

С.Н. Павлович

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА



С.Н. Павлович

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ КУЗНЕЧНО- ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Учебное пособие

МИНСК * БНТУ * 2018

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 электрооборудования кузнечно-штамповочных машин: механика электропривода, электромеханические свойства электродвигателей постоянного и переменного тока, электрические аппараты и схемы управления электроприводами, расчет мощности и выбор двигателей при различных режимах их работы по нагреву, включая привод с маховиком.

Белорусский национальный технический университет
Проспект Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел (017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37

© БНТУ, 2018

© Павлович С.Н., 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Раздел 1. Механика электропривода	
1.1. Виды передаточных механизмов	7
1.2. Расчетные схемы механической части ЭП.....	9
1.3. Приведение моментов сопротивления и сил, моментов инерции и масс к валу электродвигателя.....	10
1.4. Учет потерь в передачах.....	12
1.5. Уравнение движения электропривода.....	13
Раздел 2. Электромеханические свойства электродвигателей	
2.1. Электромеханические свойства двигателей постоянного тока	14
2.2. Электромеханические свойства асинхронных электродвигателей.....	21
2.3. Электромеханические свойства синхронных двигателей.....	28
Раздел 3. Аппаратура и схемы управления электропри- водами.	
3.1. Аппараты ручного управления.....	29
3.2. Аппараты дистанционного автоматического управления.....	30
3.3. Основные схемы контакторного управления.....	32
3.4. Аппаратура и схемы защиты электродвигателей.....	35
3.5. Автоматическое управление в функции времени.....	37
3.6. Автоматическое управление в функции тока.....	40
3.7. Автоматическое управление в функции скорости.....	42
3.8. Бесконтактное логическое управление КШМ.....	44
Раздел 4. Методы расчета и выбора электропривода.	
4.1. Основные критерии выбора электродвигателей.....	46
4.2. Нагрев и охлаждение электродвигателей.....	49
4.3. Основные режимы работы электродвигателей по нагреву.....	51
4.4. Методы расчета мощности электродвигателя при переменной нагрузке.....	52
4.5. Расчет номинальной мощности электродвигателя при длительном режиме его работы.....	55
4.6. Расчет номинальной мощности электродвигателя при повторно- кратковременном режиме работы.....	57
4.7. Расчет электропривода с маховиком.....	58
Раздел 5. Электрооборудование кузнечно-штамповочных машин.	
5.1. Электрооборудование кривошипных кузнечно-штамповочных машин.....	60
5.2. Электрооборудование гидравлических прессов и насосно- аккумуляторных станций.....	61
5.3. Электрооборудование фрикционных прессов и других кузнечно-штамповочных машин	62
Литература.....	63

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 пароходах), 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, сообщаемое 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 *электромеханическое устройство, сообщаемое движению рабочему органу производственной машины и состоящее из электродвигателя с аппаратурой (системой) управления и механической передачи*. Другими словами можно сказать, учитывая рассмотренное выше понятие привода,

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

Автоматизированный электропривод (АЭП) – это электромеханическое устройство, предназначенное для приведения рабочего органа производственной машины и управления 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.

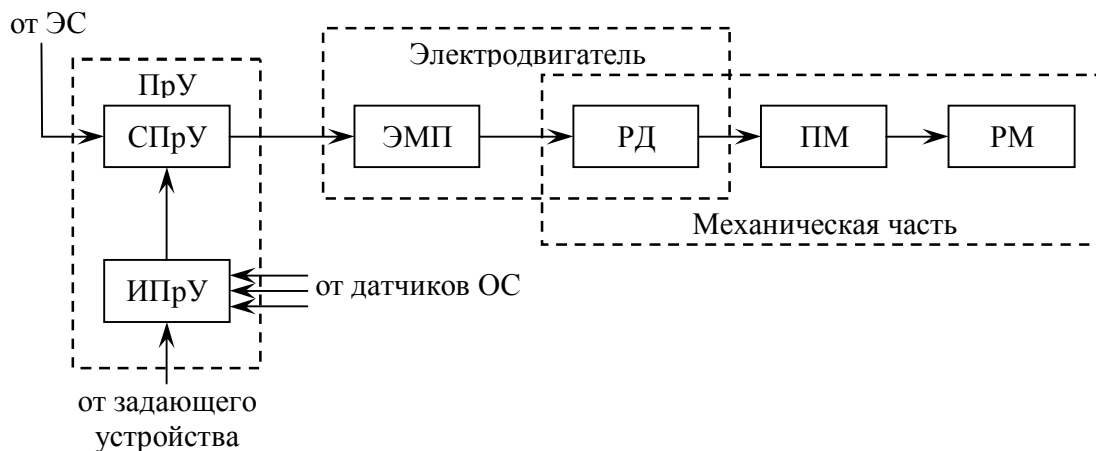


Рис.1. Структурная схема автоматизированного электропривода.

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 M 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.

Производственные показатели современных кузнечно-штамповочных машин во многом определяются применяемыми на них автоматизированными электроприводами и средствами электроавтоматики. Поэтому инженеру, конструирующему или эксплуатирующему современные кузнечно-штамповочные машины, необходимо знать их электрооборудование: применяемые электродвигатели и на их основе автоматизированные электроприводы, их основные электромеханические свойства, контактную и бесконтактную аппаратуру и системы управления электроприводами, методы и схемы автоматизации. Изучению перечисленных основных вопросов электрооборудования кузнечно-штамповочных машин и предназначен данный предмет.

Раздел 1. Механика электропривода

1.1. Виды передаточных механизмов

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

$$P_n = M_n \omega_n ;$$

$$M_n = C_k D^2 L ,$$

где C_k – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей машины. Из этих зависимостей следует, что при заданной мощности для уменьшения габаритов электродвигателя (D^2L) необходимо увеличивать его угловую скорость ω_n , особенно для маломощных двигателей ($\omega_n = 100 - 600$ 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.

