле сработать не может. По обмотке возбуждения электродвигателя ток протекает.

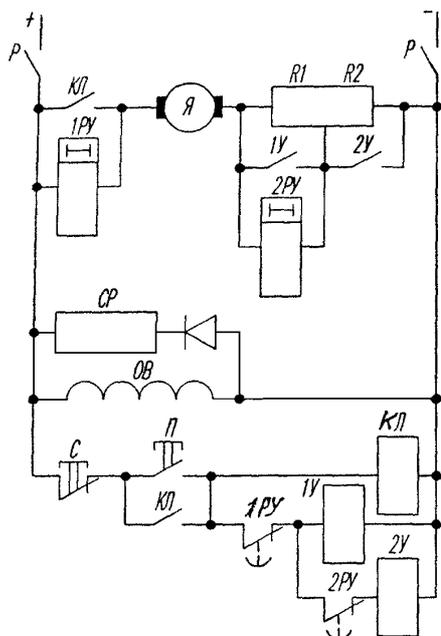


Рис. 23. Автоматизация пуска двигателя постоянного тока

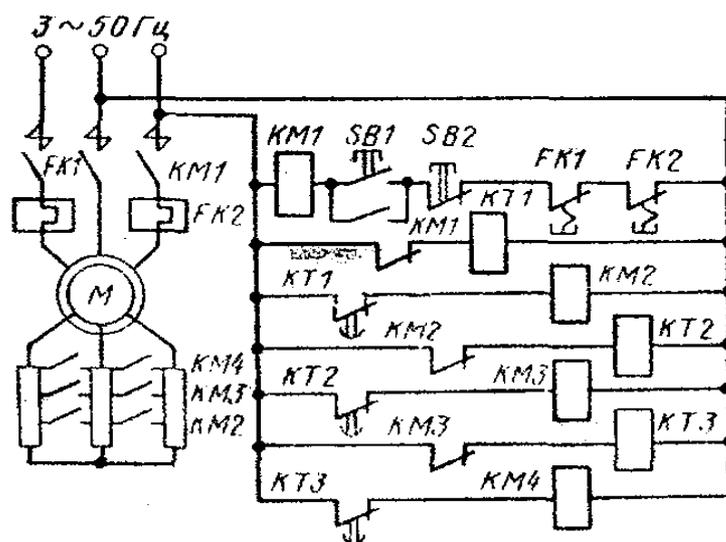


Рис. 24. Схема пуска АД с фазным ротором в функции времени

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 $2PY$, которое теперь включается и открывается мгновенно его контакт в цепи катушки $2У$. Одновременно с включением цепи якоря рабочий контакт $КЛ$ линейного контактора замыкает накоротко катушку реле времени $1PY$. Ток в катушке $1PY$ убывает и через некоторое время реле отпадает, закрывая свой размыкающий контакт $1PY$ в цепи катушки $1У$. При этом включается

контактор $IУ$, главный контакт которого замыкает накоротко ступень $R1$ пускового реостата и одновременно – катушку реле времени $2PУ$. Реле это отпадает с выдержкой времени и размыкающим контактом $2PУ$ включает контактор $2У$, а главный контакт последнего замыкает накоротко вторую ступень $R2$ пускового реостата.

Параллельно обмотке возбуждения OB включен разрядный резистор CP (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. 24. Нажатием кнопки $SB1$ подается питание на катушку контактора $KM1$, который, включившись, своими главными контактами подключает электродвигатель M к сети при полностью введенном в цепь ротора реостате. Размыкающий блок-контакт $KM1$ отключает реле времени $KT1$ и последнее с выдержкой времени включает первый ускоряющий контактор $KM2$. Последний, включившись, 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.

Автоматическое управление в функции скорости. Простейшим командным аппаратом в системах автоматического управления в функции скорости является *индукционное реле контроля скорости* (рис. 25). Валик 1 реле связывают с валом электродвигателя, скорость которого необходимо контролировать. На этом валике закреплён 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.

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 перестаёт нажимать на контактные пружины 8 и 9 , и контактная система приходит в нормальное положение.

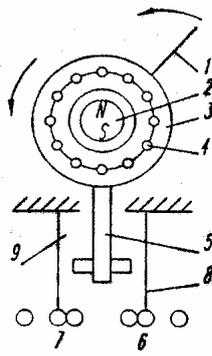


Рис. 25. Индукционное реле контроля скорости

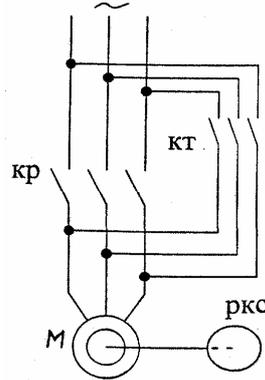
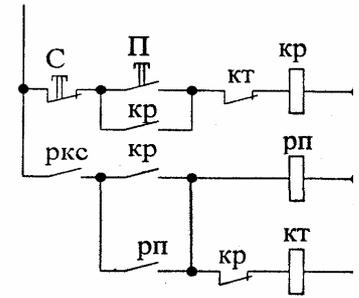


Рис. 26. Схема торможения АД противовключением



Наиболее широкое применение в машиностроении реле контроля скорости получило в схемах торможения *противовключением* асинхронных двигателей. Одна из таких схем представлена на рис. 26. 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 её 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 контакты *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 определённой малой величины контакт *РКС* размыкается, реле *РП* и контактор *КТ* отпадают и электродвигатель отключается от сети. Если вал неподвижного электродвигателя повернуть от руки (например, дёрнув за ремень), то замыкающий контакт *РКС* включится. Однако двигатель при этом вращаться не начнёт, 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 вперёд, используют как тормозной при вращении двигателя в обратную сторону, и наоборот.

*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 путём 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, помещённую 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 даже и при значительных его перегрузках. Для защиты электродвигателя от недопустимого перегрева при длительных перегрузках применяют **тепловые реле** (рис. 27).*

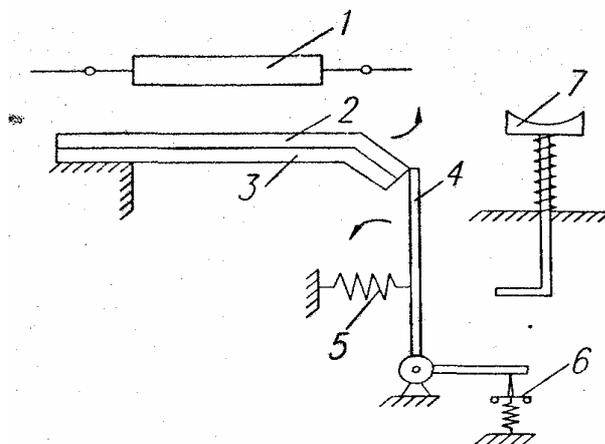


Рис. 27. Схема теплового реле

Ток защищаемого электродвигателя проходит через нагревательный элемент 1. Вблизи него расположена пластинка, состоящая из 2-х наложенных одна на другую и сваренных между собой полос 2 и 3 из металлов с различными коэффициентами теплового расширения. При нагревании пластинка изгибается кверху, воздействует на рычаг 4, который под действием пружины 5 повернётся против часовой стрелки и разомкнёт 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.

При больших токах тепловое реле отключает электродвигатель значительно позже, чем плавкий предохранитель. Поэтому для надёжной защиты электродвигателя в схему вводят тепловые реле и плавкие предохранители.

Схему защиты электродвигателя с тепловыми реле *FK1*, *FK2* см. на рис 21.

Для защиты электродвигателя от перегрузки применяют обычно два тепловых реле. При установке одного реле двигатель оказался бы незащищённым от однофазной работы. При перегорании предохранителя, включённого 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, причём 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 тока**. Эти реле выпускают для постоянного и переменного тока. Схема устройства электромагнитного реле переменного тока ЭТ-520 показана на рис 28. 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 повернётся на столько, что контакты 9 будут замкнуты (или разомкнуты) серебряным мостиком 4.

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 надёжную и быстродействующую защиту, чем плавкие предохранители.

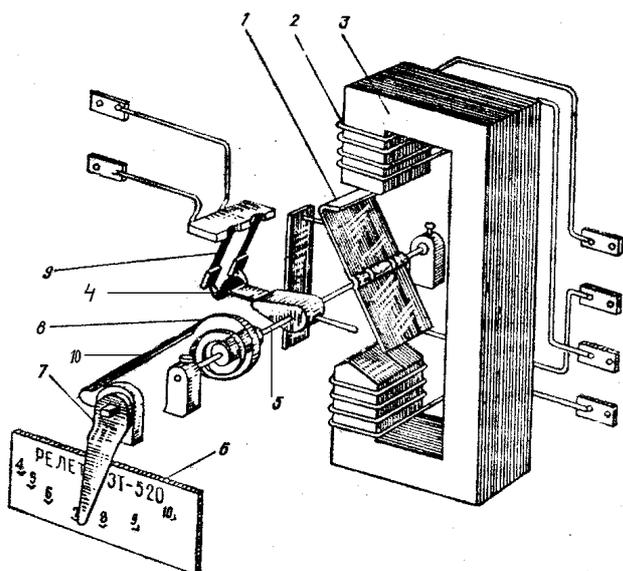


Рис. 28. Конструктивная схема электромагнитного реле тока

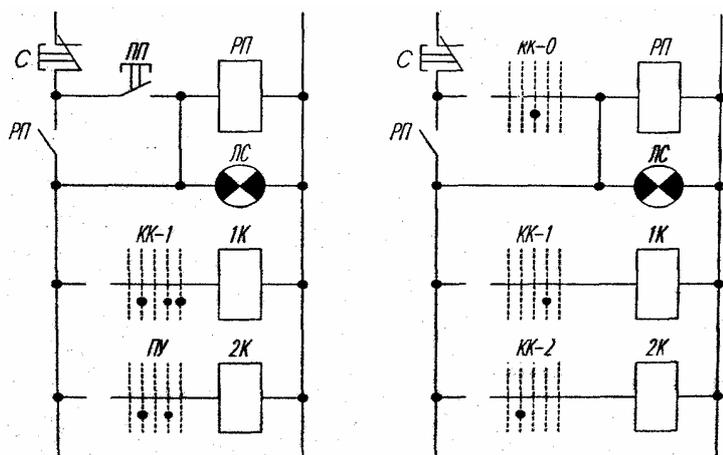


Рис. 29. Нулевая защита в схемах с командоконтроллером

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 снабжён тремя тепловыми расцепителями, сходными по устройству с биметаллическими тепловыми реле.

Автоматический выключатель может быть снабжён 3-мя 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 так же 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. 29). В схеме рис. 29, а перед началом работы станка необходимо нажать на кнопку *ПП* (подготовка пуска). Включится промежуточное реле *РП* и замкнёт 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*, то можно применить схему, изображённую на рис. 29, б. В этой схеме 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* разомкнётся, а другие замыкаются, при этом реле *РП* будет питаться через контакт самоблокировки. Если напряжение питания исчезнет, то реле *РП* отключится. Для нового включения контакторов *КК* и др. при появлении напряжения питания необходимо предварительно вернуть командоконтроллер в нулевое положение.

Бесконтактная аппаратура. Датчики. Бесконтактная аппаратура находит все более широкое применение в электрооборудовании металлургических цехов благодаря таким достоинствам, как высокая допустимая частота включений, долговечность, быстродействие, надёжность 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 металлургических машин в качестве ***датчиков положения*** широко используются путевые и конечные выключатели. Все более широкое применение находят переключатели, срабатывающие без механического воздействия.

На рис. 30 представлена схема путевого датчика 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 Φ постоянного магнита шунтируется, контакты геркона переключаются, переходя в исходное положение.

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

На рис. 31, а представлена схема *сельсинного командоаппарата*. Однофазная статорная обмотка возбуждения сельсина ОВ питается от сети переменного тока частотой 50 Гц. Она создает магнитный поток, который индуцирует в каждой фазе трехфазной обмотки ротора э.д.с. Выходным напряжением сельсина является разность э.д.с. 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 β – угол сдвига фаз вторичной и первичной обмоток; E_{max} – максимальное значение индуцируемой э.д.с., при совпадении оси данной обмотки (1 или 3) с осью обмотки ОВ (рис. 31, б).

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.

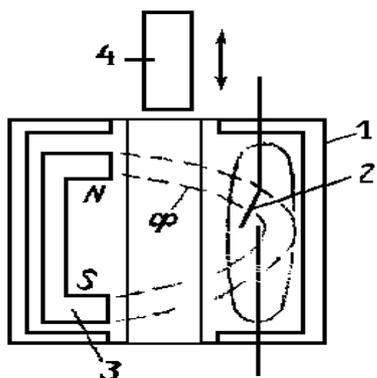


Рис. 30. Схема датчика положения на герконе

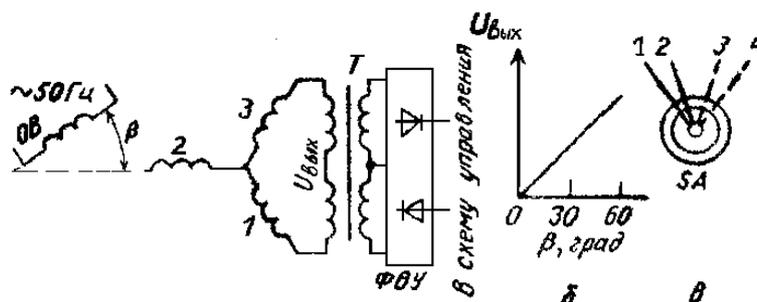


Рис. 31. Сельсинный командоаппарат: а – схема; б – статическая характеристика; в – условное обозначение

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

Датчик скорости используется для контроля угловой скорости двигателей, валков прокатных станов, конвертера и др. 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. 32 приведены условные графические обозначения основных бесконтактных логических элементов и эквивалентные им контактные схемы. Входные сигналы обозначены X1, X2, выходной – Y.

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».

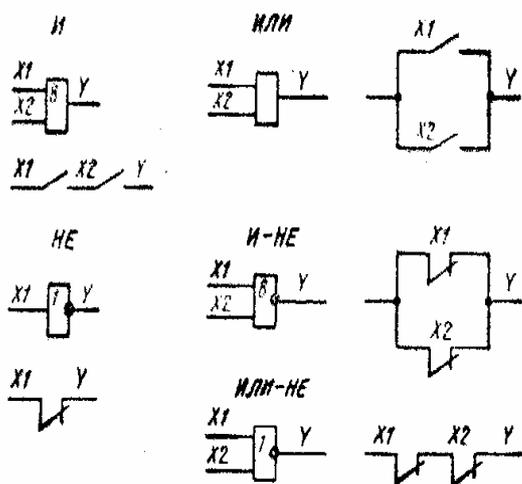


Рис.32. Графическое изображение логических элементов

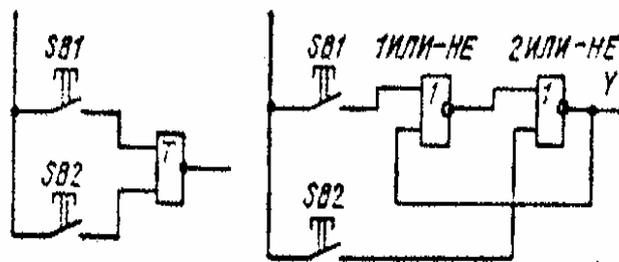


Рис. 33. Схема элемента «Память»

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 и остается там после снятия сигнала с этого входа, а для снятия сигнала с выхода необходимо подать сигнал на второй вход. На рис. 33 элемент ПАМЯТЬ выполнен на триггере Т и на 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.

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.