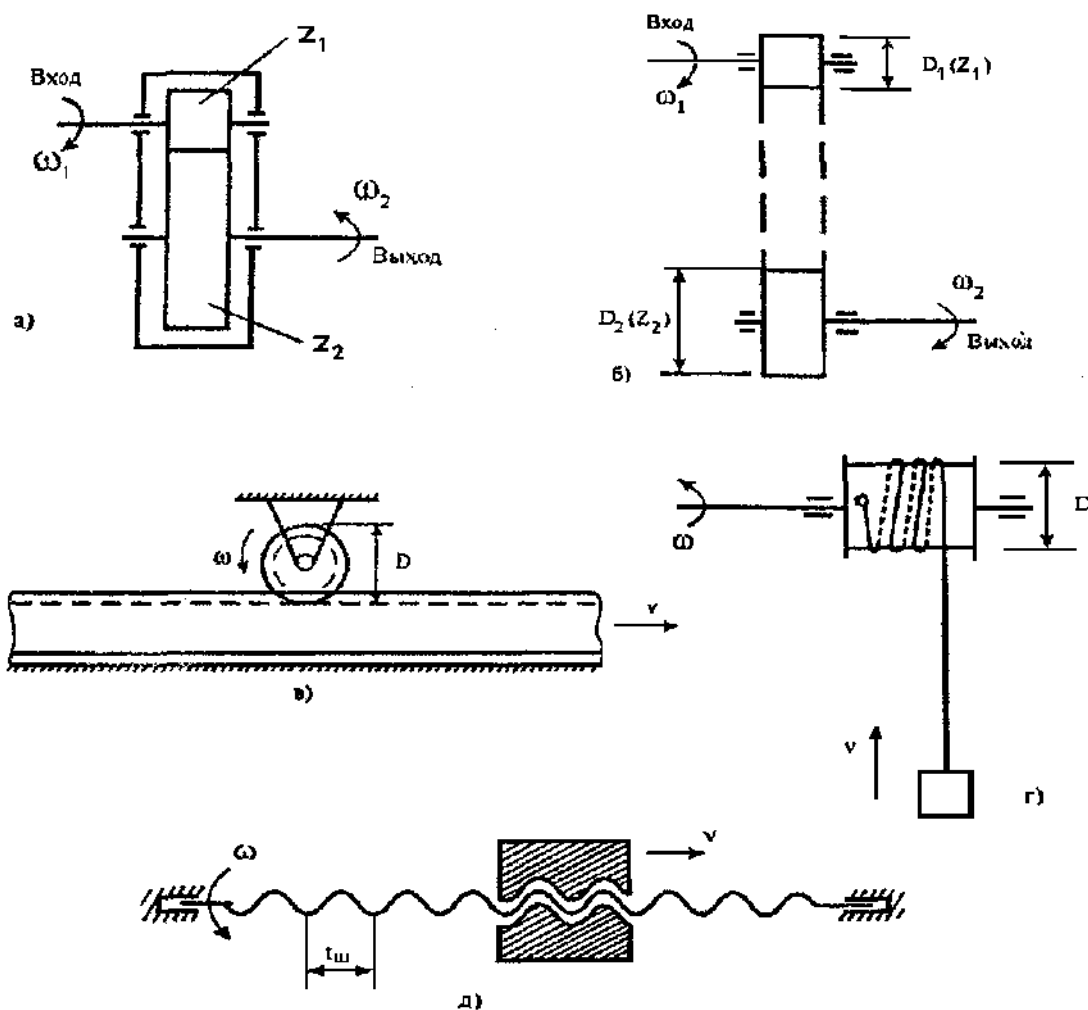


Рис. 1.1. Кинематические звенья: а) редуктор; б) ременная (цепная) передача; в) передача «зубчатое колесо – рейка»; г) передача «канат (трос) – барабан (шкив)»; д) передача «винт – гайка»

По конструктивному исполнению различают следующие виды ПМ (рис. 1.1, 1.2):

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

Дадим краткую характеристику этим ПМ.

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

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** :

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

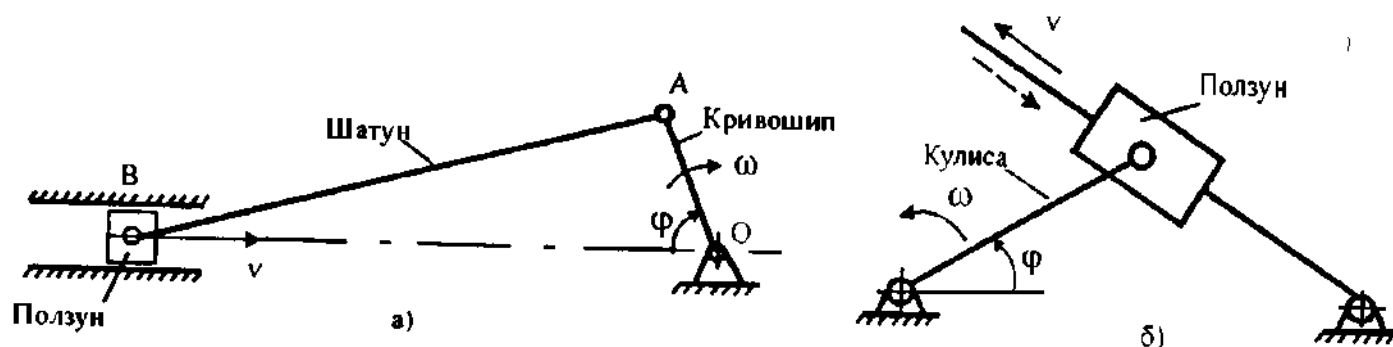


Рис. 1.2. Рычажные передаточные механизмы:

а) кривошипно-шатунный, б) кулисный.

Кривошипно-шатунный механизм (рис. 1.2, а) служит для преобразования вращательного движения кривошипа в возвратно-поступательное движение ползуна или, наоборот, возвратно-поступательного движения ползуна во вращательное движение кривошипа.

Кулисный механизм (рис. 1.2, б) предназначен для преобразования качательного движения кулисы в поступательное движение ползуна или, наоборот, поступательного движения ползуна в качательное движение кулисы.

Рычажные механизмы (рис. 1.2) характеризуются радиусом приведения ρ , являющимся функцией угла поворота φ кривошипа или кулисы.

1.2. 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 элементов. Обычно в качестве такого первоначального элемента принимают вал двигателя. Тогда расчетная схема механизма многомассовой механической части ЭП (рис.1.3, а и рис.1.4, а) сводится к одному обобщенному жесткому механическому звену (рис.1.3, б и рис.1.4, 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).

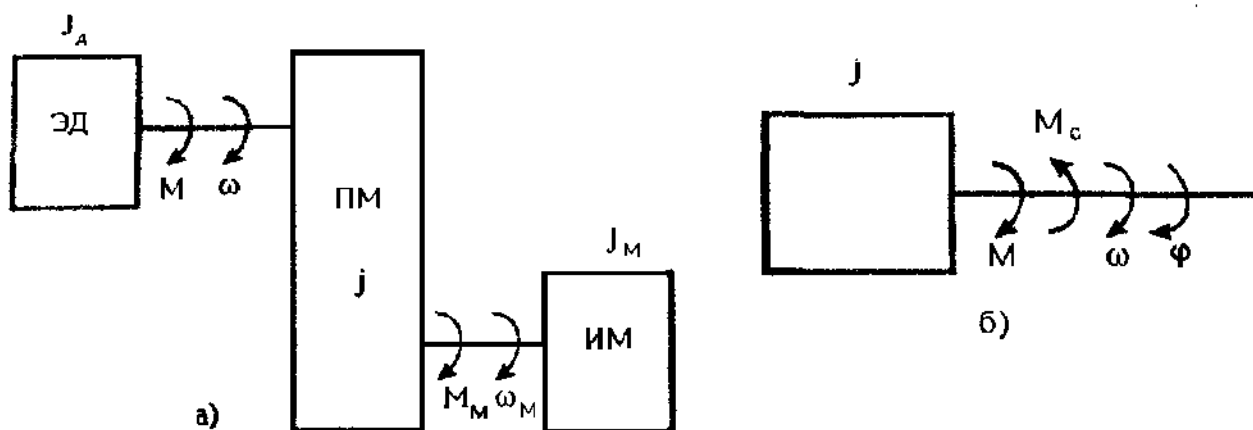


Рис. 1.3. Приведение многомассовой системы к одномассовой при вращательном движении механизма

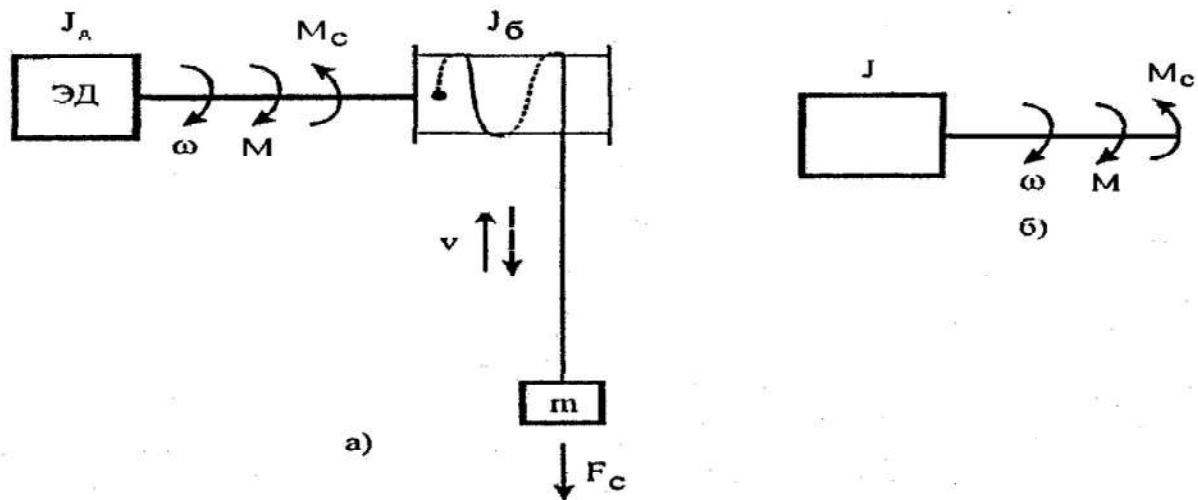


Рис. 1.4. Приведение многомассовой системы к одномассовой при поступательном движении механизма

1.3. Приведение моментов сопротивления и сил, моментов инерции и масс к валу электродвигателя

Сначала примем допущение, что передаточный механизм ПМ (рис.1.3, а) идеальный, т.е. не имеет потерь энергии, не обладает массой и осуществляет только количественное преобразование механической энергии от двигателя к производственному механизму. Учет потерь в ПМ рассмотрим несколько позже.

Приведение статических моментов сопротивления к валу осуществляется из условия равенства передаваемой мощности на любом валу (рис.1.3, а):

$$M_c \omega = M_m \omega_m .$$

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

$$M_c = M_m(\omega_m / \omega) = M_m / j , \quad (1.1)$$

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.

При поступательном движении ИМ (рис.1.4, 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.1.4, б).

Тогда из этого равенства получаем:

$$M_c = F_c \cdot V / \omega = F_c \cdot \rho, \quad (1.2)$$

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.1.3):

$$J \omega^2 / 2 = J_d \omega^2 / 2 + J_m \omega_m^2 / 2,$$

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

$$J = J_d + J_m (\omega_m / \omega)^2 = J_d + J_m / j^2 = J_d + J_m',$$

где J_m' – 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:

$$J_m' = J_m / j^2.$$

Для поступательного движения ИМ (рис.1.4) приведение поступательно движущихся масс к вращательному движению вала ЭД осуществляется на основании равенства кинетических энергий приведенной и не приведенной систем:

$$J \omega^2 / 2 = (J_d + J_6) \omega^2 / 2 + m V^2 / 2,$$

из которого получаем, что

$$J = J_d + J_6 + m (V / \omega)^2 = J_d + J_6 + m \rho^2 = J_d + J_6 + J_m',$$

где $J_m' = m \rho^2$,

J_m' – приведенный к валу ЭД момент инерции поступательно движущейся массы m .

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

1.4. Учет потерь в передачах

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

Механическая часть ЭП (рис.1.5) 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 $\omega_{\text{м}}$ и приложенным моментом сопротивления $M_{\text{м}}$. 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 $M_{\text{м}}$ 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:

$$\omega M_{\text{с}}^{\uparrow} \eta_{\text{п}} = M_{\text{м}} \omega_{\text{м}} \quad \text{для двигательного режима,}$$

$$M_{\text{м}} \omega_{\text{м}} \eta_{\text{п}} = M_{\text{с}}^{\downarrow} \omega \quad \text{для тормозного режима,}$$

из которых следует, что:

$$M_{\text{с}}^{\uparrow} = (M_{\text{м}} \omega_{\text{м}}) / (\omega \eta_{\text{п}}) = M_{\text{м}} / (j \eta_{\text{п}}) = M_{\text{м}}' / \eta_{\text{п}},$$

$$M_{\text{с}}^{\downarrow} = M_{\text{м}} \omega_{\text{м}} \eta_{\text{п}} / \omega = M_{\text{м}} \eta_{\text{п}} / j = M_{\text{м}}' \eta_{\text{п}},$$

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

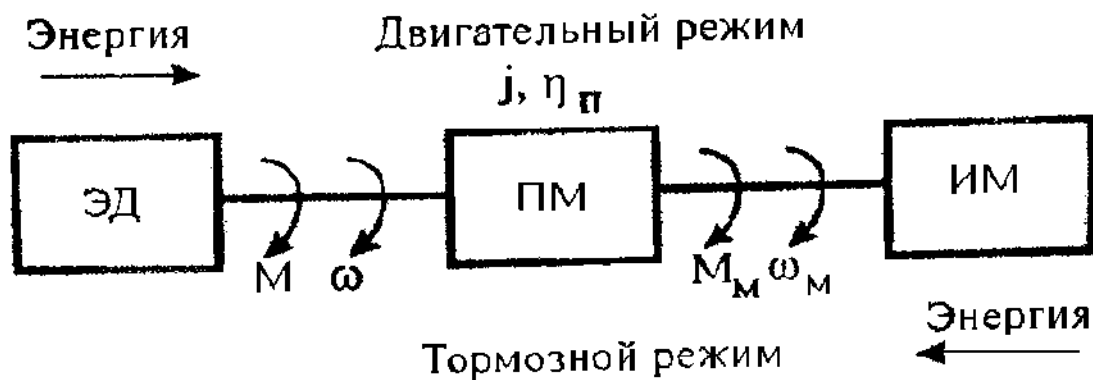


Рис. 1.5. Механическая часть электропривода

Следовательно, для учета потерь в ПМ при приведении статических моментов и сил сопротивления ИМ в формулах (1.1) и (1.2) необходимо в двигательном режиме работы ЭП учесть КПД $\eta_{\text{п}}$ в знаменателе, а в тормозном режиме – в числителе, т.е.:

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

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

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

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

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

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

1.5. 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.

$$M = M_c \tag{1.3}$$

Такой режим работы электропривода называется *установившимся*.