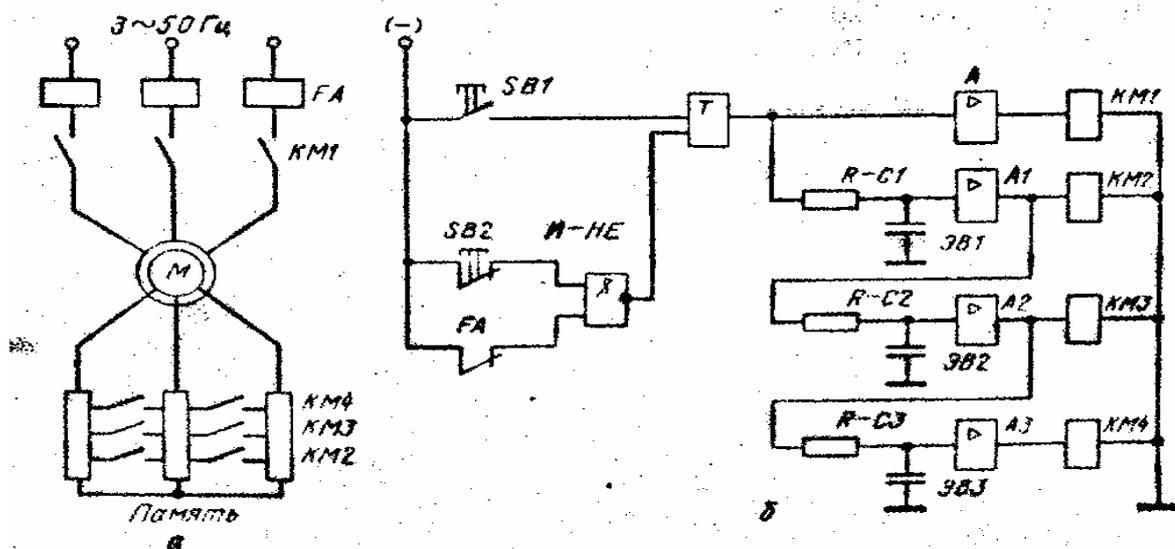


Рис. 34. Схема автоматического пуска двигателя с использованием логических элементов

На рис. 34 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 KM1. 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 KM2, 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.

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.

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 – *методом подчиненного регулирования координат*). Сущность этого метода заключается в том, что *объект регулирования* представляется в виде последовательно соединенных звеньев, выходными параметрами (координатами) которых могут быть: скорость, ток, момент, положение и т.п. Для управления каждой из этих координат служит отдельный регулятор, образующий с объектом управления замкнутый контур с соответствующей обратной связью. Регуляторы соединяются последовательно, так что выход одного из них является входом другого. При этом замкнутые контуры регулирования образуют систему, в которой имеется *внешний контур* 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.

Достоинствами системы подчиненного регулирования являются: удобство эксплуатации, простота наладки, широкие возможности унификации узлов управления, возможность реализации систем управления из наборов стандартных элементов независимо от структуры и параметров электропривода.

На рис. 35 представлена структурная схема электропривода постоянного тока (тиристорного, реверсивного) с системой подчиненного регулирования. Электродвигатель *M* получает питание от реверсивного тиристорного преобразователя *UZ1, UZ2*, который питается от трехфазной сети через автоматический выключатель *QF* и трансформатор *T*. Выключатель *QF* защищает

блоки тиристоров от коротких замыканий. Пульсации выпрямленного тока сглаживаются реактором L .

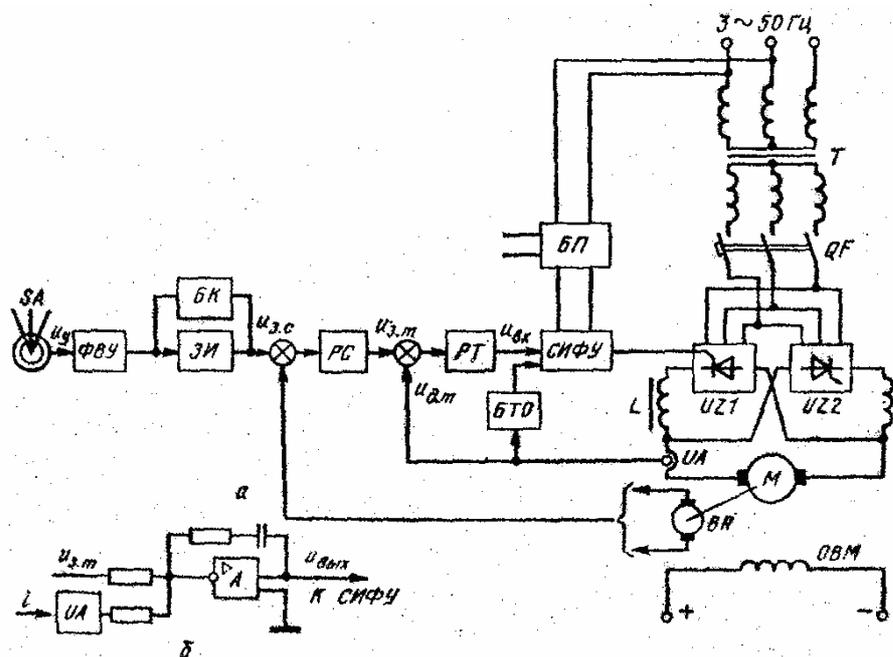


Рис. 35. Структурная схема тиристорного электропривода постоянного тока

СИФУ генерирует управляющие импульсы для тиристоров и изменяет их фазу 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 , определяемой в свою очередь 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. 35, а) предусмотрена возможность шунтирования $ЗИ$ бесконтактным ключом $БК$ оператором (в случае возникновения ненормальных ситуаций).

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

Схема электропривода имеет два самостоятельных регулятора: регулятор скорости PC и регулятор тока PT . PC 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 PT получает на входе сигнал задания $u_{з.м}$ с выхода регулятора скорости и сигнал обратной связи $u_{д.м}$ с выхода датчика тока UA . На выходе он формирует напряжение управления $u_{вх}$ к $СИФУ UZ$, определяющее угол регулирования тиристоров α . 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. 35,б. В составе регулятора имеется усилитель A с ограничением тока. На выходе регулятор тока формирует напряжение управления, поступающее на $СИФУ$. 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.

Тема 1.4. Выбор электродвигателей для производственных механизмов

Основные критерии выбора электродвигателей. Наиболее трудоемким и ответственным этапом проектирования электропривода для производственного механизма является выбор электродвигателя. В общем случае электропривод должен

удовлетворять ряду требований, даже противоречивых (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 следующими основными критериями выбора:

- по мощности;
- по скорости;
- по напряжению;
- по роду тока;
- по условиям эксплуатации;
- по конструктивному исполнению в отношении монтажа.

Мощность электродвигателя должна соответствовать нагрузке на его валу, так как *недостаточная мощность* уменьшает производительность производственного механизма и из-за возможных при этом перегрузок приводит к преждевременному выходу из строя электродвигателя, а *излишняя мощность* увеличивает капитальные затраты и эксплуатационные расходы вследствие недогрузки электродвигателя, из-за снижения при этом его КПД и (у АД) коэффициента мощности. Поэтому определение номинальной мощности электродвигателя выполняют 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 и 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, находят применение 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 ток.

В регулируемых электроприводах применяют системы, которые при выполнении технологических требований оказываются более выгодными экономически. Поэтому чаще всего экономическое сравнение 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 $+40^{\circ}\text{C}$, -45°C и $+10^{\circ}\text{C}$ – для умеренного климата, $+45^{\circ}\text{C}$, -10°C и $+27^{\circ}\text{C}$ – для тропического, $+40^{\circ}\text{C}$, -40°C и $+10^{\circ}\text{C}$ – 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, от 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 колпаком. Он обдувает ребристую поверхность двигателя (такие двигатели называются *обдуваемыми*).

Интенсивность охлаждения электродвигателей с естественной вентиляцией и с 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 может противостоять без повреждений 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.

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 вписываются в конструктивные формы механизмов 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 ним 4 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 ΔP , 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 составляет примерно 15–20 лет. Перегрузка электродвигателя с хлопчатобумажной и шелковой изоляцией на 25% сокращает его срок службы с 20 лет до нескольких месяцев, а перегрузка на 50% приводит двигатель в негодность в течение нескольких часов.

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 $+40^{\circ}\text{C}$ допустимая длительная нагрузка должна быть меньше номинальной.

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

При постоянной нагрузке нагрев электродвигателя описывается уравнением:

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

где $\tau_y = Q / A$ – установившийся перегрев, $^{\circ}\text{C}$;

τ_0 – начальный перегрев (в момент времени $t = 0$);

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°C (теплоотдача), Дж / (с · $^\circ\text{C}$);

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

C – теплоемкость электродвигателя, т.е. количество тепла, необходимое для повышения температуры двигателя на 1°C , Дж / $^\circ\text{C}$.

Зависимость $\tau = f(t)$ представлена на рис. 36 кривой 1. Величина τ_y является асимптотой этой кривой. Практически процесс нагревания считается законченным, когда $t = (3 - 4)T_H$. Например, при $t = 4T_H$ $\tau = 0,982 \tau_y$, т.е. разница между τ и τ_y меньше двух процентов.

При отключении от сети нагретого электродвигателя он начнет охлаждаться. Уравнение его охлаждения имеет вид (рис. 36):

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

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 двух величин: τ_y и T . Величина τ_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 τ_y .

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

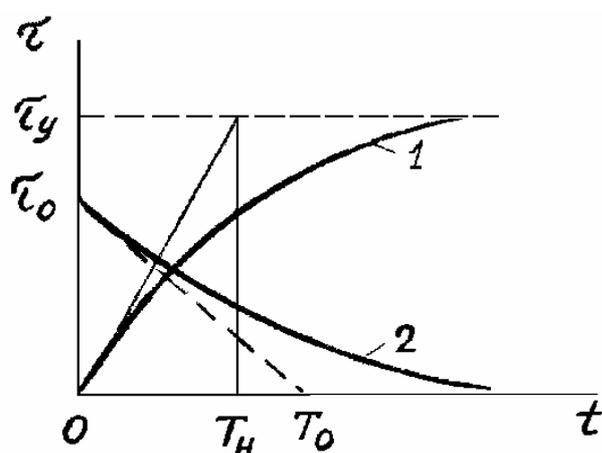


Рис. 36. Кривые нагрева (1) и охлаждения (2) двигателя

Основные режимы работы электродвигателей по нагреву. Нагрузка электродвигателя в процессе его работы может изменяться различным образом по величине, при этом он может периодически или эпизодически отключаться от сети на некоторое время. Поэтому нагрев электродвигателя при его работе не является постоянным. Стандарт устанавливает 8 номинальных режимов работы электропривода (S1 – S8). Из них основными являются режимы S1 – S3, а остальные (S4 – S8) – это модификации режимов S2 и S3. Рассмотрим основные режимы:

S1 – продолжительный (или **длительный**) – перегрев электродвигателя достигает установившегося значения τ_y (рис. 37, а). Различают продолжительный режим с постоянной нагрузкой и с переменной.

S2 – кратковременный – периоды постоянной нагрузки чередуются с отключениями, при этом τ не достигает τ_y , а во время отключения электродвигатель охлаждается до температуры окружающей среды (рис. 37, б).

S3 – повторно-кратковременный – периоды с постоянной нагрузкой чередуются периодически с отключениями электродвигателя (время цикла не более 10 минут), при этом перегрев τ не достигает τ_y (рис. 37, в).

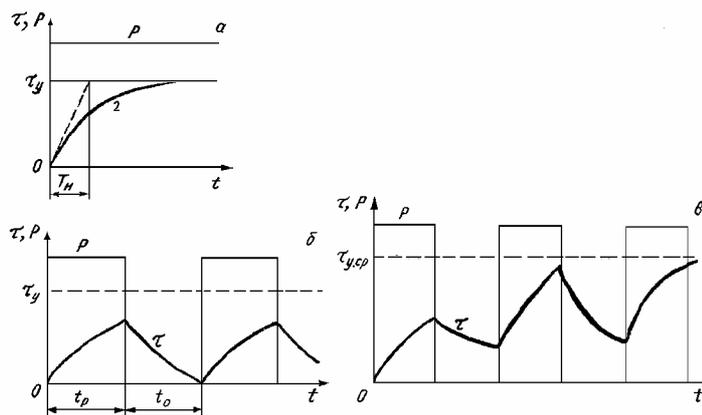


Рис. 37. Графики номинальных режимов электроприводов

Повторно-кратковременный режим характеризуется относительной продолжительностью включения

$$ПВ = t_p / (t_p + t_o) 100\%.$$

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

Нагрузочные диаграммы механизма и электропривода. Принято различать нагрузочные диаграммы механизма и электропривода. Под нагрузочной диаграммой механизма понимают зависимость 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 в первую очередь относятся: включение двигателя в сеть и его отключение, изменение параметров подводимого напряжения, главных цепей и цепей возбуждения и т.п. В этих 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. можно 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.

Методы расчета мощности электродвигателя при переменной нагрузке. В электроприводах, у которых мощность на валу электродвигателя изменяется по определенному нагрузочному графику (рис. 38), электродвигатель сначала выбирают по наибольшей мощности этого графика с учетом его перегрузки, а затем выбранный электродвигатель проверяют по нагреву. Для проверки выбранного электродвигателя по нагреву при переменной нагрузке существуют следующие четыре метода:

- метод эквивалентного тока $I_{\text{ЭКВ}}$;
- метод эквивалентного момента $M_{\text{ЭКВ}}$;
- метод эквивалентной мощности $P_{\text{ЭКВ}}$;
- метод средних (эквивалентных) потерь.

Рассмотрим суть этих методов.

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

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

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

ΔP_3 – потери мощности в электродвигателе при работе с мощностью P_3 ;

ΔP_i – потери мощности в электродвигателе при работе с мощностью P_i .

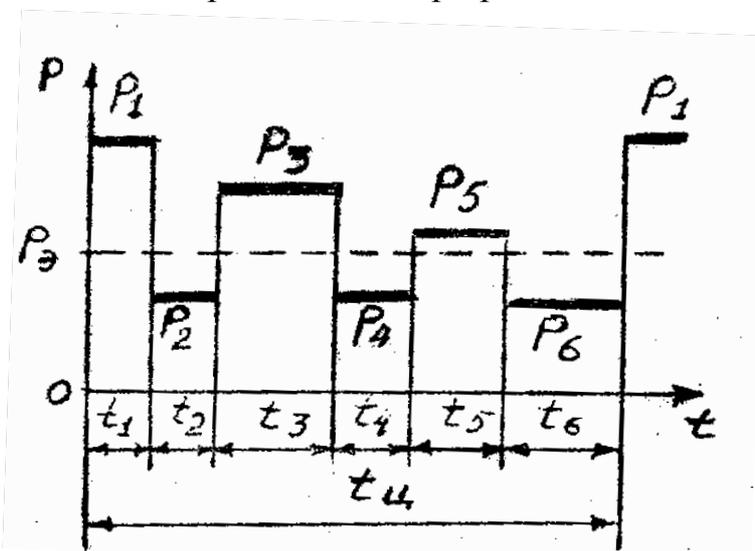


Рис. 38. Нагрузочный график при переменной нагрузке

Отсюда получаем формулу средних потерь:

$$\Delta P_3 = \sum(\Delta P_i t_i) / t_{\text{ц}}. \quad (1.8)$$

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 η_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 η_i .

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

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

2. Вычисляют ΔP_3 по формуле (1.8) и проверяют выполнение условия: $\Delta P_3 \leq \Delta P_n$.

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

Метод эквивалентного тока. Если в формуле (1.8) потери мощности разделить на *постоянные* и *переменные*, пропорциональные квадрату тока нагрузки I^2 , то получим:

$$\Delta P_{\text{пост}} + b I_3^2 = \sum((\Delta P_{\text{пост}} + b I_i^2) t_i) / t_{\text{ц}} \quad (1.9)$$

где b – величина, постоянная для конкретного двигателя.