При нарушении равенства (1.3) возникает динамический момент $M_{\text{дин}}$, характеризующий переходный режим. При этом уравнение равновесия моментов имеет вид:

$$M = M_c + M_{\text{дин}} , \tag{1.4}$$

где M – вращающий момент электродвигателя, Н·м;

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

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

Рассмотрим подробнее отдельные составляющие уравнения (1.4).

Вращающий (или *электромагнитный*) момент электродвигателя M создается в результате взаимодействия магнитного потока с током, протекающим по ротору или якорю электродвигателя. Момент на валу электродвигателя M_v отличается от электромагнитного момента M на величину момента потерь холостого хода M_0 , определяемого трением в подшипниках, щеток о коллектор или кольца,

вентиляторными потерями и потерями в стали. Момент на валу электродвигателя зависит от режима работы электропривода. В двигательном режиме момент M_0 уменьшает момент на валу, а в тормозном режиме увеличивает его. Поэтому

$$M_{\text{в}} = M \pm M_0 .$$

Величина M_0 составляет несколько процентов от номинального момента $M_{\text{н}}$ 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 $M_{\text{с}}$ состоит из двух слагаемых: момента полезной работы (например, подъем груза) и момента трения $M_{\text{тр}}$, 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:

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} ,$$

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

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

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

t – время, с.

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

$$M = M_{\text{с}} + J \frac{d\omega}{dt} \quad \text{или} \quad M - M_{\text{с}} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.5)$$

Знак перед $M_{\text{дин}}$, а следовательно, и перед $d\omega / dt$ зависит от соотношения величин и знаков M и $M_{\text{с}}$. При $M > M_{\text{с}}$ привод ускоряется, $d\omega / dt > 0$, $M_{\text{дин}}$ – положительная величина. При $M < M_{\text{с}}$ привод замедляется, $d\omega / dt < 0$, $M_{\text{дин}}$ – отрицательная величина. Когда $M = M_{\text{с}}$, 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 (1.5) с учетом режимов работы электродвигателя и знаков моментов можно записать так:

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

Раздел 2. Электромеханические свойства электродвигателей

2.1. Электромеханические свойства двигателей постоянного тока

Схемы электродвигателей постоянного тока. Электродвигатели постоянного тока могут иметь независимое, параллельное, последовательное или смешанное возбуждение (рис 2.1).

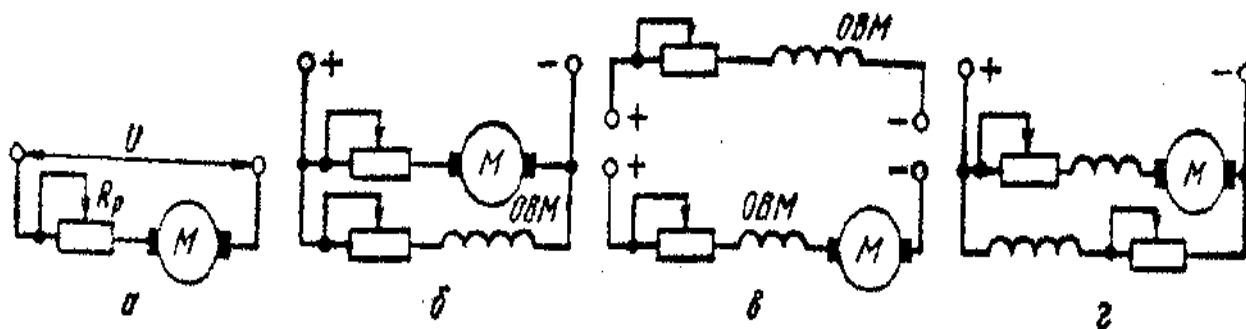


Рис. 2.1. Схемы электродвигателей постоянного тока независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения (верхняя часть схемы «в» принадлежит схеме «а»)

Якорь M и обмотка возбуждения $ОВМ$ двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) обычно питаются от различных источников, что позволяет независимо регулировать напряжение U на якоре и ток возбуждения в обмотке возбуждения и выполнять обмотки якоря и возбуждения на разные номинальные напряжения.

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

Уравнения электромеханической и механической характеристик ДПТ НВ. Для вывода уравнений электромеханической $\omega = f(I)$ и механической $\omega = f(M)$ характеристик ДПТ НВ воспользуемся основной схемой его включения, представленной на рисунке 2.2 со следующими обозначениями: I , I_b – токи в цепях

якоря и возбуждения (А); E – ЭДС вращения якоря (В); ω , M – угловая скорость (рад/с) и момент (Н·м) двигателя; $R_{\text{я}}$ – сопротивление якоря (Ом). На схеме показаны добавочные резисторы в цепях обмоток якоря $R_{\text{д}}$ и возбуждения $R_{\text{р}}$; направления тока якоря I и ЭДС E соответствуют *двигательному* режиму работы.

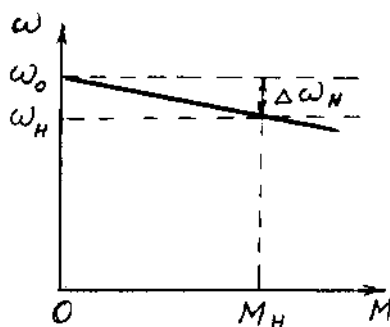
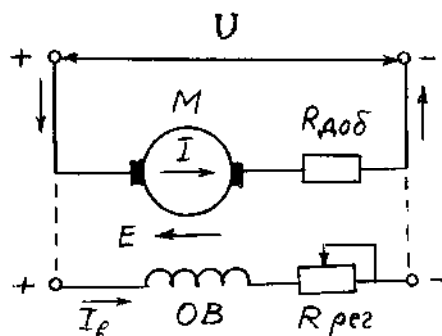


Рис. 2.2. Основная схема включения ДПТ НВ

Рис. 2.3. Естественная механическая характеристика ДПТ НВ

Уравнения напряжения, ЭДС и момента двигателя имеют вид:

$$U = E + IR ; \quad (2.1)$$

$$E = k\Phi \omega ; \quad (2.2)$$

$$M = k\Phi I , \quad (2.3)$$

где $R = R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$ – полное сопротивление цепи якоря, Ом;

Φ – магнитный поток, Вб;

U – подводимое к якорю напряжение, В;

k – конструктивный коэффициент двигателя.

Подставив (2.2) в (2.1), получаем формулу для *электрохимической* $\omega = f(I)$ характеристики:

$$\omega = (U - IR)/(k \Phi) . \quad (2.4)$$

Формула для *механической* $\omega = f(M)$ характеристики получаем из (2.4) с использованием выражения (2.3):

$$\omega = U/(k \Phi) - M R/(k \Phi)^2 . \quad (2.5)$$

Если в ДПТ НВ магнитный поток поддерживается постоянным, то $k\Phi = c = \text{const}$ и уравнения (2.4) и (2.5) примут вид:

$$\omega = (U - IR)/c ; \quad (2.6)$$

$$\omega = U/c - M R/c^2 . \quad (2.7)$$

Из этих уравнений видно, что электромеханическая и механическая характеристики ДПТ НВ представляют собой линейные зависимости угловой скорости ω от тока и момента (механическая характеристика показана на рисунке 2.3).

Уравнения (2.6) и (2.7) можно записать в сокращённой форме:

$$\omega = \omega_0 - \Delta \omega , \quad (2.8)$$

где ω_0 - скорость идеального холостого хода двигателя; $\omega_0 = U/c$;

$\Delta \omega$ - изменение скорости (называемое **падением скорости** или **перепадом скорости**) относительно скорости идеального холостого хода;

$$\Delta \omega = IR/c = M R/c^2 .$$

Механические характеристики ДПТ НВ разделяют на естественные и искусственные. **Естественной** называется характеристика, соответствующая нормальной схеме включения электродвигателя при номинальном напряжении якоря ($U = U_n$), отсутствии добавочных сопротивлений в якорной цепи ($R_d = 0$) и номинальном магнитном потоке возбуждения ($\Phi = \Phi_n$). Механические характеристики, получаемые при условиях, отличных от номинальных, называются **искусственными**. Искусственные механические характеристики, получаемые при включении в якорную цепь добавочных сопротивлений, называются **реостатными**.

Способы регулирования скорости ДПТ НВ. Полученные уравнения (2.4) и (2.5) позволяют назвать основные способы регулирования скорости двигателя и получения искусственных механических характеристик ДПТ НВ:

- 1) изменением сопротивления резистора в якорной цепи R_d ;
- 2) изменение магнитного потока Φ ;
- 3) изменение подводимого к якорю напряжения U .

Регулирование скорости ДПТ НВ с помощью резисторов в цепи якоря. Этот способ применяется при кратковременной работе на пониженной скорости и невысоких требованиях к показателям качества регулирования скорости (диапазон не превышает 3, потери мощности и соответственно расход электроэнергии оказываются существенными), отличаясь в то же время простотой реализации.

Из (4.8) видно, что скорость ω_0 не зависит от величины R_d , а наклон искусственных механических характеристик тем больше, чем больше R_d . Поэтому семейство искусственных механических характеристик (рис. 2.4.) представляет собой совокупность прямых линий различного наклона (или различной *жёсткости*), проходящих через одну и ту же точку на оси скорости с ординатой ω_0 . Верхняя характеристика является естественной ($R_d = 0$).

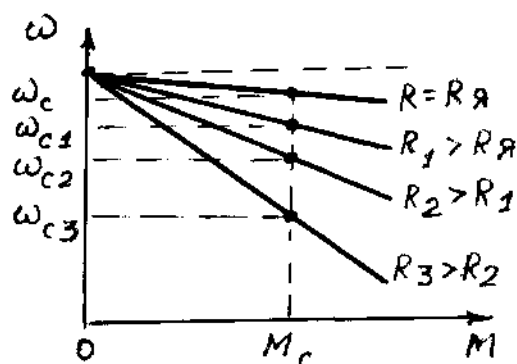


Рис. 2.4. Семейство реостатных механических характеристик ДПТ НВ

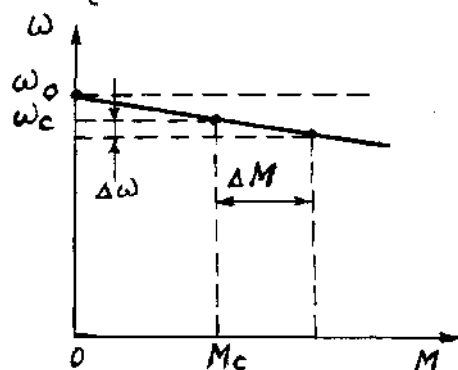


Рис. 2.5. К пояснению жёсткости механической характеристики ДПТ НВ

Жёсткость механической характеристики β - это отношение разности моментов ΔM электродвигателя к соответствующей разности угловых скоростей $\Delta \omega$ (рис. 2.5), т.е.

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

Обычно на рабочем участке механическая характеристика двигателя имеет отрицательное значение жёсткости ($\beta < 0$). Линейная механическая характеристика имеет постоянную жёсткость ($\beta = \text{const}$), а нелинейная - равную первой производной от момента по скорости ($\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega}$).

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

Так как механические характеристики ДПТНВ прямолинейны, то для их построения достаточно иметь две точки: 1) $\omega = \omega_0$ и $M = 0$; 2) $\omega = \omega_{\text{н}}$ (или $\omega = \omega_{\text{н.р}}$) и $M = M_{\text{н}}$.

Регулирование скорости ДПТ НВ изменением магнитного потока. Этот способ регулирования скорости характеризуется простотой реализации и экономичностью, так как регулирование осуществляется в относительно маломощной цепи возбуждения двигателя и не сопровождается большими потерями

мощности. Магнитный поток при этом способе регулирования скорости обычно уменьшается путём снижения тока возбуждения ниже номинального. Для регулирования тока возбуждения используется включение в цепь возбуждения добавочного резистора или питание обмотки возбуждения от управляемого выпрямителя.

В соответствии с (2.5) уменьшение магнитного потока приводит к увеличению скорости идеального холостого хода ω_0 (рис 2.6).

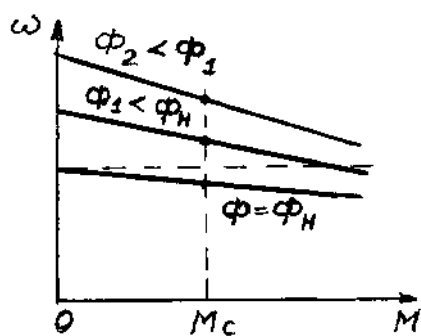


Рис. 2.6. Механические характеристики ДПТ НВ

Механические характеристики ДПТ НВ

при изменении магнитного потока возбуждения
напряжения на якоре

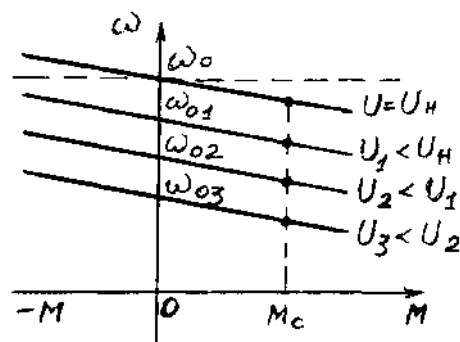


Рис. 2.7.

при изменении

Показатели данного способа регулирования скорости таковы: диапазон регулирования составляет 3-4; направление регулирования скорости вверх от естественной характеристики; плавность регулирования скорости определяется плавностью регулирования тока возбуждения; стабильность скорости достаточно высокая, хотя она и снижается при уменьшении магнитного потока; способ экономичен, так как потери мощности незначительные, а реализация его не требует больших затрат.

Регулирование скорости ДПТ НВ изменением напряжения якоря. Этот способ используется при высоких требованиях к показателям его качества и является основным при создании автоматизированных электропроводов постоянного тока. Реализация данного способа предусматривает питание якоря двигателя от управляемого выпрямителя.

Из (2.8) видно, что при изменении U пропорционально изменяется скорость идеального холостого хода ω_0 , а искусственные механические характеристики (рис 2.7) параллельны естественной и располагаются ниже нее (регулирование скорости осуществляется вниз от номинальной).

Тормозные режимы ДПТ НВ.

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 (рис. 2.8). Схема двигателя при рекуперативном торможении не изменяется.