Так как $\Delta P_{\text{пост}} t_{\text{ц}} = \Delta P_{\text{пост}} \sum t_i$, то после преобразований и решения (1.9) относительно I_3 получим:

$$I_3 = \sqrt{\sum(I_i^2 \cdot t_i) / t_{\text{ц}}} \quad (1.10)$$

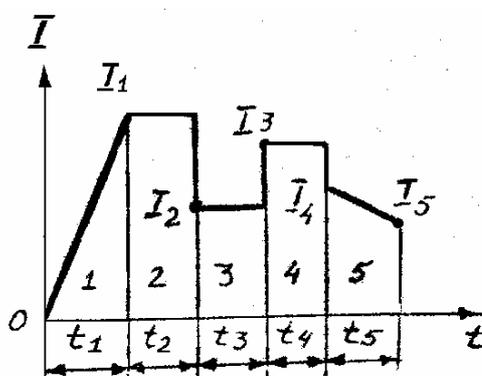


Рис. 39. Нагрузочный график $I = f(t)$

Эта формула соответствует нагрузочному графику (рис. 38) с прямоугольными участками. Если нагрузочный график $I = f(t)$ содержит треугольные и трапециевидальные участки (рис. 39), то в формулу (1.9) вместо I_1 и I_5 следует подставлять $I_{13} = I_1 / \sqrt{3}$; $I_{53} = \sqrt{(I_4^2 + I_4 \cdot I_5 + I_5^2) / 3}$.

Метод эквивалентного тока основан на использовании формулы (1.10) при проверке электродвигателя по нагреву и состоит в следующем:

1. Рассчитывают I_3 по (1.10), 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

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

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, используя формулу эквивалентной мощности:

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

Эта формула более удобна, чем формула средних потерь, в которой необходимы дополнительные вычисления КПД η_i .

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

Расчет номинальной мощности электродвигателя при длительном режиме его работы

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

Примеры таких формул:

1. Для электропривода центробежного насоса

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

где Q – производительность, $\text{м}^3/\text{с}$;

H – высота напора, м;

γ – плотность жидкости, $\text{Н}/\text{м}^3$;

$\eta_{нас}$ – КПД насоса;

$\eta_{пер}$ – КПД передачи.

2. Для электропривода поршневого компрессора насосно-аккумуляторной станции

$$P = Q A / (1000 \eta_k \eta_{пер}) \quad (\text{кВт}),$$

где A – работа сжатия воздуха до требуемого давления, $\text{Дж}/\text{м}^3$;

η_k – КПД компрессора.

3. Для электропривода насоса гидравлического прессы

$$P = k F_{\text{п}} V_{\text{п}} / (1000 \eta) \quad (\text{кВт}),$$

где $F_{\text{п}}$ – усилие прессования, Н;

$V_{\text{п}}$ – скорость прессования, м/с;

η – общий КПД установки (обычно он равен 0,6 – 0,85);

k – коэффициент запаса (так как производительность насоса и давление в процессе работы несколько изменяются), $k = 1,1 - 1,2$.

По каталогу выбирается электродвигатель с номинальной мощностью $P_{\text{н}} \geq P$. При этом тип двигателя выбирается с учетом окружающей среды, сопряжения с механизмом, рода тока, напряжения, скорости вращения и др. технических требований (по пусковому моменту, например).

Пример на расчет мощности электродвигателя. Определите мощность $P_{\text{н}}$ для центробежного насоса с $Q = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$, $n_{\text{н}} = 1450 \text{ об/мин}$, $H_{\text{воды}} = 22 \text{ м}$, $\eta_{\text{нас}} = 0,5$, $\eta_{\text{пер}} = 1$.

Решение.

$$P = Q H \gamma 10^{-3} / (\eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{пер}}) = 0,01 \cdot 22 \cdot 9800 / (0,5 \cdot 1) = 4,3 \text{ (кВт)},$$

где $\gamma_{\text{воды}} = 9800 \text{ Н/м}^3$.

Выбираем из каталога АД с короткозамкнутым ротором закрытого исполнения типа А02 – 42 – 4 с.

$$P_{\text{н}} = 5,5 \text{ кВт и } n_{\text{н}} = 1450 \text{ об/мин.}$$

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 этих двух мощностей выбирают большую.

Мощность по перегрузке определяется как

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

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

λ – коэффициент допустимой перегрузки:

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

для АД $\lambda = 0,9^2 \lambda_k$ ($\lambda_k = M_k / M_{\text{н}}$ – 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, то выбирают из каталога следующий по шкале мощностей электродвигатель.

Примечание. Для АД нужна еще проверка и по пусковому моменту: $0,9^2 M_n \geq M_1$, где M_1 – момент на первом участке нагрузочного графика.

Расчет номинальной мощности электродвигателя при повторно-кратковременном режиме работы. При повторно-кратковременном режиме участки работы электродвигателя чередуются с паузами такой продолжительности, что перегрев двигателя не достигает τ_y ни на участках работы, ни во время пауз. От электродвигателя требуется, чтобы он развивал необходимую наибольшую мощность при обработке детали и не перегревался свыше нормы при выполнении любого числа рабочих циклов. Поэтому мощность электродвигателя при повторно-кратковременном режиме 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 назначения ПВ на другое осуществляется на основе приближенного равенства:

$$P_{15}^2 \cdot ПВ_{15} \approx P_{25}^2 \cdot ПВ_{25} \approx P_{40}^2 \cdot ПВ_{40} \approx P_{60}^2 \cdot ПВ_{60} \quad .$$

Пример. Имеется крановый электродвигатель мощностью 20 кВт при ПВ = 25%. Требуется определить, какую мощность может развивать этот электродвигатель при ПВ = 40%.

Решение

$$P_{40} \approx P_{25} \cdot \sqrt{PB_{25} / PB_{40}} = 20 \cdot \sqrt{25/40} = 20 \cdot 0,79 = 15,8 \text{ (кВт)}.$$

Расчет номинальной мощности электродвигателя при кратковременном режиме работы. Вспомогательные электроприводы металлургических установок обычно работают в кратковременном режиме нагрузки. Продолжительность работы вспомогательных приводов обычно не превышает 5 - 20 с (1 - 1,5 минут у крупных машин). За это время при перегрузке в допустимых пределах электродвигатель не успевает нагреться даже до нормального перегрева. Поэтому 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;

μ – коэффициент трения движения.

Мощность на валу электродвигателя

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

где λ – 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:

$$M_{\text{с0}} = P \cdot 10^3 \cdot \mu_0 / (\omega_0 \cdot \mu \cdot (1 - \lambda \cdot S_{\text{н}})) \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где μ_0 – коэффициент покоя.

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

Тема 1.5. Электробезопасность

1.5.1. Воздействия электрического тока на человека

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 удастся 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 устанавливают 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).

1.5.2. 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. 40) при пробое изоляции на корпус электродвигателя Д он окажется под напряжением, величина которого равна падению напряжения на сопротивлении заземления r_3 от протекающего через него тока I_3 . Этот ток определяется напряжением U_2 и полным сопротивлением изоляции проводов $Z_{\text{н}}$. 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.

В системе с глухозаземленной нейтралью (рис. 41) 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.

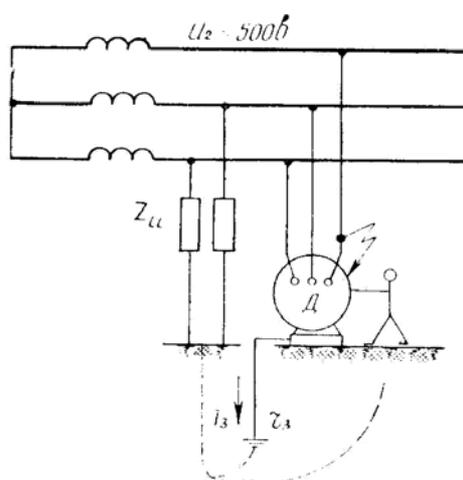


Рис. 40. Заземление корпуса электроприемника в сети с изолированной нейтралью

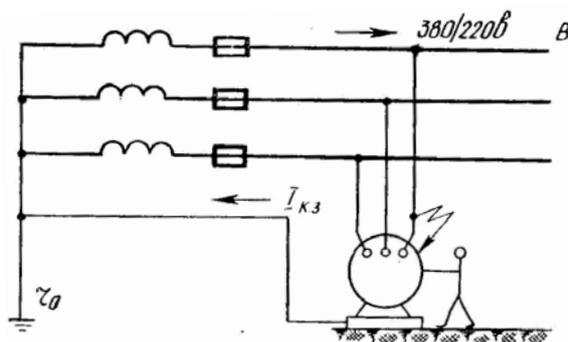


Рис. 41. Зануление корпуса электроприемника в сети с глухозаземленной нейтралью

Простое заземление корпуса электроприемника без соединения с нейтралью правилами запрещается, так как такое защитное заземление не обеспечивает надежной защиты (при пробое изоляции ток $I_{к.з.}$ ограничивается сопротивлениями двух заземлителей – электроприемника r_3 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 защитные 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 (десятки 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. Токи 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 электротехническим 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. 42. 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 42, 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. 42, а будут давать различные показания.

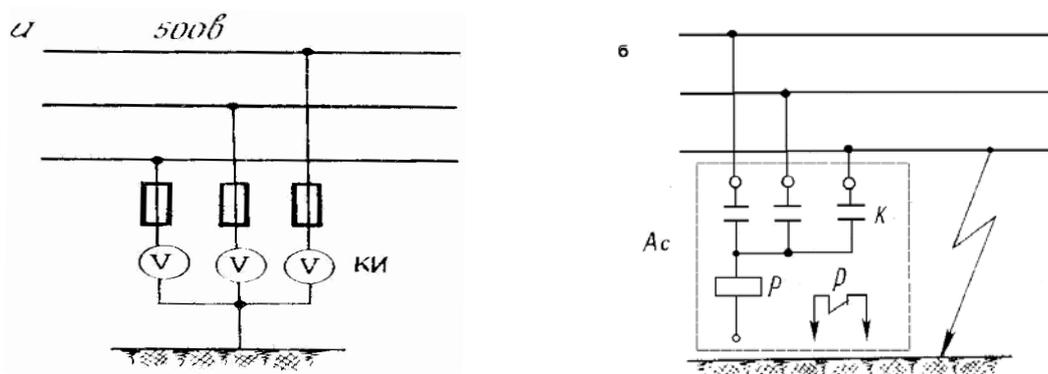


Рис. 42. Схемы включения приборов контроля изоляции:
 а – схема включения ламп или вольтметров;
 б – схема включения асимметра

Асимметры типа РА-74/2 (см. рис. 42, 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. 43 приведена схема аппарата защитного отключения и контроля изоляции для сетей с изолированной нейтралью напряжением до 380 В типа НRP – Н51. Принцип действия схемы аналогичен работе асимметра (см. рис. 42, б).

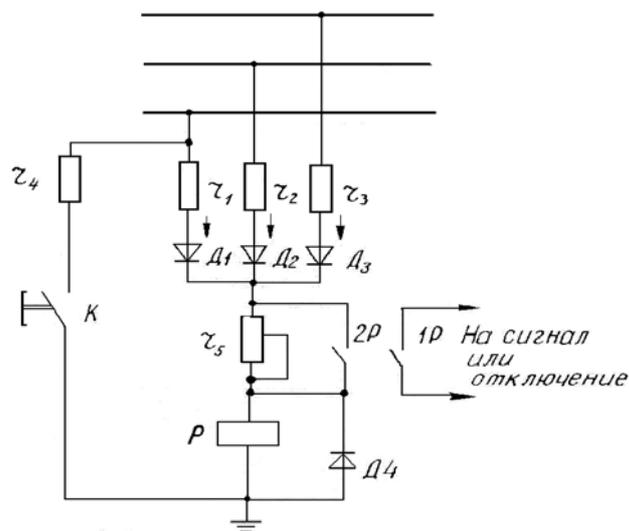


Рис. 43. Схема аппарата защитного отключения и контроля изоляции для сетей с изолированной нейтралью

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 изготавливают 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.

Электрозащитные средства

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-монтажный инструмент 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, оградительные 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.

Раздел 2. Электрооборудование машин и установок металлургических цехов

Тема 2.1. Электрооборудование металлургических кранов

Общие сведения о металлургических кранах. В цехах металлургических предприятий широко применяются электрические мостовые краны. Они используются для транспортировки погрузки руды, кокса, агломерата, шихты; для заливки жидким чугуном миксеров и конвертеров; для загрузки электрических печей; для заливки жидкой стали в МНЛЗ (машины непрерывного литья заготовок); для подачи слитков в нагревательные колодцы прокатных цехов и подачи нагретых слитков на прокатку и т.п.

В зависимости от типа захватывающего устройства различают крюковые, грейферные, клещевые, магнитно-грейферные и др. металлургические краны.

Каждый кран имеет механизм подъема, механизм передвижения грузовой тележки. Механизм главного подъема литейного мостового крана и механизм передвижения моста имеют двухдвигательный электропривод: уменьшенный суммарный момент инерции системы, большая надежность, возможность создания систем большой мощности при использовании серийных машин, большой диапазон регулирования скорости и момента. Стандартная грузоподъемность кранов 0,2-1000 тонн; в металлургических цехах наиболее часто используются краны грузоподъемностью от 80 до 630 тонн.

Для металлургических кранов характерны весьма тяжелые условия работы: повышенная температура, высокая концентрация пыли, наличие в атмосфере слабых кислот и щелочей, механические вибрации и удары, частые пуски под нагрузкой и др. Поэтому крановое электрооборудование должно удовлетворять следующим требованиям эксплуатации: изменение нагрузки в широких пределах, большой диапазон регулирования скорости, большая частота включений, частое чередование периодов нагрузки и пауз, частые торможения, значительные перегрузки и внешние механические воздействия.

Производительность современных металлургических цехов (особенно конвертерных, мартеновских и прокатных) в значительной степени зависит от производительности и надежности работы кранов. Аварийная остановка механизма крана может привести к застыванию металла в ковше. Поэтому приводы механизмов металлургических литейных кранов относятся к потребителям 1-ой категории, а мощность каждого из двух двигателей механизма главного подъема выбирается из условия, чтобы один двигатель мог поднять ковш с металлом.

Электроснабжение кранов. Электрооборудование кранов получает питание от трехфазной цепи переменного тока напряжения 380 В. Подвод тока к мостовым кранам осуществляется троллеями в основном из стального уголка, проложенными вдоль цеха и закрепленными с помощью изоляторов и держателей. Расстояние от троллеев до земли должно быть не менее 3,5 м, а в проезжей части – не менее 6 м. Троллеи окрашиваются в красный цвет, за исключением контактных поверхностей. В местах подвода питания участки троллеев длиной 100 мм окрашиваются в следующие цвета при переменном токе: фаза А – в желтый, фаза В – в зеленый, фаза С – в красный; при постоянном токе: положительная шина – в красный, отрицательная – в синий, нейтральная – в белый цвет. Троллеи снабжаются световой сигнализацией о наличии на них напряжения. Для съема тока с троллеев служат токосъемники, которые устанавливаются на мосту крана.

Типы электроприводов металлургических кранов. На металлургических кранах применяются следующие системы электроприводов:

- непосредственное управление с помощью силовых кулачковых контроллеров асинхронными электродвигателями с фазным ротором;
- управление с использованием магнитных контроллеров приводами как постоянного, так и переменного тока;
- генератор-двигатель (система Г-Д);
- с тиристорным преобразователем и двигателем постоянного тока (система ТП-Д);
- с тиристорным преобразователем частоты (система ТПЧ-Д);
- тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель (ТРН-Д).

На металлургических кранах используется главным образом система электропривода с магнитным контроллером и асинхронным двигателем с фазным ротором. Управление электродвигателем осуществляется с помощью релейно-контакторной аппаратуры, а регулирование скорости – изменением сопротивления резистора в цепи ротора. Такие системы электропривода выпускаются комплектно, с цепями управления на постоянном и переменном токе, с силовыми кулачковыми и магнитными контроллерами.