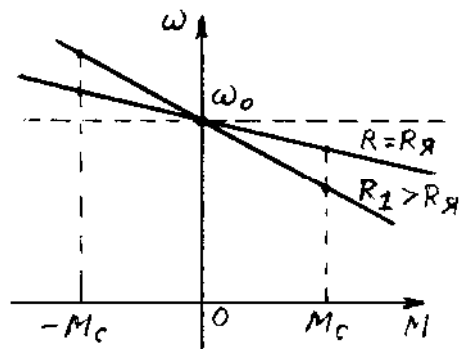


Рис. 2.8. Механические характеристики ДПТ НВ
Механические характеристики ДПТ НВ
при рекуперативном торможении

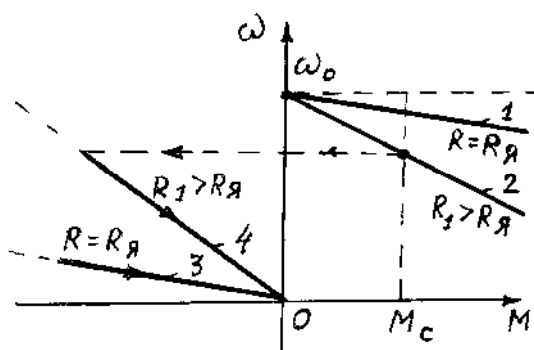


Рис. 2.9.
при динамическом
торможении

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 (рис. 2.9).

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 (рис. 2.10); 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. В точке 3 двигатель останавливается и его следует отключить от сети, чтобы избежать перехода в двигательный режим с вращением в обратном направлении.

Пуск ДПТ НВ. Пуск двигателя обычно осуществляется с помощью регулируемого пускового резистора (реостата), включаемого в цепь якоря (рис 2.11). Пуск вначале происходит по искусственной характеристике 3 с резисторами $R_{д1}$ и $R_{д2}$ в цепи якоря. В момент включения двигателя его ток и момент ограничиваются до заданного (допустимого) уровня $I_1 = I_{доп}$ и $M_1 = M_{доп}$. По мере увеличения скорости и соответственно этих двигателя ток в якоря сокращается и при скорости ω_1

резистор $R_{д1}$ закорачивается контактом контактора $K1$. Двигатель переходит на характеристику 2, при этом броски тока и момента происходят до заданного уровня. При скорости ω_2 закорачивается резистор $R_{д2}$ контактом $K2$ и двигатель переходит на естественную характеристику 1.

Совокупность двух или более искусственных характеристик используемых при пуске двигателя, называется **пусковой диаграммой**.

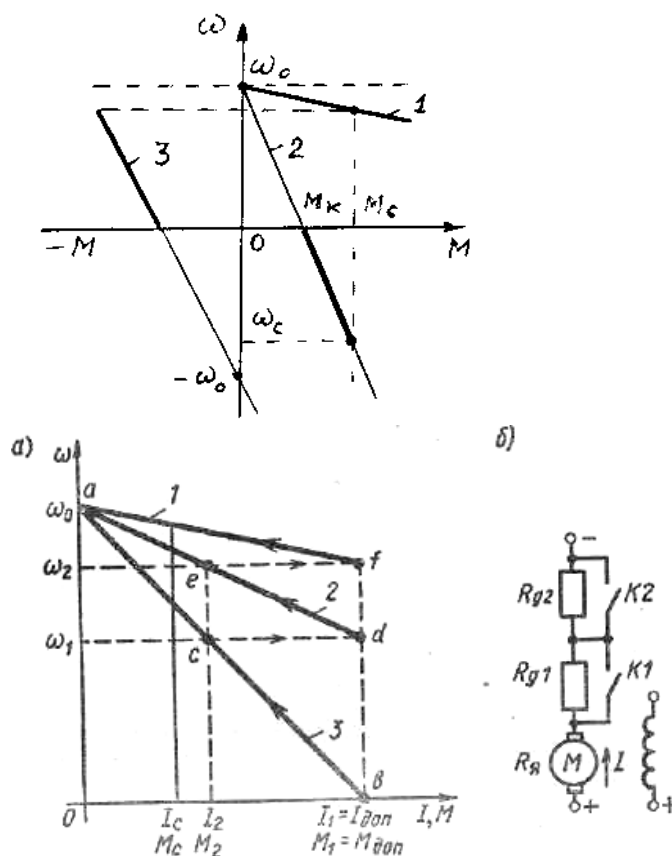


Рис. 2.10. Механические характеристики ДПТ НВ
НВ: а) пусковая диаграмма,
при торможении противовключением
включения якорной цепи

Рис. 2.11. Пуск ДПТ
б) схема

В двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением (ДПТ ПВ) ток якоря одновременно является и током возбуждения. Поэтому магнитный поток возбуждения растет с увеличением нагрузки, вследствие чего угловая скорость снижается согласно уравнению (2) и механическая характеристика двигателя будет мягкой (рис. 2.12). Благодаря этому ДПТ ПВ 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. 2.13).

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

Динамическое торможение

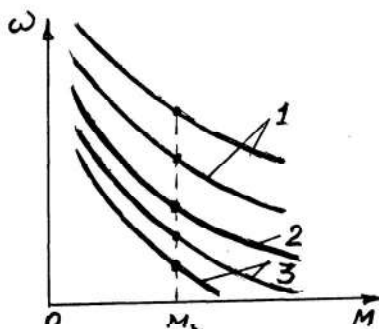


Рис. 2.13. Механические
регулирующие скорости: 1 –
мотки возбуждения, 2 –
истика, 3 – реостатные

Торможение противовключением

Системы регулируемого электропривода постоянного тока

В промышленности раньше широко применялась электромашинная система регулируемого электропривода постоянного тока, называемая системой генератор – двигатель (Г – Д), в которой регулирование скорости осуществляется изменением

напряжения на зажимах генератора, питающего двигатель. Напряжение генератора изменяют с помощью реостата в цепи возбуждения генератора.

В отдельных случаях для привода кузнечно-штамповочных машин используют электромашинные усилители (ЭМУ) с поперечным полем, которые применяются в системе Г – Д в качестве генератора.

В последние годы широкое применение в промышленности нашли управляемые кремниевые выпрямители – *тиристоры*.

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.

Управление тиристором, т.е. включение, осуществляется с помощью управляющего электрода УЭ (рис. 2.14), 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. 2.14, *a*) тиристор запирается. Запереть тиристор с помощью управляющего электрода невозможно, т.е. тиристор в отличие от транзистора является прибором полууправляемым.

С помощью фазосдвигающего устройства (ФСУ) схемы управления можно изменять фазу (момент) подачи отпирающего импульса (рис. 2.14, г) относительно точки естественной коммутации вентиля, т.е. можно изменять угол регулирования α .