На кранах используются электродвигатели специальной краново-металлургической серии, рассчитанные на напряжение 220 В (обмотка статора соединяется в треугольник) и на 380 В (обмотка соединяется в звезду), с изоляцией класса F (МТФ) или класса H (МТН).

Управление крановыми электроприводами производится оператором, который выбирает режим работы (пуск, торможение, изменение скорости и т.п.) и осуществляет визуальный контроль за выполняемыми операциями.

Металлургические краны оборудуются унифицированными панелями управления защиты, а также другими типовыми элементами электрооборудования. Это существенно упрощает эксплуатацию кранового электрооборудования и его ремонт.

Защита крановых электроприводов. Мостовые металлургические краны имеют повышенную опасность для людей и дорогостоящего оборудования в цехах. Крановые электропривода имеют максимально-токовую защиту и нулевую защиту для отключения электропривода при перерыве подачи питания и снижении напряжения на 15-20%. Разновидностью нулевой защиты является нулевая блокировка, которая исключает самозапуск электродвигателя при восстановлении питания, если орган управления находится в рабочем положении. Имеется также конечная защита для предотвращения передвижения движущихся элементов крана в опасную зону. Подача питания на кран может осуществляться после отпирания включающего устройства с помощью индивидуального ключа-марки, при этом ключ может быть вынут только после выполнения операции отключения электропривода. Такая блокировка гарантирует приведение крана в действие только лицом, имеющим право на управление краном.

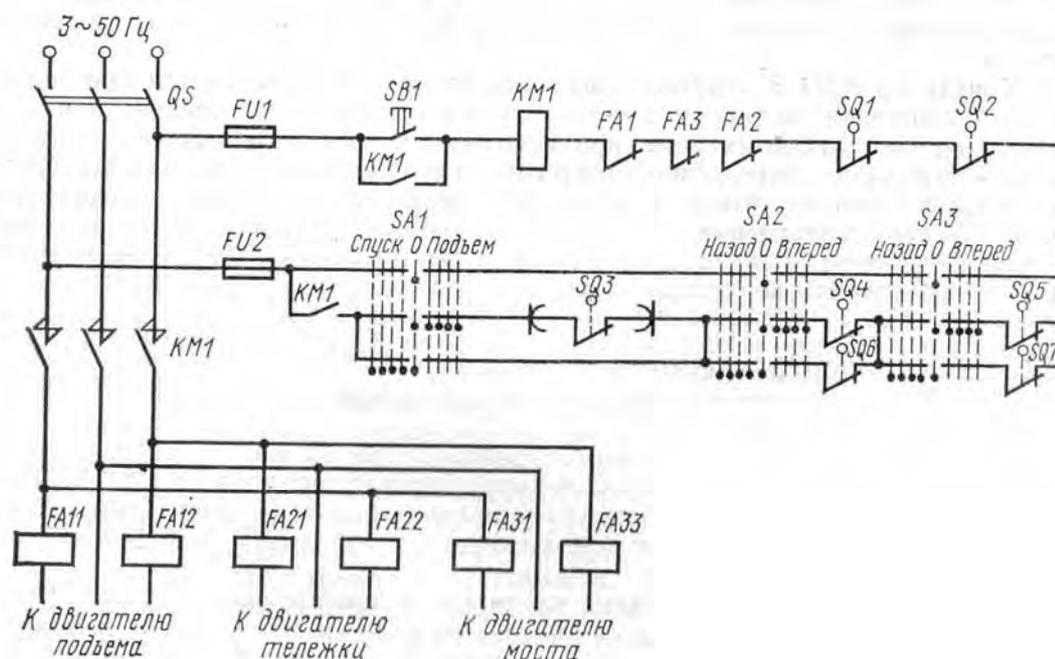


Рис. 44. Схема защитной панели крана

На рис.44 представлена схема защитной панели крана с кулачковым командоконтроллером. Панель располагается в металлическом шкафу, в котором на изоляционной асбоцементной плите смонтированы трехполосный рубильник *QS* с наружной рукояткой и линейный контактор *KM1*. Панель также снабжена максимально-токовыми реле *FA1-FA3*, действующими на линейный контактор,

предохранителями цепей управления $FU1$ и $FU2$, пусковой кнопкой $SB1$ и ключом-маркой.

Электродвигатели механизмов подъема, тележки и моста получают питание от трехфазной сети через рубильник QS и контактор $KM1$. При включении контактора $KM1$ напряжение подается к командоконтроллерам электродвигателей, но включение их производится только соответствующим командоконтроллером.

В схему защитной панели на рис. 44 вошли и некоторые элементы электрооборудования, конструктивно не входящие в ее состав: нулевые контакты силовых контроллеров; контакты $SQ3-SQ7$ конечных выключателей механизмов подъема, тележки и моста; аварийный выключатель $SQ1$; контакт блокировки люка $SQ2$.

Если аварийный выключатель $SQ1$ замкнут, люк, ведущий из кабины оператора на мост, закрыт, а контроллеры находятся в нулевом положении, то после нажатия на кнопку $SB1$ включится линейный контактор $KM1$. Тогда через главные контакты $KM1$ и катушки реле максимального тока две фазы сети подводятся к контроллерам, а третья фаза – ко всем трем двигателям.

Как видно из схемы, нулевые контакты контроллеров заблокированы цепочкой контактов конечных выключателей. Вследствие этого в процессе управления двигателями, когда размыкаются нулевые контакты контроллеров, контактор $KM1$ остается включенным.

Контактор $KM1$ и все двигатели отключаются : при значительном снижении напряжения сети или его полном исчезновении; при срабатывании максимальных реле тока; при размыкании контактов конечных выключателей в крайних положениях механизмов; при отключении аварийного выключателя или открывании люка; при перегорании предохранителей в цепи управления. Повторное включение линейного контактора может быть осуществлено лишь при установке контроллеров в нулевое положение, чем обеспечивается нулевая защита.

Схемы управления с использованием контроллеров. Для крановых механизмов могут использоваться электроприводы с силовыми кулачковыми контроллерами типа ККТ: для механизмов подъема с электродвигателями 11-180 кВт и 35-110 кВт для механизмов передвижения. Контроллер имеет пять фиксированных рабочих положений для каждого направления движения и нулевое положение, обеспечивает ступенчатый пуск, ступенчатое регулирование скорости, реверс и торможение. Для остановки двигателя после его отключения предусмотрен тормоз с приводом от электромагнита, подключенного наглухо к статору двигателя. Для управления крановыми асинхронными двигателями с фазным ротором применяются и магнитные контроллеры серии ТА, ТСА, К, КС, а для управления двумя двигателями

одновременно – серии ДК, ДКС, ДТА (дуплексные двухдвигательные приводы). Все схемы контроллеров обеспечивают автоматический пуск в функции времени, реверсирование, торможение и ступенчатое регулирование скорости (реостатное).

Типовая схема электропривода механизма передвижения крана с магнитным контроллером типа К приведена на рис. 45. Напряжение к обмотке статора подводится через рубильник *QS1*, линейный контактор *KM1* и контакторы *KM2* или *KM3*, задающие направление движения. Последовательно в эту цепь включены катушки реле максимального тока *FA*, а параллельно обмотке статора – трехфазный электромагнит механического тормоза *YM* через контакторы *KM7*, *KM8*. В роторную цепь двигателя включены 5 ступеней пускорегулировочного реостата, четыре из которых могут быть замкнуты контактами контакторов *KM9* – *KM12*, а пятая ступень представляет собой не выключаемую добавочную ступень.

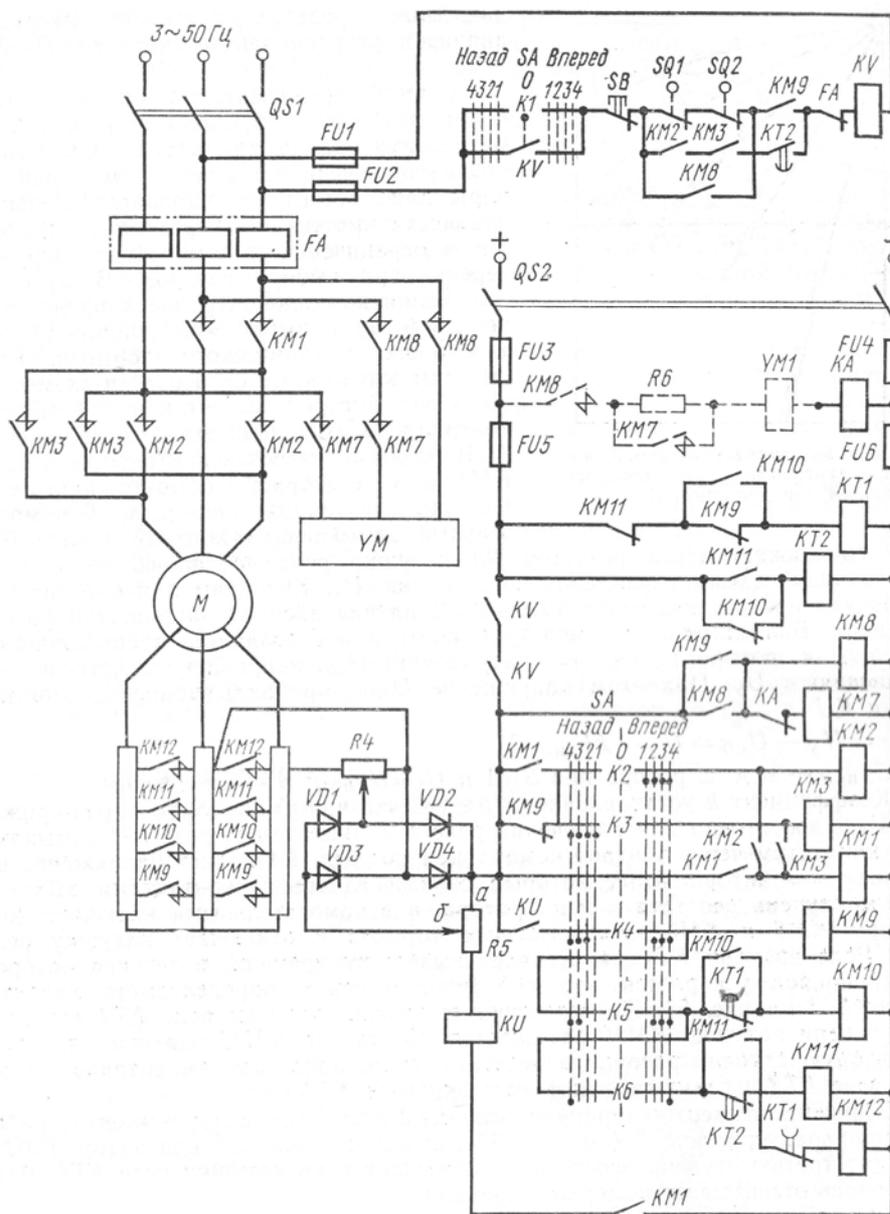


Рис. 45. Схема магнитного контроллера типа К

Цепи защиты и блокировок выполнены на переменном токе с помощью реле *KV*: нулевая блокировка (нулевой контакт командоконтроллера *SA*, шунтированный контактом *KV*), конечная защита (контакты конечных выключателей *SQ1* и *SQ2*, шунтированные контактами контакторов соответственно *KM2*, *KM3* и *KM8*), максимальная защита (контакт *FA*). Схема управления выполнена на постоянном токе, так как использование контакторов постоянного тока обеспечивает более высокую надежность и долговечность работы электрооборудования. Питание цепей управления осуществляется от источника постоянного тока через предохранители *FU3 – FU6*, для контроля исправности которых в цепь реле *KV* введены замыкающие контакты *KM8* и *KT2*.

Ступенчатое реостатное регулирование скорости и момента электропривода осуществляется с помощью контактов *K2 – K6* командоконтроллера *SA*, причем контакты *K2* и *K3* служат для задания направления движения, а остальные имеют симметричную диаграмму замыкания и используются для включения и отключения ступеней пускорегулировочного реостата с помощью контакторов *KM9 – KM12*.

Механические характеристики, соответствующие положениям командоконтроллера при движении вперед, показаны на рис. 46. Такое же семейство характеристик обеспечивается и при работе в противоположном направлении. Схемой предусматривается автоматическое управление процессами реостатного пуска и торможения противовключением. При этом приняты меры для обеспечения удовлетворительной плавности протекания переходных процессов и ограничения динамических нагрузок передач при выборе зазоров. В нулевом положении командоконтроллера предусмотрен свободный выбег электропривода без наложения механического тормоза. Рассмотрим эти важные особенности схемы.

При быстрой перестановке командокотроллера из положения 0 в положение 4 “Вперед” включаются контакторы *KM2*, *KM1* и к статорной обмотке двигателя подается напряжение сети. Вспомогательный замыкающий контакт *KM1* подключает через резистор *R5* катушку реле противовключения *KU* к питающему схему управления напряжению U_y . К точкам “а” и “б” резистора *R5* подключен диодный мост *VD1 – VD4*, питающийся от напряжения роторной цепи. Благодаря этому между точками “а” и “б” создается пропорциональное ЭДС ротора падение напряжения $U_{аб}$, направленное встречно по отношению к U_y . При этом напряжение на катушке реле *KU* равно

$$U_{ku} = U_y - U_{аб} = U_y - kE_{2н},$$

где $E_{2н}$ – ЭДС ротора при скольжении $S = 1$.

Коэффициент “*k*” устанавливается таким, что при пуске ($S = 1$) напряжение U_{ku} достаточно для включения реле *KU*. Включаясь, реле *KU* замыкающим контактом

через контакт командоконтроллера $K4$ подает напряжение на катушку контактора $KM9$, который своими главными контактами выводит первую ступень реостата в цепи ротора, а вспомогательными включает контакторы $KM8$ и $KM7$ электромагнита тормоза и отключает катушку реле $KT1$. Реле времени $KT1$ отсчитывает выдержку времени, в течение которой электропривод ускоряется под действием момента, определяемого характеристикой 2 на рис. 46. По истечении выдержки времени реле $KT1$ замыкается его контакт в цепи катушки $KM10$. контактор $KM10$ включается, выводит вторую ступень реостата, становится на самопитание, включает реле времени $KT1$ и размыкает цепь катушки реле $KT2$.

В течение выдержки времени реле $KT2$ электропривод ускоряется, работая на характеристике 3 рис. 46, затем включается контактор $KM11$, выводит третью ступень реостата и размыкает цепь катушки реле $KT1$. Это реле вновь отсчитывает выдержку времени, в течение которой происходит пуск по промежуточной пусковой характеристике 4А. Далее включением контактора $KM12$ электропривод выводится на основную характеристику 4. При этом в роторной цепи остается невыключаемая ступень реостата, обеспечивающая требуемые условия ограничения тока и момента при заданном числе контакторов ускорения.

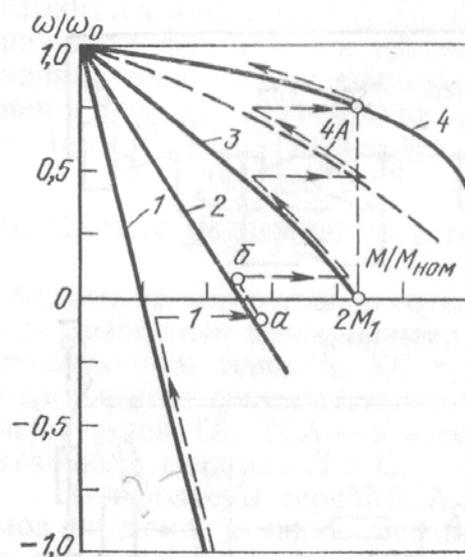


Рис. 46. Механические характеристики двигателя, управляемого магнитным контроллером K

Пусковая диаграмма на рис. 46 показывает, что характеристика 2 обеспечивает пониженный пусковой момент, требуемый для плавного выбора зазоров, который осуществляется в течение выдержки времени реле $KT1$. Затем происходит автоматический пуск электропривода с максимальным пусковым моментом $M1$ в две ступени под контролем реле $KT2$ и $KT1$. Таким образом, реле $KT1$ при пуске используется дважды. Его выдержка времени выбирается равной времени разгона по

характеристике 4А, она меньше, чем выдержка времени реле *КТ2* и ее достаточно для выбора зазоров, так как после выбора зазоров большого увеличения скорости на этой ступени не требуется (отрезок “аб” на характеристике 2 рис. 46).