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

В обобщенном виде схема тиристорного электропривода с трехфазным преобразователем представлена на рис. 2.15

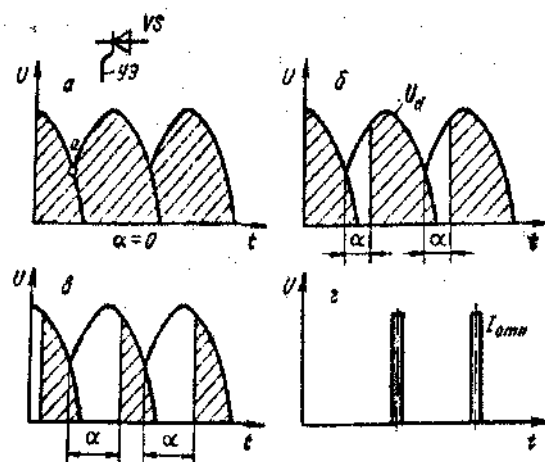


Рис. 2.14. Графики регулирования выходного
Обобщенная схема тиристорного
напряжения тиристорного выпрямителя

$VS3$ - тиристоры; L_ϕ , R_ϕ -

сопротивление фильтра;

E_m - ЭДС двигателя

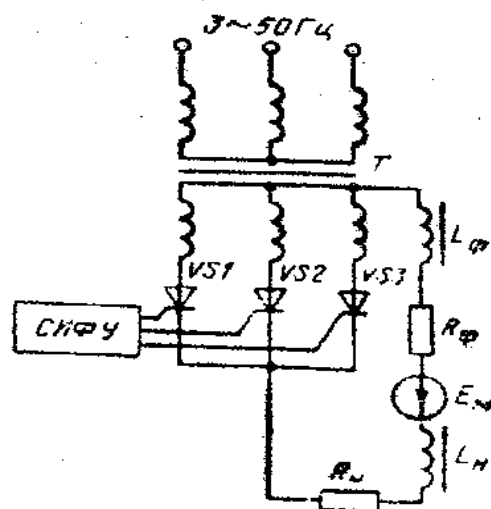


Рис. 2.15.

электропривода: $VS1$ -

индуктивность и активное

L_n , R_n - то же нагрузки;

2.2. Электромеханические свойства асинхронных электродвигателей

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

Схема асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором приведена на рисунке 2.16, а, с фазным ротором — на рис. 2.16, в, а соответствующие им механические характеристики в двигательном режиме — на рис. 2.16, б и г.

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:

$$M = P/\omega;$$

$$\omega = \pi n/30.$$

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:

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

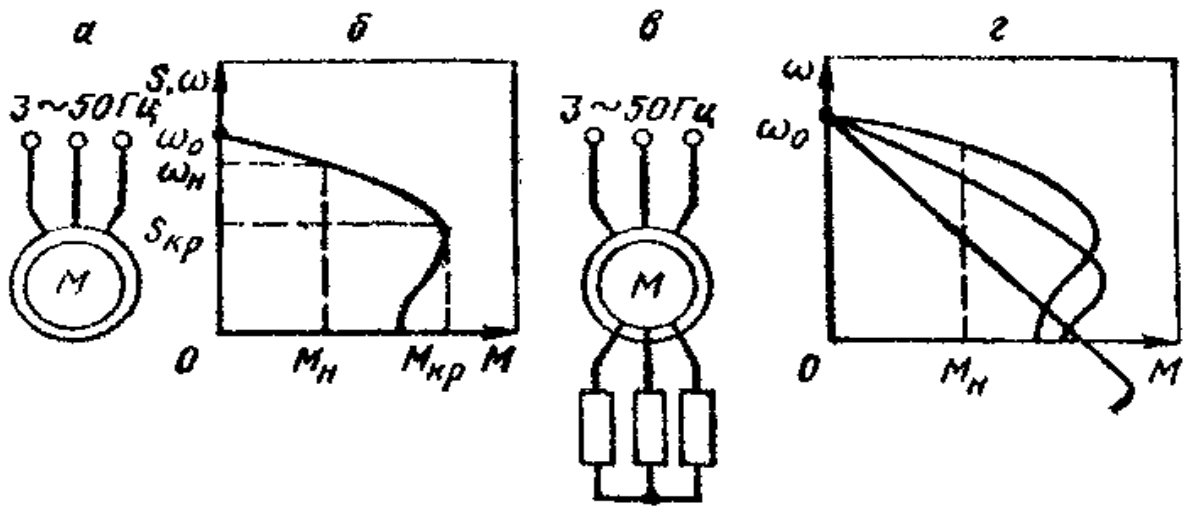


Рис. 2.16. Схемы и механические характеристики асинхронных двигателей

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).

Принцип действия асинхронного электродвигателя заключается в следующем. Трехфазный ток, протекающий по обмотке статора, создает вращающееся магнитное поле с частотой вращения n_0 (или угловой скоростью ω_0). Это поле, пересекая обмотки статора и ротора, индуцирует в них ЭДС. ЭДС статора и падение напряжения в обмотке статора уравнивают приложенное напряжение питающей сети. ЭДС ротора создает в замкнутых проводниках ротора ток, который взаимодействует с полем статора и приводит к созданию электромагнитного момента M_z , действующего по направлению вращения поля и приводящего во вращение ротор (если M_z больше M_c).

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 сопротивление 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 $\dot{U}I$:

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

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 (упрощенная формула Клосса):

$$M = 2M_k / (s / s_k + s_k / s).$$

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 $\lambda_n = M_n / M_H$ (M_n — пусковой момент). По этим данным можно определить значение всех величин, необходимых для расчета и определения механических характеристик из выражений:

$$\omega_H = \pi n_H / 30, \quad \omega_0 = \pi n_0 / 30, \quad M_H = P_H / \omega_H; \quad M_k = \lambda_k M_H; \quad S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0};$$

$$S_k = S_H (\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1}).$$

На рисунке 2.16, б и г изображены механические характеристики асинхронного электродвигателя, из которых видно, что верхний (рабочий) участок естественной характеристики обладает большой жесткостью 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.

Активное сопротивление фазы обмотки ротора можно определить по формуле:

$$R_2 = (E_{2H} s_H) / (\sqrt{3} I_{2H}),$$

где E_{2H} , I_{2H} — соответственно номинальная фазная Э.Д.С. и номинальный ток обмотки ротора (приводятся в каталоге).

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

Решение.

$$1. M_H = P_H / \omega_H = P_H / (\pi n_H / 30) = 30000 / (\pi \cdot 1460 / 30) = 205 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$2. M_k = \lambda_k M_H = 2 \cdot 205 = 410 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$3. S_H = (n_0 - n_H) / n_0 = (1500 - 1460) / 1500 = 0,0266.$$

$$4. S_k = S_H (\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1}) = 0,0266 (2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0,1.$$

5. Уравнение механической характеристики $M = 2M_k / (s/s_k + s_k/s) = 820 / (S/0,1 + 0,1/S)$.

6. Задаваясь значениями s для двигательного режима от $s = 0$ до $s = 1$, рассчитываем соответствующие им значения момента M (табл. 2.1) и строим характеристику (рис. 2.17).

Таблица 2.1

Расчетные данные для построения естественной механической характеристики АД в двигательном режиме работы

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

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. 2.18, линии с двумя засечками).