Включившийся в начале пуска электромагнит тормоза *УМ* при дальнейшей работе остается включенным, так как контактор *КМ8* становится на самопитание. Поэтому при установке командоконтроллера в нулевое положение механический тормоз не накладывается, а снижение скорости происходит в режиме выбега под действием тормозного момента нагрузки. Этим самым устраняются рывки, обусловленные наложением тормоза, и повышается плавность торможения. Тормоз накладывается только при срабатывании защит или нажатии аварийной кнопки *SQ1*.

Для увеличения интенсивности торможения оператор может использовать электрическое торможение противовключением путем перестановки командоконтроллера, например, из крайнего положения “Вперед” в крайнее положение “Назад”. Контактors *КМ2* и *КМ4* отключаются, а контактор *КМ3* включается и переводит двигатель в режим противовключения с полностью включенным реостатом в цепи ротора (характеристика 1 рис. 46).

Заметим, что рассмотренный магнитный контроллер при необходимости комплектуется тормозным электромагнитом постоянного тока. В этих случаях из схемы исключается трехфазный электромагнит *УМ* и последовательно с реле *КА* включается катушка *УМ1* электромагнита постоянного тока (показано на рисунке штриховой линией). Форсировка нарастания тока в электромагните при его включении обеспечивается шунтированием резистора *R6* замыкающим контактом *КМ7*. При токе, равном номинальному, срабатывает реле *КА* и разрывает цепь катушки *КМ7*, контакт которого размыкаясь, вводит последовательно с обмоткой *УМ1* резистор *R6*.

Крановые электроприводы с тиристорными преобразователями. С целью расширения диапазона регулирования (более 4:1), увеличения скорости и мощности электропривода, улучшения динамических характеристик его в крановом оборудовании используются: тиристорный электропривод постоянного тока (система **ТП-Д**) и две системы тиристорного привода переменного тока (**ТПЧ-Д** и **ТРН-Д**).

Тиристорный привод постоянного тока для кранов имеет 3 исполнения:

1. С реверсивным выпрямителем в цепи якоря. Она используется для мощностей 100 – 300 кВт.

2. С нереверсивным выпрямителем, где для реверсирования двигателя используются контакторы главной цепи. Система имеет минимальные массогабаритные показатели и используется для мощностей до 100 кВт.

3. Система с нереверсивным выпрямителем в цепи и реверсом в цепи обмотки возбуждения используется для электроприводов выше 300 кВт (например, привод для разливочных кранов с двигателем до 1000 кВт).

Для механизма подъема используются тиристорные электропривода постоянного тока мощностью до 630 кВт. При использовании обратной связи по скорости и многоконтурных структур управления электроприводом можно получить диапазон регулирования скорости до 25:1, а с учетом ослабления поля – до 50:1, т.е. получить скорость подъема-спуска груза до 200 м/с.

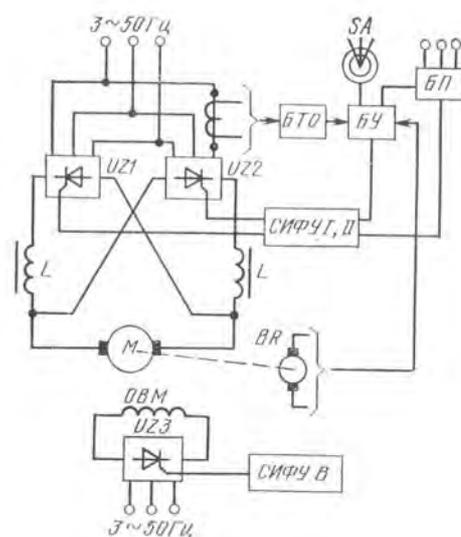


Рис. 47. Схема тиристорного электропривода постоянного тока кранового механизма: БП – блок питания; БУ – блок управления; БТО – блок токового ограничения; СИФУ – система импульсно-фазового управления

На рис. 47 приведена схема кранового тиристорного электропривода постоянного тока с двумя преобразователями $UZ1$ и $UZ2$ в цепи якоря двигателя M и одним нереверсивным преобразователем $UZ3$ в цепи обмотки возбуждения электродвигателя UBM . Управление приводом осуществляется с помощью командоаппарата SA . В схеме используются обратные связи по скорости (тахогенератор BR) и по току.

Система тиристорный преобразователь частоты – двигатель (ТПЧ-Д). Эта система позволяет применять надежный короткозамкнутый асинхронный электродвигатель при широком диапазоне регулирования скорости. Наибольшее применение нашли ТПЧ с непосредственной связью как наиболее простые на схеме. Однако регулирование частоты здесь осуществляется в диапазоне 5 – 20 Гц. Для расширения диапазона регулирования используются двухскоростные асинхронные двигатели, обмотки которых имеют смешанное питание от сети 50 Гц и от

преобразователя частоты. Для значительного увеличения плавности и диапазона регулирования (до 60:1) в системе применяют полюсно-переключаемые двигатели.

Регулирование скорости по системе ТРН-Д осуществляется в большинстве случаев по схемам со встречно-параллельными тиристорами, включенными в каждую фазу или в две фазы статора.

Недостатком электропривода по системе ТПН-Д является повышенный удельный расход электроэнергии.

Грузоподъемные электромагниты. При погрузке и разгрузке электромагнитных материалов (металлолома, стружки, труб, стального скрапа и т.п.) используются грузоподъемные электромагниты типа М.

Корпус электромагнита отливается из малоуглеродистой стали и имеет относительно высокую магнитную проницаемость. Внутри корпуса находится катушка из медной ленты в виде секций, соединенных последовательно. Все пустоты в корпусе с катушкой залиты нагревостойкой полимеризующейся массой для повышения механической и электрической прочности катушки и отвода тепла. Катушка электромагнита получает питание посредством гибкого кабеля от выпрямителя (кабель наматывается на барабан).

Для управления подъемными электромагнитами используют магнитные контроллеры типа ПМС. Грузоподъемные электромагниты имеют большую индуктивность и большой остаточный магнитный поток. Поэтому для быстрого и полного сбрасывания груза применяют специальные схемы. На рис. 48 приведена схема управления подъемным электромагнитом.

Для подъема груза сначала включают выключатель SA. При этом одновременно включается реле KV (которое размыкает свой контакт в цепи катушки контактора KM2) и контактор KM1, который подключает обмотку электромагнита YM к источнику питания. Через замыкающий контакт KM1 включается реле времени KT, которое замыкает свой контакт в цепи катушки контактора KM2, подготавливая его к работе.

Для сброса груза необходимо отключить выключатель SA. При этом отключится контактор KM1 и через него отключится катушка электромагнита YM (но остается замкнутой на разрядные резисторы R1 – R3). Одновременно с этим отключаются катушки реле KV и KT. Контакт реле KV подает питание на катушку контактора размагничивания KM2, который подключает катушку электромагнита YM, но с обратной полярностью. Это обеспечивает снятие остаточного магнетизма и предотвращает прилипание мелких грузов. Через определенное время реле KT разомкнет свой контакт и обесточит катушку контактора KM2, которая отключит электромагнит YM, в результате чего схема придет в исходное положение.

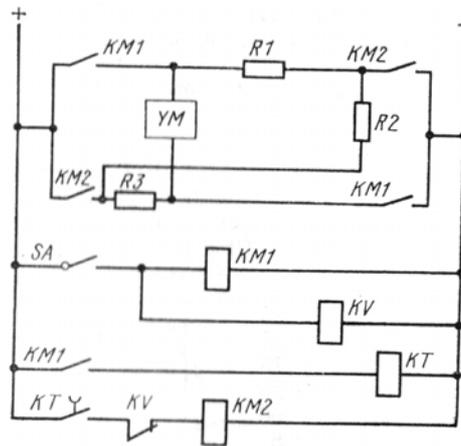


Рис. 48. Схема управления подъемным электромагнитом

Магнитный контроллер с тиристорным выпрямителем типа ПМС в комплекте с сельсинным электроаппаратом позволяет регулировать грузоподъемность электромагнита, что важным при работах с листовым железом и на складах.

Привод тормозных устройств. В металлургических кранах тормоз является важнейшим элементом, обеспечивающим безопасность эксплуатации. Подъемные механизмы должны снабжаться нормально замкнутым тормозом, действующим за счет силы сжатия пружины при отключенном приводе (подъемные механизмы, служащие для перемещения жидкого металла имеют не менее двух тормозов). Каждый из установленных тормозов должен удерживать груз, составляющий 125% номинального. Привод тормоза включается и отключается одновременно с двигателем механизма (у них должно быть соответствие по времени включения).

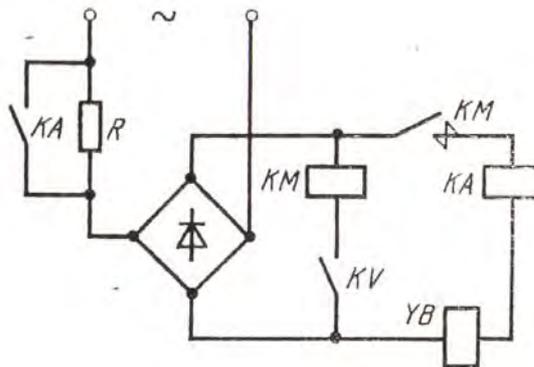


Рис. 49. Схема питания тормозного электромагнита с форсировкой

В качестве приводов тормозных устройств используются электромагниты постоянного и переменного тока, а также электрогидравлические толкатели. Одним из наиболее надежных и универсальных крановых тормозов является короткоходовой электромагнит постоянного тока типа МП (напряжение 110 или 220 В, потребляемая мощность 25-285 Вт). На рис. 49 представлена схема питания электромагнита YB постоянного тока с форсировкой. Включение тормоза осуществляется контактом реле

KV, который включает контактор *KM*. Последний включает своим контактом цепь электромагнита *YB*, последовательно с которым включена катушка реле форсировки *KA*. Пусковой ток электромагнита вызывает срабатывание реле *KA*, которое своим контактом шунтирует добавочный резистор *R*, обеспечивая включение катушки *YB* на повышенном напряжении. После включения катушки *YB* ток уменьшается, якорь реле *KA* отпадает, его контакт *KA* размыкается и напряжение на катушке снижается до номинального. Катушки электромагнитов МП включают через добавочный резистор (для ускорения срабатывания), используя катушку на 110 В в сетях 220 В.

Тема 2.2. Электрооборудование установок для производства агломерата и окатышей

Электропривод агломерационной машины. Железосодержащая часть шихты, используемая в доменном процессе, подлежит окускованию, которое осуществляется двумя способами: агломерацией и окомкованием (или окатыванием). *Агломерацией называется термический процесс окускования рудных материалов путем их спекания с целью придания формы и свойств, необходимых для доменной плавки.* Процесс агломерации осуществляется на агломерационных машинах: вначале исходные шихтовые материалы усредняют по содержанию железа, затем дозируют, смешивают между собой и топливом (коксыком), увлажняют и расстилают слоем заданной толщины на непрерывно движущихся по кольцевому рельсовому пути колосниках. Через слой шихтовых материалов продувается воздух с помощью мощных дымососов (аглоэкстауэтеров) с целью полного выгорания коксика по всей толщине рабочего слоя и получения пористой структуры агломерата.

Для получения качественного агломерата должно быть обеспечено соответствие скоростей движения аглоленты и скорости спекания шихты, которая зависит от высоты ее слоя, влажности состава и др. Кроме того, скорость движения аглоленты должна быть согласована с работой питателя, падающего на нее шихту. Система электропривода агломерационной машины должна обеспечивать диапазон регулирования скорости 5:1, точность ее поддержания 5%, предварительный выбор зазоров между спекательными тележками и др. Указанным требованиям в наибольшей степени удовлетворяет тиристорный электропривод постоянного тока, схема силовой части которого представлена на рис. 50. В начале работы контакты контакторов *KM1-KM3* отключены; двигатели аглоленты *M1* (85 кВт, 440В, 510 об/мин) и питателей *M3, M4* (5 кВт) неподвижны.

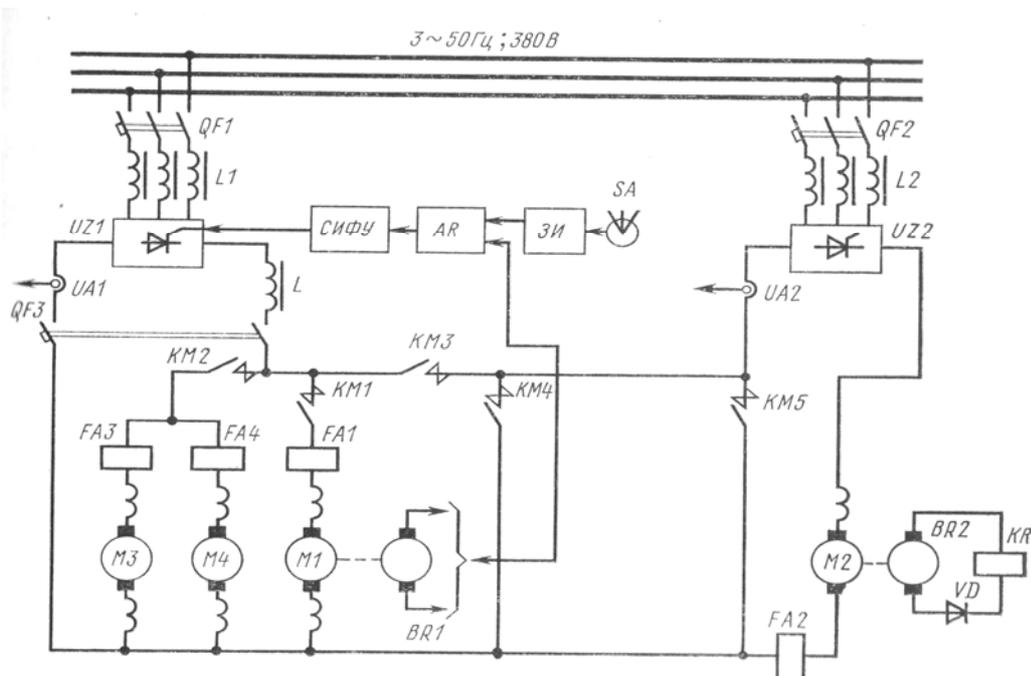


Рис. 50. Схема тиристорного электропривода агломашины

Включается контактор КМ5 выбора зазоров. Тормозная машина М2 (5 кВт, 440 В, 740 об/мин) подключается к тиристорному преобразователю UZ2 и работает в двигательном режиме, осуществляя сокращение зазоров между тележками и контроль за ним с помощью реле скорости КР, которое подключено к тахогенератору BR2. После устранения зазора тормозная машина останавливается, реле КР обесточивается и через систему контактов отключает контактор КМ5 и включает контакторы КМ1-КМ3 (включаются электродвигатели М1, М3 и М4). Теперь тормозная машина переходит в режим рекуперативного торможения. Генерируя ток, тормозная машина работает параллельно с тиристорным преобразователем UZ1 на двигатель ленты М1, создавая при этом момент, направленный встречно по отношению к движущему моменту двигателя ленты. При изменении нагрузки и скорости агломашины величина тормозного момента поддерживается постоянной путем сохранения постоянным тока в якорной цепи тормозной машины. Для этого используются жесткая отрицательная обратная связь по току и гибкие обратные связи по току и скорости тормозной машины, воздействующие на схему управления тиристорного преобразователя. Для получения необходимого значения тормозного момента тормозная машина работает с ослабленным магнитным потоком (до 70% от номинального).

В схеме рис. 50 обозначены: QF – автоматические выключатели, FA – токовые реле, ЗИ – задатчик интенсивности, AR – регулятор скорости, UA1, UA2 – датчики тока, СИФУ – система импульсно-фазового управления тиристоров, L – реакторы.

Электропривод машин для производства окатышей. В последние годы распространение получил другой способ окомкования шихтовых материалов – высокотемпературная грануляция (окачивание во вращающихся печах). Продукт окачивания представляет собой плотные, хорошо спеченные гранулы диаметром 20-25 мм, которые по сравнению с агломератом обладают рядом технологических преимуществ: большая прочность, меньшее выделение колошниковой пыли и т.п. В процессе окомкования шихтовые материалы после усреднения, дозирования и увлажнения подаются в гранулятор, где образуются окатыши заданных размеров. После этого окатыши передаются на конвейерную обжиговую машину, которая подобно агломерационной, но отличается от нее тем, что зажигательный горн расположен не в начале ленты, а простирается на всю ее длину. На хвостовом участке окатыши продуваются воздухом, охлаждаются до 300-500°С, затем подаются на грохот, где формируется готовая продукция и отсев мелочи (мелочь направляется обратно в шихтовое отделение).

В современных обжиговых машинах, как и в агломерационных, используется тиристорный электропривод постоянного тока, который обеспечивает плавное регулирование скорости тележек в диапазоне 5:1 с постоянным моментом на валу; безударный спуск тележек, без разрыва между ними; автоматическое поддержание величины тормозного момента для безударного спуска обжиговых тележек и т.п.

Электропривод других механизмов аглофабрик. В технологическом процессе агломерации и окачивания кроме агломерационной и обжиговой машин участвуют и другие механизмы: дозаторы, питатели, смесители, грануляторы, охладители, вентиляторы и др.

Для приводов большинства этих механизмов, в том числе транспортных, используются в основном асинхронные электродвигатели мощностью до 250 кВт. Двигатели с фазным ротором используются для конвейеров большой протяженности.

Для эксгаустеров, дымососов и охладителей используются синхронные электродвигатели напряжением 6-10 кВ и мощностью 1-8 МВт.

На механизмах, требующих широкого и плавного регулирования скорости, используется электропривод постоянного тока. К ним относятся окомкователи, смесители, охладители, питатели и т.п.

Включение в работу указанных механизмов осуществляется в строго определенной последовательности, что обеспечивается соответствующими блокировками. Например, перед пуском агломашин включаются насос маслосмазки и дробилки агломерата; питатели включаются и останавливаются одновременно с агломашинной.

Конвейерный транспорт. На металлургических заводах широко используется конвейерный транспорт. Его протяженность может достигать ста километров: от приема и складирования сырья до отгрузки готовой продукции.

Конвейеры большой протяженности часто оборудуются многодвигательным электроприводом. В качестве приводных в конвейерном транспорте используются асинхронные двигатели с фазным ротором и с короткозамкнутым ротором. В многодвигательном приводе для более равномерного распределения нагрузки между двигателями в цепь ротора вводят дополнительный реостат или используют короткозамкнутые двигатели с повышенным скольжением.

Жесткие требования по ограничению ускорений приводят к необходимости использования многоступенчатого пуска.

Работа конвейера согласуется с работой других механизмов – питателей бункеров, других конвейеров. Поэтому в схемах электроприводов конвейеров используются различные блокировки.

Конвейеры, питатели и другие транспортные механизмы и устройства аглодоменного цеха объединяются в поточно-транспортную систему, имеющую централизованное управление. Механизмы этой системы заблокированы между собой.

Тема 2.3. Электрооборудование доменных печей

Общие сведения. В доменных печах выплавляют чугун из железорудных материалов (агломерата, окатышей, руды). Необходимые для выплавки чугуна материалы (окатыши, агломерат, кокс, флюсы и т.п.), смешанные в определенной пропорции, поднимают на колошник и через засыпное устройство загружают в печь. В последнее время вместо скипового подъемника для наиболее мощных печей полезным объемом 5000 и 5500 м³ используется непрерывная конвейерная подача материалов. Наиболее ответственным и сложным комплексом механизмов доменной печи является система загрузки. В эту систему входит большое число механизмов, работающих в определенной последовательности.

Доменная печь является крупным потребителем электроэнергии, ее обслуживает около 400 электрифицированных механизмов. Общая установленная мощность электрических машин постоянного тока составляет 5100 кВт и асинхронных электродвигателей 4800 кВт.

К приводу механизмов доменной печи предъявляют ряд требований, основными из которых являются надежность и бесперебойность работы, возможность полной автоматизации процесса загрузки печи. Задержка в загрузке материалов даже на короткое время влечет за собой перевод печи на тихий ход или полную остановку. Поэтому для основных механизмов предусматривается резервирование практически

всех элементов электрооборудования – двигателей, преобразователей, токоподводящих линий и т.п. В случае значительного понижения уровня шихты в печи должен быть обеспечен ускоренный режим подачи материалов к загрузочному устройству.

Электропривод механизмов шихтоподачи. Для вагон-весов основными являются электроприводы механизмов перемещения вагона (два двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с реостатно-контакторным управлением) и механизма вращения затворов бункеров (два двигателя постоянного тока независимого возбуждения также с реостатно-контакторным управлением).

На крупных доменных печах доставка шихты от рудных бункеров к скиповой яме производится с помощью механизмов транспортной шихтовой подачи (шиберы, ленточные и пластинчатые конвейеры, грохоты, подъемник и т.п.).

Для приводов барабанных питателей бункеров используются асинхронные короткозамкнутые электродвигатели. Для пластинчатого конвейера подачи агломерата в весовую колонку используют привод постоянного тока по системе ТП-Д, так как для точного взвешивания агломерата необходимо в конце загрузки воронки снижать скорость конвейера. Электроприводы шиберов добавок, шиберов агломерата, затвора весовой воронки выполняются на асинхронных короткозамкнутых двигателях с системой динамического и механического торможения (для обеспечения быстрого останова). Аналогичный привод применяется и для затвора коксовой весовой колонки. Для привода грохота коксозагрузочного устройства используется асинхронный короткозамкнутый двигатель с динамическим торможением.

Электропривод механизмов загрузки печи при скиповой подаче шихты на колошник. Подача шихты на колошник доменных печей объемом до 3200 м³ осуществляется наклонными скиповыми подъемниками (высота подъема 50-60 м, длина наклонного пути 85-95 м, максимальная скорость подъема 4 м/с, объем скипов до 20 м³). Используются в основном двухскиповые подъемники уравновешенного типа, приводимые в движение от одной лебедки. Электропривод главного скипового подъемника должен обеспечивать регулирование скорости в диапазоне 8:1, плавное изменение скорости в начале и в конце пути скипа, точную остановку скипа на колошнике, необходимые блокировки. Этим требованиям удовлетворяет привод по системе Г-Д, которая нашла наиболее широкое применение, и по системе ТП-Д (в настоящее время применяется).

К приводу вращающегося распределителя шихты основными требованиями являются быстрый поворот и точная остановка в конце поворота. Этому требованию удовлетворяет привод с электродвигателем с фазным ротором мощностью до 100 кВт (с динамическим торможением). Для данного распределителя разработан и тиристорный электропривод постоянного тока с малой УВМ в системе управления и с бесконтактной аппаратурой.

Для привода лебедки конусов используются двигатели постоянного тока с релейно-контакторным управлением. Однако более целесообразным является электропривод постоянного тока по системе Г-Д с обратными связями и тиристорным возбуждением, а в последние годы внедряется тиристорный электропривод постоянного тока.

Электропривод механизмов загрузки печи при конвейерной подачи шихты на колошник. На крупных доменных печах объемом 5000 м³ и выше скиповые подъемники заменены ленточными подъемными конвейерами (длина конвейера 500 м, угол наклона 10°, производительность до 4000 т/ч). Основное техническое требование к электроприводу конвейера – это обеспечение плавного пуска и большого пускового момента. Этому требованию удовлетворяет привод на базе асинхронного двигателя с фазным ротором при сравнительно большом числе ступеней реостата в цепи ротора.

Для конвейера доменной печи объемом 5000 м³ используется многодвигательный электропривод с двумя приводными барабанами. Двигатель первого барабана – типа АКЗ-13-59-6 напряжением 6 кВ, мощностью 800 кВт, 990 об/мин. Двигатель второго барабана – типа АКЗ-13-37-6 напряжением 6 кВ, мощностью 500 кВт, 985 об/мин. Всего установлено 4 электродвигателя – два работающих и два резервных. Для автоматизации управления и контроля работы конвейера применяются различные датчики и реле, обеспечивающие сигнализацию, блокировки, регулирование хода, натяжение ленты и др. Число пусковых ступеней принято равным 24.

Электропривод вращающейся распределительной воронки выполнен по системе ТП-Д с реверсивным преобразователем. Схема управления – бесконтактная, выполнена на транзисторных

логических элементах. Система управления – двухконтурная с подчиненным регулированием (внешний контур по напряжению, подчиненный ему контур по току).

Из вращающейся воронки шихта поступает в надконусное пространство. При опускании конуса шихта из надконусного пространства ссыпается вниз и по

распределительной «юбке» скатывается в печь. Изменяя положение распределительной «юбки» по вертикали, можно нужным образом изменять распределение шихты в печи.

Для привода распределительной «юбки» используются три асинхронных электродвигателя с фазным ротором типа МТН-112-6 мощностью 4,5 кВт, 890 об/мин. Пуск двигателей осуществляется в две ступени пускового реостата в функции времени. Для смягчения механических характеристик с целью более равномерного распределения нагрузок между двигателями в цепях их роторов всегда остается включенной ступень реостата.

Тема 2.4. Электрооборудование сталеплавильных цехов

Общие сведения о конвертерах. Основным технологическим агрегатом современного сталеплавильного производства является **конвертер**. Он предназначен для переработки (конвертирования) жидкого чугуна в сталь заданного химического состава путем продувки чугуна кислородом. В технологическом процессе выплавки стали участвуют целый ряд механизмов. Современный конвертерный цех характеризуется высоким уровнем электрификации и является крупным потребителем электроэнергии. В трех основных отделениях цеха – конвертерном, миксерном и непрерывной разливки стали – установлено более 2000 двигателей суммарной мощностью около 100 МВт. Для электропривода машин и механизмов конвертерного цеха применяют наиболее надежное электрооборудование и электроаппаратуру. Используют двигатели краново-металлургической серии в закрытом исполнении. Особо высоки требования к электрооборудованию конвертера в отношении его надежности, поскольку отказ в работе любого элемента электрооборудования может привести к потере всей плавки. Поэтому надежность достигается резервированием практически всех узлов электрооборудования, включая электродвигатели, преобразователи, аппаратуру управления и элементы электроснабжения.

Основными механизмами конвертера являются механизмы поворота конвертера и перемещения фурмы.

Электропривод механизма поворота конвертера. Механизм поворота обеспечивает вращение конвертера в течение одного цикла плавки из вертикального положения в обе стороны двадцать раз на различные углы от 15° до 180°. Цикл работы конвертера (загрузка, плавка, введение добавок, слив стали и шлака) составляет примерно 35 минут.

реверсивный тиристорный преобразователь, L – сглаживающий дроссель, QS – разъединитель.

Электропривод механизма перемещения фурмы. Фурма служит для подачи кислорода в конвертер в процессе плавки стали. Каждый конвертер имеет две водоохлаждаемые фурмы, одна из которых – резервная. Широкий диапазон изменения скорости опускания и подъема фурмы при подаче ее на продувку, необходимость плавных пусков и торможений (ускорение не выше 2 м/с^2) и другие технологические требования обусловили выбор для механизма подъема фурмы электропривода постоянного тока по системе ТП-Д с замкнутой системой автоматического регулирования скорости с обратной связью по э.д.с. двигателя (рис. 52). Схема управления двухконтурная с подчиненным регулированием параметров. Основным является контур регулирования э.д.с. двигателя РЭ; ему подчинен контур регулирования тока РТ. Задание скорости и управление поворотом фурмы осуществляется сельсинным командоаппаратом SKAP. В автоматическом режиме сигналы управления поступают от блока автоматики БАУ. Мощность электродвигателя 30 кВт.

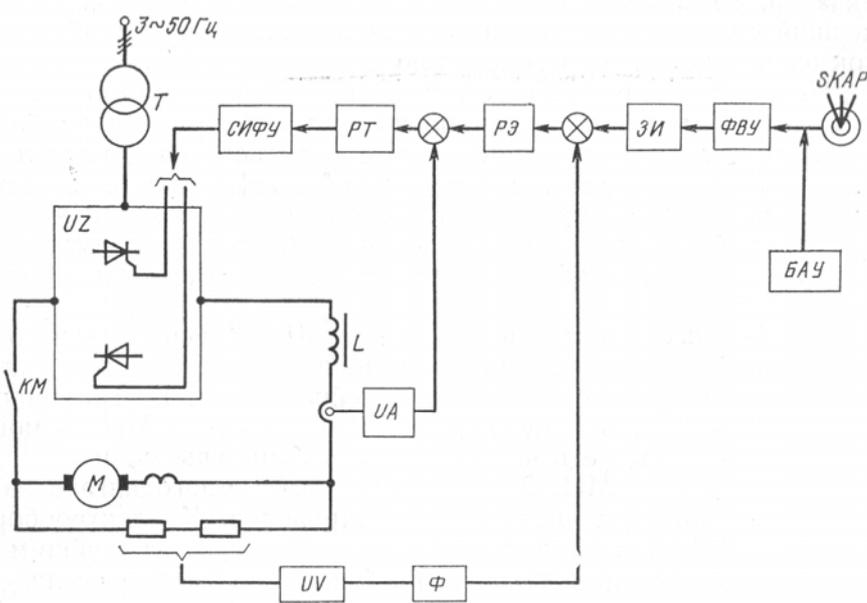


Рис. 52. Схема электропривода механизма перемещения фурмы:
 T – трансформатор; UZ - реверсивный тиристорный преобразователь;
 M – двигатель; СИФУ – система импульсно-фазового управления;
 РТ – регулятор тока; РЭ – регулятор скорости (ЭДС); ЗИ – задатчик
 интенсивности; ФВУ – фазовыпрямительное устройство; SKAP – сельсинный
 командоаппарат; БАУ – блок автоматического управления; Ф – фильтр;
 UV - датчик напряжения; UA – датчик тока; KM - контактор

Электропривод машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Сущность работы МНЛЗ заключается в том, что жидкую сталь непрерывно подают в

водоохлаждаемую изложницу – кристаллизатор, из нижней части которого вытягивается полужатвердевший слиток. После полного затвердевания движущийся слиток разрезают на мелкие заготовки.

Современная МНЛЗ – это сложный многодвигательный агрегат с несколькими электроприводами. К электрооборудованию МНЛЗ предъявляются аналогичные требования по надежности, как и к электрооборудованию конвертеров, поскольку даже кратковременное прекращение разливки стали может привести к потере всей плавки или значительной ее части.

Электроприводы кристаллизаторов, тянущих клетей и тянуще-правильных агрегатов всех новых МНЛЗ выполняют в основном по системе ТП-Д с подчиненным регулированием параметров.

Электропривод миксеров, сталевозов и шлаковозов. Миксер представляет собой стальной футерованный сосуд на роликовых опорах и предназначен для хранения жидкого чугуна с целью обеспечения бесперебойного снабжения жидким чугуном конвертера и мартеновских печей. Вместимость миксеров составляет 1300 или 2500 т. На миксерах вместимостью 1300 т механизм поворота имеет электропривод постоянного тока с питанием от сети. Регулирование скорости двигателя с последовательным возбуждением – реостатное, с релейно-контакторной схемой управления, управление осуществляется командоконтроллером. Пуск электродвигателя производится в четыре ступени в функции времени.

Механизмы поворота миксеров оборудуются двухдвигательными электроприводами постоянного тока (один двигатель рабочий, другой – резервный). Мощность их двигателей 50 кВт каждый, на миксерах вместимостью 2500 т – по 95 кВт. Механизм поворота миксеров вместимостью 2500 т имеет привод постоянного тока по системе ТП-Д с подчиненным регулированием параметров.

Сталевоз служит для приема жидкой стали из конвертера в ковш и транспортирования ковша к МНЛЗ. *Шлаковоз* предназначен для передачи ковшей со шлаком от конвертера. Конструкции приводов передвижения сталевозов и шлаковозов аналогичны. Сталевозы для 350-т ковшей имеют тиристорный электропривод постоянного тока с системой подчиненного регулирования параметров.

Автоматизация конвертерных цехов. Предусматриваются 3 уровня автоматического управления:

I – система управления отдельными операциями механизмов (кранов, конвертеров, миксеров, МНЛЗ и др.);

II – система управления всем технологическим процессом отдельно на конвертере и на МНЛЗ. Здесь используются уже ЭВМ для решения задач автоматизации управления процессом производства стали и литых заготовок;

III – система управления конвертерным цехом в увязке с другими цехами. Здесь решаются задачи по оперативному планированию и управлению отделениями конвертерного цеха, обеспечению его исходными материалами, по учету и анализу работы цеха, по составлению отчетной документации. В цехе предусматривается наличие центрального диспетчерского пункта со всеми необходимыми информационными средствами и связями с постами управления в цехе и с диспетчерскими пунктами других цехов.

Защита окружающей среды. Электрофильтры. В процессе металлургического производства образуются большие объемы количества отходящих газов, пыли и т.п. В отходах сталеплавильного и доменного производства содержатся ценные компоненты. Современная металлургическая технология имеет возможность полной утилизации отходов и надежной охраны от загрязнения окружающей среды. Здесь одну из первостепенных ролей играет электроочистка промышленных газов и отходов от взвешенных частей. Такая очистка осуществляется с помощью **электрофильтров**. Принцип электроочистки газов состоит в том, что взвешенные частицы пыли и золы в фильтре электризуются и оседают на электродах, подключенных к высоковольтному выпрямителю.

Электрофильтр состоит из осадительных камер, источника питания электродов постоянным током, механизмов встряхивания электродов и устройства для удаления из бункеров уловленных материалов (золы, пыли). В осадительной камере установлены осадительные (из шестигранных труб диаметром 250 мм и длиной 4-5 м) и коронирующие электроды. Коронирующие электроды выполняются из круглой проволоки диаметром 2-3 мм и располагаются внутри осадительного электрода вдоль оси.

При подаче на электроды постоянного тока высокого напряжения между ними образуется коронный разряд, при этом возникают положительные и отрицательные ионы газа, которые двигаются к соответствующим электродам. Отрицательные ионы двигаются по направлению к осадительному электроду (имеющему положительный потенциал), по пути осаждаются на поверхности твердых частиц, которые также начинают двигаться и осаждаются на электроде. Удаление осевших частиц осуществляется встряхиванием или смыванием водой.

В настоящее время широко применяют электрофильтры серии АТФ с тиристорным силовым регулирующим органом (рис. 53). Номинальное

выпрямленное напряжение 80 кВ, среднее значение выпрямленного тока 0,25-1,6 А. Силовые тиристоры VS1, VS2 совмещают функции регулирования напряжения на первичной обмотке силового трансформатора Т и оперативного включения и отключения агрегата. Схема управления АУ допускает как автоматическое, так и ручное регулирование напряжения и тока короны от нулевого значения нагрузки до номинального. Режим автоматического регулирования ведется с учетом интенсивности искрений в активной зоне электрофильтра.

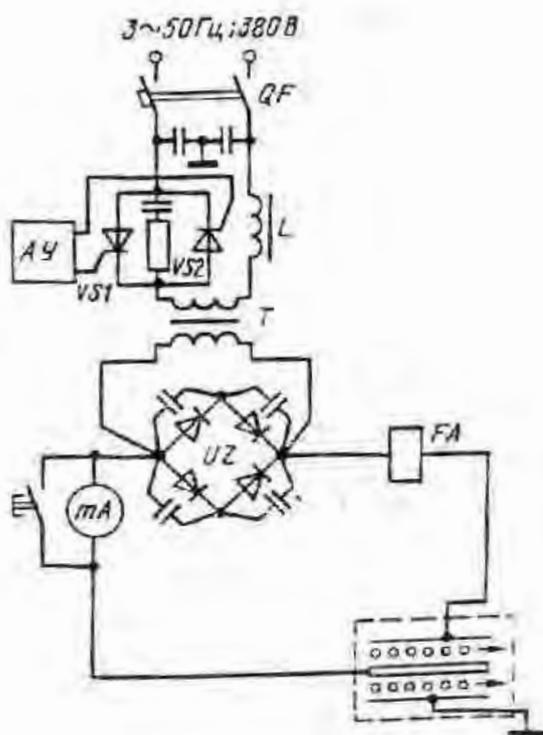


Рис. 53. Схема питания электрофильтра

Тема 2.5. Электрооборудование прокатных станов

Электропривод основных и вспомогательных механизмов. Под **прокатным станом** понимают комплекс оборудования для производства прокатного профиля со всем относящимся к нему основным (клетки с прокатными валками, шестеренные клетки и др.) и вспомогательным (ножницы, пилы, рольганги и др.) оборудованием.

Для привода валков мощных прокатных станов применяют электродвигатели постоянного тока типа МП, П, ПС мощностью до 16 МВт. Электродвигатели реверсивных прокатных станов работают в очень напряженном режиме (до 1500 пусков в час, частые реверсы, остановки, большие перегрузки). Практически двигатели реверсивных прокатных станов все время работают в переходных режимах, при этом требуется глубокое (диапазон не менее 10:1) и плавное регулирование скорости.

Электроприводы современных реверсивных прокатных станов горячей прокатки выполняются в настоящее время по системе ТП – Д. Система управления строится по принципу подчиненного регулирования на элементах УБСР.

Большинство *вспомогательных механизмов* (нажимные устройства, рольганги, манипуляторы, кантователи, ножницы) требуют быстрого разгона и замедления. Электроприводы таких механизмов в большинстве случаев выполняются по системе ТП – Д (мощность двигателей постоянного тока привода нажимных устройств блюмингов составляет до 640 кВт).

Рабочие рольганги (*механизмы, предназначенные для транспортировки металла вращающимися роликами*) работают с частотой включения 1000 – 1200 в час, требуют регулирования скорости до 10:1. Для рольгангов с групповым приводом, работающих с частотой не выше 500 включений в час и не требующих регулирования, применяются асинхронные двигатели с фазным ротором. Для индивидуального электропривода применяется система ТП – Д или короткозамкнутые асинхронные двигатели, питаемые от общего преобразователя частоты с диапазоном регулирования от 10 до 60 Гц.

Тема 2.6. Электрооборудование электротермических установок

Общие сведения. В чёрной металлургии весьма широко используются электропечи: для выплавки стали и различных сплавов, для подогрева жидкого металла при разливке в формы, для подогрева заготовок под обработку давлением (прокатку, ковку, штамповку) и др. Как правило, получить металл с высоким качеством и свойствами можно лишь в электропечах.

По способу преобразования электроэнергии в тепловую энергию и подвода тепла к выплавляемому металлу различают следующие электропечи и устройства:

- дуговые печи (дуговые вакуумные, плазменно-дуговые);
- печи сопротивления (электрошлакового переплава);
- индукционные печи;
- установки электронного нагрева;
- установки с применением оптических квантовых генераторов.

В основе работы электротермических установок лежит *закон Джоуля-Ленца*: количество тепла, выделяемого током в проводнике, равно произведению квадрата тока, сопротивлению проводника и времени протекания тока.

Особенностью большинства электротермических установок являются высокие подводимые мощности (десятки и даже сотни тысяч киловатт в единице), сравнительно низкие напряжения на вторичной стороне (от десятков до нескольких сотен вольт) и большие токи (до сотен тысяч ампер), а вокруг проводников

образуются очень сильные магнитные поля. В некоторых установках используют токи высокой частоты.

Электрооборудование дуговой сталеплавильной печи (ДСП). В состав электрооборудования ДСП (рис. 55) входят: силовое оборудование; аппаратура управления, защиты, сигнализации, измерения, автоматического регулирования режима; приводы механизмов печи; электрооборудование газоочистки; коммутационная аппаратура. По надёжности электроснабжения ДСП являются потребителями второй категории (допускают перерыв в подаче энергии не более 30 мин.).

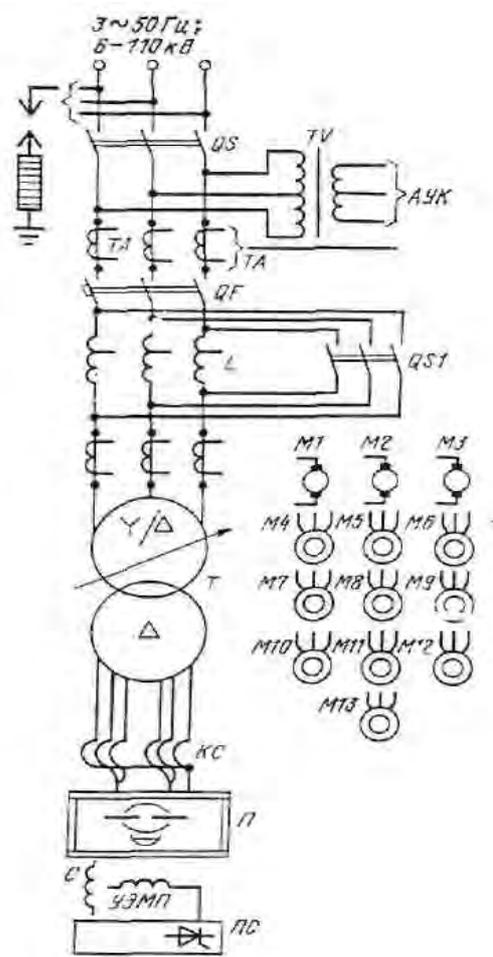


Рис.54. Электрическая схема дуговой электропечи

Включение и выключение электропечи (рис. 54) осуществляется разъединителем QS (который служит для создания видимого разрыва силовой цепи, что необходимо при ремонтах) и выключателем мощности QF (при напряжении 6-10 кВ используют электромагнитные выключатели, при напряжении 35 кВ – воздушные, при 110 кВ – вакуумные). Реактор L ограничивает броски тока при эксплуатационных коротких замыканиях и стабилизирует горение дуги. По окончании расплавления шихты реактор шунтируется выключателем QS1. Печной трансформатор печи служит для

согласования напряжения сети с рабочим напряжением печи (не более 1000 В), а также для регулирования напряжения по периодам плавки. Глубина регулирования напряжения составляет 2-4, число ступеней регулирования 12-23. Регулирование напряжения осуществляется переключением первичной обмотки с звезды на треугольник и обратно (грубое регулирование) и переключением числа витков (точное регулирование). Вторичная обмотка трансформатора Т соединяется с электродами электропечи через токоподвод КС.

На первичной стороне трансформатора устанавливают максимальные реле, воздействующие на катушку отключения выключателя QF с выдержкой времени. Выключатель QF осуществляет выключение печи только при аварийных коротких замыканиях и при длительных перегрузках. При возникновении же эксплуатационных (сравнительно кратковременных) коротких замыканий работают звуковая и световая сигнализация без отключения цепи.

К трансформатору напряжения TV и трансформатору тока ТА подключены и другие аппараты управления, контроля и защиты (АУК).

Особенность вторичного токоподвода заключается в том, что по нему проходит ток в десятки и сотни тысяч ампер. Поэтому основными требованиями к токоподводу (его называют ещё короткой сетью) являются: возможно меньшая длина, наиболее рациональная транспозиция проводников для получения одинаковых электрических параметров всех дуг (мощность, напряжение, сила тока).

Автоматизация дуговых электропечей. Все промышленные ДСП оборудуют автоматическими регуляторами (сокращается продолжительность плавки, повышается производительность печи, уменьшается расход электроэнергии). Наилучшим параметром регулирования является разность сигналов тока и напряжения дуги $aI_d - bU_d = bI_d Z_d$, где a и b – постоянные коэффициенты (их изменяют вручную при настройке), Z_d – полное сопротивление дуги. Таким образом, регулятор в данном случае реагирует на отклонение полного сопротивления ΔZ_d от заданного значения. Использование этого параметра позволяет легко зажигать дугу и поддерживать на заданном уровне выделяемую в ванне печи мощность. Такой регулятор называется **дифференциальным**.

Исполнительные механизмы регуляторов ДСП бывают с электромеханическим приводом (с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением) и с гидравлическим приводом. Наиболее перспективными являются регуляторы мощности на тиристорах (рис. 55). Сигналы, пропорциональные току I_d и напряжению U_d дуги, поступают с трансформаторов токов и напряжения (ТА, Т1, Т2) на выпрямителе UZ1, UZ2. Разбаланс между входными сигналами поступает в узел

зоны нечувствительности УЗН. Сигнал с УЗН поступает на вход усилителя А, на другие входы которого подаются сигналы обратной связи по току и скорости двигателя М. С выхода А сигнал поступает на СИФУ, которая изменяет соответствующим образом углы регулирования тиристоров, а следовательно, выходное напряжение тиристорного преобразователя UZ и скорость электродвигателя перемещения электродов.

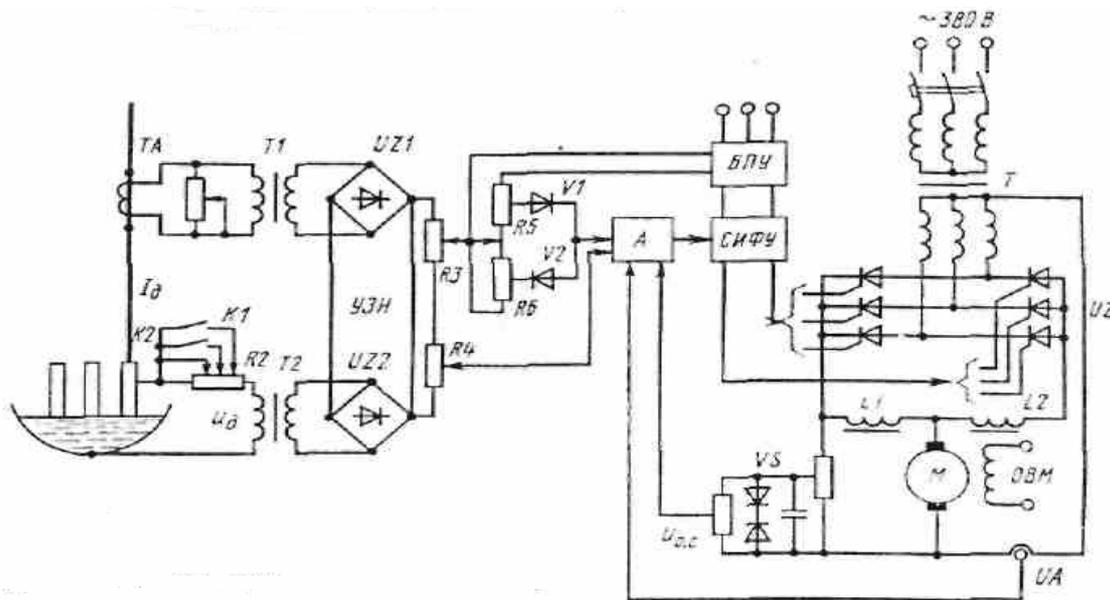


Рис. 55. Схема тиристорного регулятора мощности ДСП

Питание системы управления осуществляется от блока питания БПУ.

Если электрический режим печи соответствует заданному, то выходной сигнал с усилителя А отсутствует и двигатель М неподвижен. При отклонении электрического режима от заданного на выходе УЗН появится сигнал, полярность которого зависит от характера этого отклонения (увеличение I_d , например короткое замыкание, или увеличение U_d , например обрыв дуги). Если сигнал на входе УЗН превысит зону нечувствительности, открывается соответствующий блок тиристоров UZ и двигатель начнет перемещать электрод (опускать его при чрезмерном возрастании напряжения дуги и поднимать при чрезмерном возрастании тока дуги).

Электромагнитное перемешивание жидкого металла. В мощных ДСП применяется электромагнитное перемешивание жидкого металла. Оно позволяет ускорить растворение легирующих добавок, выровнять химический состав и температуру стали по всему объему, повышает производительность печи и снижает расход электроэнергии.

Электромагнитное устройство управления перемешивания жидкого металла, принцип действия которого аналогичен принципу действия асинхронного двигателя,

представляет собой индуктор (статор), установленный под немагнитным днищем печи. Статор имеет две обмотки, токи которых сдвинуты по фазе на 90 градусов и создают бегущее магнитное поле. Это поле индуцирует в жидком металле вихревые токи, взаимодействие которых с бегущим полем статора вызывает движение нижних слоев металла в ванне. Последние достигают наклонной стенки и приводят в движение верхний слой металла (в противоположном направлении).

Для электромагнитного перемешивания используют переменный ток силой 2500 А напряжением 100-300 В при частоте 0,3-1,1 Гц. Низкая частота объясняется необходимостью проникновения магнитного поля сквозь кожух печи, который полностью экранирует поле промышленной частоты. Кроме того, токи низкой частоты создают большую глубину проникновения магнитного поля в металл и соответственно большие силы, приложенные к жидкому металлу. Питание статора осуществляется от тиристорных преобразователей низкой частоты.

Электрооборудование дуговых вакуумных печей (ДВП). Такие печи используют в основном для производства тугоплавких и химически активных материалов (титана, вольфрама, молибдена, циркония), а также высококачественных сталей с улучшенными свойствами. Наибольшее применение в ДВП получила дуга постоянного тока, что объясняется большой устойчивостью ее горения. У крупных ДВП сила тока дуги достигает 50 кА, а это требует соответствующих источников питания и мощных токопроводов. Для питания ДВП серийно изготавливаются тиристорные преобразовательные агрегаты серии ТВ, позволяющие регулирование напряжения в пределах 0-100%.

Электромеханический привод перемещения электрода использует регуляторы силы тока дуги, длины дугового промежутка и др.

Широко применяют регуляторы на бесконтактных логических элементах и полупроводниках, у которых регулируемой величиной является длина межэлектродного промежутка, а параметром регулирования – отклонение среднего значения напряжения.

Электрооборудование плазменных дуговых печей (ПДП). Особенностью плазменного нагрева является высокая концентрация энергии и как следствие – высокие температура и скорость протекания технологических процессов. Основной элемент ПДП – плазматрон, в котором электрическая энергия преобразуется в тепловую энергию плазмы. ПДП используют для плавки жаропрочных тугоплавких металлов и сплавов, керамики и т.п. В качестве плазмообразующего газа используют аргон.

В промышленности нашли применение в основном плазматроны постоянного тока, что объясняется более устойчивым характером дуги и стабильностью рабочего режима. Особенностью ПДП является то, что управление мощностью осуществляется не изменением дуги, а изменением ее рабочего тока. Для ПДП выпускаются тиристорные источники питания (с системой автоматической стабилизации тока) на мощности 115-8250 кВт напряжением постоянного тока 115, 230, 400, 600 и 825 В.

Электрооборудование электронно-лучевых плавильных установок (ЭЛПУ). В ЭЛПУ электроэнергия преобразуется в тепловую путем воздействия на нагревательный материал пучка электронов. Сфокусированный пучок электронов может обеспечивать высокие значения удельной мощности (до 1000 МВт/м²) и температуру порядка 6000°К. Поэтому ЭЛПУ применяют для получения слитков и фасонного литья особо высокой чистоты из тугоплавких металлов и сплавов. Основная часть ЭЛПУ – электронная пушка с системой фокусировки. При бомбардировке поверхности металла образуется рентгеновское излучение. Единичная мощность ЭЛПУ ограничена условием допустимого рентгеновского излучения, поэтому увеличение общей мощности ЭЛПУ достигается установкой нескольких пушек, работающих параллельно в одной печи. ЭЛПУ выпускаются с суммарной мощностью пушек до 3000 кВт.

Печи оборудуют механизмами подачи стержня переплавляемого металла и вытягивания слитка. Эти механизмы имеют электромеханический или гидравлический привод.

Управление мощностью ЭЛПУ обычно осуществляется путем изменения ускоряющего напряжения. Источник питания печи состоит из двух регулируемых блоков: анодного питания и накала катода со стабилизацией переменного тока в нагрузке.

Электрооборудование печей электрошлакового переплава (ЭШП). Электрошлаковый переплав применяют для получения сталей и сплавов, отличающихся повышенной чистотой, низким содержанием вредных примесей и хорошей макроструктурой. Повышение качества металла достигают переплавом расходуемого электрода в шлаковой ванне. ЭШП питаются от специальных печных трансформаторов мощностью 1-10 МВ·А напряжением 6÷35 кВ/ 30-260 В (регулируемое число степеней 5-49).

Для питания мощных ЭШП применяют тиристорные преобразователи пониженной частоты (5-15 Гц).

ЭШП могут иметь до трех электроприводов: перемещения электрода, перемещения кристаллизатора и тележки поддона для выгрузки слитка.

Привод перемещения электродов – электромеханический по системе ТП-Д с диапазоном регулирования скорости 1:1000.

Электрооборудование индукционных плавильных печей. В таких печах используется принцип бесконтактной передачи электроэнергии к нагреваемому металлу, с помощью электромагнитного поля, создаваемого индуктором, индуктор изготавливают из медной, чаще всего водоохлаждаемой трубки специального профиля. По частоте тока различают индукционные печи:

- промышленной частоты (50 Гц); питаются от сети через понижающий трансформатор;

- повышенной частоты (0,5-10 кГц); питаются от электромашинных или полупроводниковых преобразователей частоты;

- высокой частоты (66-440 кГц); питаются от ламповых генераторов.

Под действием индуктированной э.д.с. в металлах (шихте) циркулируют вихревые токи. Система индуктор-шихта при наличии замкнутого магнитопровода подобна силовому трансформатору, работающему на активно-индуктивную нагрузку. Первичной обмоткой служит индуктор, а вторичной – шихта. Нагреваемый металл является одновременно нагрузкой такого трансформатора и частью его магнитной системы.

В комплект электрооборудования индукционных печей промышленной частоты входят: коммутационное оборудование (выключатели, разъединители, контакторы), печной регулируемый трансформатор, индуктор, батарея индексакторов (для повышения $\cos\phi$), аппаратура защиты, контроля, сигнализации, автоматические регуляторы и т.п.

В комплект индукционных печей повышенной и высокой частоты входят: преобразователь частоты (электромашинный или тиристорный, а в высокочастотных установках – ламповый), конденсаторная батарея, индукторы, измерительные трансформаторы тока и напряжения, измерительные приборы, аппаратура автоматики и защиты.

Для **питания индукционных установок используются следующие типы преобразователей частоты:** синхронные генераторы с частотой 500 Гц; электромагнитные генераторы индукторного типа (500-10000 Гц); тиристорные преобразователи частоты (2400-10000 Гц) и ламповые генераторы (66, 440 кГц и выше).

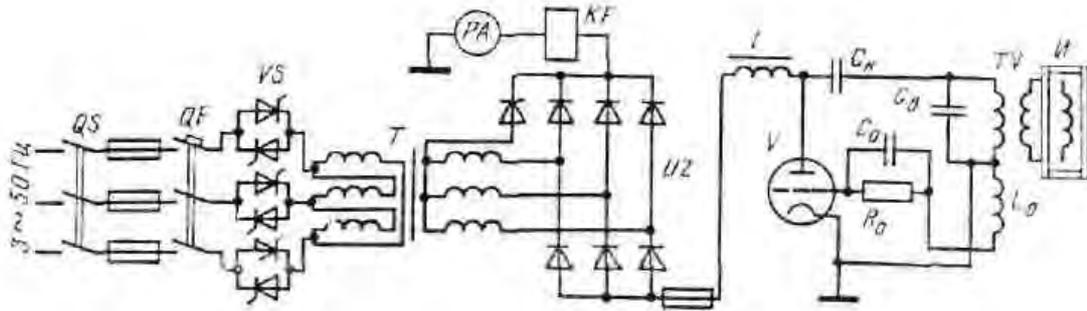


Рис. 56. Схема лампового генератора

Схема лампового генератора представлена на рис. 56. Трансформатор Т повышает напряжение до 8-11 кВ, которое подается на управляемый высоковольтный выпрямитель UZ. Выходное напряжение генератора может регулироваться с помощью транзисторов VS, включенных по встречно-параллельной схеме в цепь первичной обмотки трансформатора. От выпрямителя UZ напряжение подается на автогенератор, который преобразует энергию постоянного тока в энергию тока высокой частоты. Автогенератор состоит из генераторной лампы V, колебательного контура в цепи обратной связи. В колебательный контур входят высокочастотный трансформатор TV, батарея конденсаторов $C_{\text{в}}$ и индуктор И. Колебательный контур изолирован от цепи постоянного тока разделительным конденсатором $C_{\text{к}}$. Для устранения шунтирующего действия источника питания на высокочастотную часть схемы в цепь постоянного тока включен анодный реактор L. В цепь самовозбуждения генератора входит контур обратной связи ($L_{\text{о}}$, $C_{\text{о}}$, $R_{\text{о}}$), подающий напряжение обратной связи на сетку генераторной лампы. Генераторные лампы имеют водяное охлаждение. Анод в этом случае выполняют из красной меди и помещают в металлический бачок с проточной водой. Так как на аноде рассеивается большая мощность потерь, то к.п.д. лампового генератора не превышает обычно 0,6-0,7. Выходная номинальная мощность ламповых генераторов, серийно изготавливаемых, бывает от 4 до сотен киловатт, рабочая частота – 66, 440, 880, 1760 кГц.

Тема 2.7. Электроснабжение металлургических цехов и установок

Категории потребителей электроэнергии. Согласно Правилам устройства электроустановок (ПЭУ) приемники электроэнергии по требуемой степени безопасности электроснабжения подразделяются на три категории:

к **первой категории относятся** приемники, для которых перерыв в подаче электроэнергии связан с опасностью для жизни и здоровья людей, значительным

ущербом народному хозяйству, браком продукции, порчей оборудования или длительным расстройством технологического процесса;

ко **второй категории** относятся приемники, для которых перерыв в подаче электроэнергии связан с существенным недовыпуском продукции, простоем большого числа людей и механизмов;

к **третьей категории** относятся все электроприемники, не подходящие под определения 1-й и 2-й категории, допускающие перерывы в электроснабжении без существенного ущерба для потребителей в течение времени, необходимого для ремонта или замены вышедшего из строя электрооборудования.

К первой категории относятся и электроприемники *«особой группы 1-й категории»*. Это электроприемники, внезапные перерывы электроснабжения которых угрожают жизни людей, взрывами, пожарами и разрушениями основного технологического оборудования. Бесперебойная работа приемников особой группы необходима для безаварийной остановки производства (но не для продолжения его).

В качестве примера перечислим некоторые потребители металлургического завода в соответствии с их категориями.

Потребители 1-й категории: доменные печи, разливочные машины, воздуходувки, газодувки, устройства газоочистки, плавильные печи, дутьевые вентиляторы, оборудование МНЛЗ, механизм наклона миксера и др. Допустимая длительность ввода резерва для них составляет 1,5-2 с.

Потребители 2-й категории: трубопрокатные и листовые станы, ножницы, станы холодной прокатки, мостовые краны шихтового двора и др. Допустимая длительность ввода резерва – десятки минут.

Потребители 3-й категории: механические, кузнечные цехи, железнодорожный цех, гаражи, склады и др.

Требование бесперебойного электроснабжения удовлетворяется благодаря питанию ответственных потребителей несколькими (не менее чем двумя) независимыми линиями электропередачи, резервированию трансформаторами, коммутационными аппаратами, электродвигателями.

Электроприемники особой группы (аварийное освещение ряда цехов, электродвигатели задвижек и др.) при нормальном режиме питаются от общей сети и подключаются к агрегату бесперебойного питания (АПБ), который содержит аккумуляторную батарею и инвертор. В качестве источника питания используются также генераторы с приводом от двигателя внутреннего сгорания.

Схемы электроснабжения металлургических предприятий. Система электроснабжения состоит из питающих распределительных, трансформаторных,

преобразовательных подстанций и связывающих их кабельных и воздушных сетей напряжением до 1000 В и выше. Число питающих линий должно быть не менее двух (обычно их больше двух).

Питающие металлургический завод линии электропередачи присоединяются к шинам районной понизительной подстанции. Вблизи завода сооружаются пункты приема электроэнергии от энергосистемы: узловые распределительные подстанции с первичным напряжением 35-330 кВ или главные понизительные подстанции. Их число и тип зависят от потребляемой мощности и размещения нагрузок на территории завода.

Существуют две основные схемы электроснабжения: 1) с глубоким вводом, 2) с главной понизительной подстанцией.

Главная понизительная подстанция получает питание от районной энергосистемы и затем на более низком напряжении (6-10 кВ) распределяет электроэнергию по заводу.

Стремление уменьшить длину линий низкого напряжения (до 1000 В) привело к проникновению напряжения 110-330 кВ на территорию предприятия непосредственно к цехам с мощными потребителями, т.е. к *глубокому вводу*. При глубоком вводе отпадают промежуточные распределительные пункты, сокращаются распределительные сети вторичного напряжения 6-10 кВ, уменьшаются потери электроэнергии.

От подстанции глубокого ввода электроэнергия напряжением 6-10 кВ подводится к распределительным пунктам или непосредственно к мощным печам, синхронным электродвигателям.

От распределительных пунктов электроэнергия напряжением 6-10 кВ подводится к цеховым трансформаторным подстанциям, от которых уже получают энергию потребители с напряжением 1000 В.

Электрооборудование подстанций. Подстанции служат для преобразования и распределения электроэнергии. Каждая подстанция имеет трансформаторы, распределительные устройства, содержащие коммутационные аппараты, измерительные приборы, сборные и соединительные шины, аппараты защиты и автоматики. Широко применяются подстанции с комплектными распределительными устройствами (КРУ) напряжением 6-10 кВ. КРУ состоит из набора типовых шкафов в металлической оболочке с полностью смонтированным электрооборудованием и со всеми соединениями главных и вспомогательных цепей. В шкафу КРУ могут быть встроены выключатели, силовые трансформаторы, разрядники, предохранители и различная аппаратура. Токоведущие части КРУ крепятся и изолируются при помощи изоляторов.

Рекомендуемая литература

1. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода. – Мн.: ЗАО «Техноперспектива», 2004.
2. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энегроиздат, 1981.
5. Фотиев М.М. Электропривод и электрооборудование металлургических цехов. – М.: Металлургия, 1990.
6. Фотиев М.М. Электропривод и электрооборудование металлургических и литейных цехов. – М.: Металлургия, 1983.