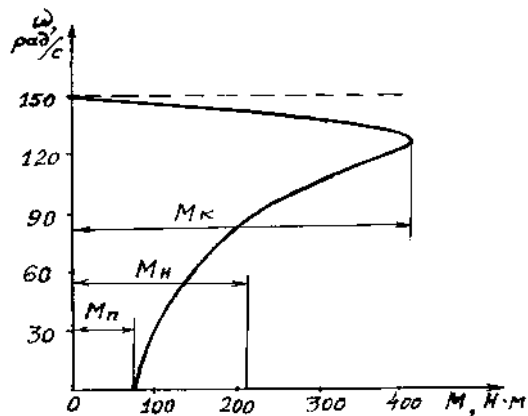


Рис. 2.17. Естественная механическая
механические
характеристика АД
асинхронной машины

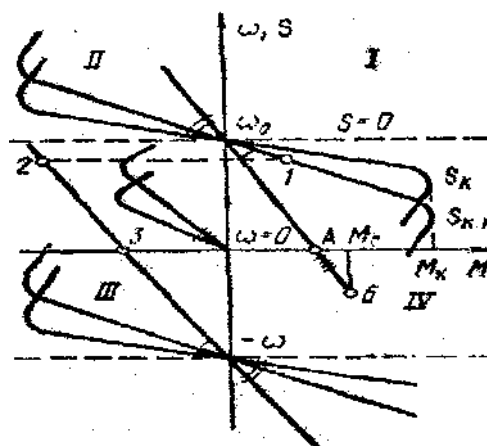


Рис. 2.18. Совмещенные
характеристики

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. 2.18, линии с четырьмя 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. 2.18 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. 2.18 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. 2.18 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.

В случае если питающая сеть недостаточно мощная, применяется пуск асинхронных двигателей при пониженном напряжении с помощью реактора L или автотрансформатора (рис. 2.19). 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.

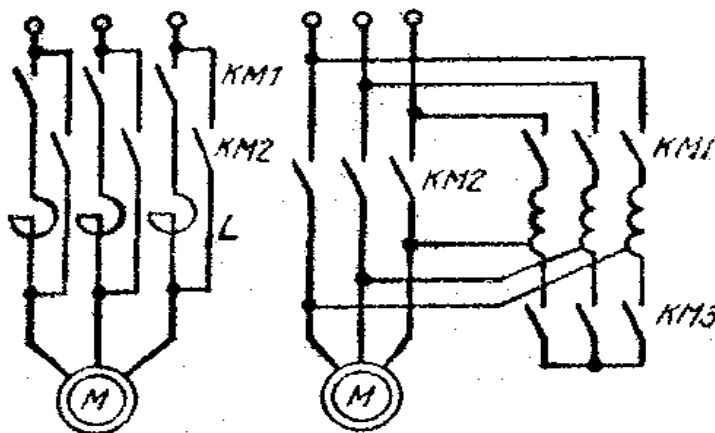


Рис. 2.19. Схемы пуска при пониженном напряжении

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

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

и формулы угловой скорости вращения поля статора

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

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети; $R_{2\Sigma}$ – приведенное к статору сопротивление роторной цепи; R_1 – сопротивление обмотки статора; f_1 – частота

сети; p - число пар полюсов; s - скольжение; X_k - реактивное сопротивление короткого замыкания.

Изменением числа пар полюсов обеспечивается ступенчатое регулирование синхронной угловой скорости двигателя ω_0 . Этот способ регулирования скорости может быть реализован только при использовании специальных АД, получивших название многоскоростных. Особенность этих АД состоит в том, что их каждая фаза статорной обмотки имеет две одинаковые секции (полуобмотки). За счет разных схем их соединения можно изменять число пар полюсов p АД. Ротор многоскоростных АД обычно выполняется короткозамкнутым.

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

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

Рассматриваемый способ регулирования скорости АД характеризуется рядом положительных показателей, что определяет широкое его применение в регулируемом электроприводе переменного тока. К ним в первую очередь следует отнести экономичность, так как регулирование скорости не сопровождается выделением в роторной цепи дополнительных потерь энергии, вызывающих излишний нагрев АД и ухудшающих его КПД. Недостатком этого способа является ступенчатость изменения скорости двигателя и относительно небольшой диапазон ее регулирования, не превышающий обычно 6 – 8.

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

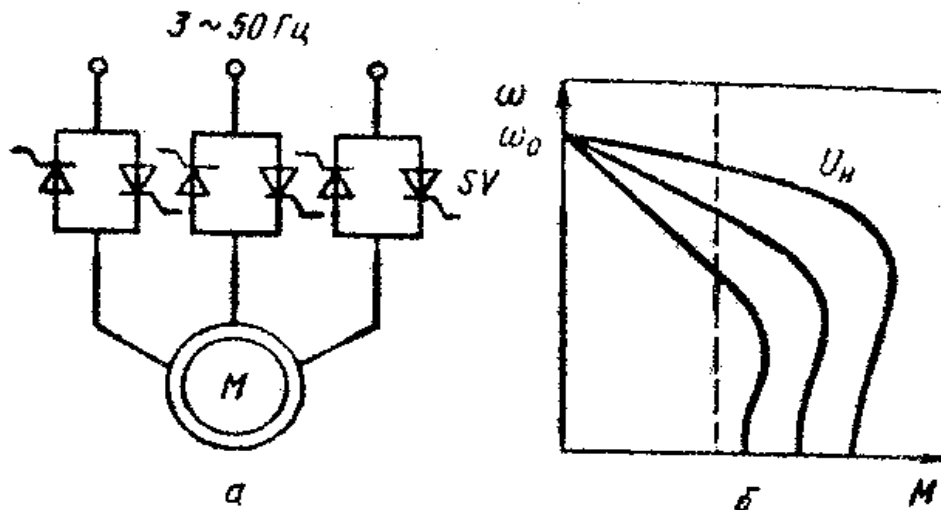


Рис. 2.20. Бесконтактное регулирование напряжения асинхронного двигателя

Регулирование скорости асинхронного привода изменением питающего напряжения осуществляется путем включения по встречно-параллельной схеме в каждую фазу статора двух тиристоров (рис. 2.20, а). Изменяя угол регулирования тиристоров, можно плавно регулировать величину подводимого к статору напряжения. При этом снижается критический момент двигателя и увеличивается наклон механических характеристик, так как вращающий момент двигателя пропорционален квадрату напряжения фазы статора (рис. 2.20, б). Практически этот метод регулирования находит применение лишь для двигателей с фазным ротором в замкнутых системах управления с тиристорными регуляторами напряжения.

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

На рис 2.21 представлена схема ТПЧ для регулируемого асинхронного электропривода. Преобразователь частоты состоит из двух основных тиристорных блоков: управляемого выпрямителя 1 и управляемого инвертора 2 со своими блоками управления соответственно 3 и 4. Напряжение сети частотой 50 Гц подаётся на вход управляемого выпрямителя, преобразующего переменное напряжение в постоянное, регулируемое по величине с помощью блока управления 3. Выпрямленное и регулируемое напряжение далее поступает на вход инвертора 2, который преобразует это напряжение в трёхфазное напряжение регулируемой частоты, подаваемое затем на обмотку статора АД с короткозамкнутым ротором. Частота выходного напряжения инвертора регулируется блоком 4 в функции сигнала управления.

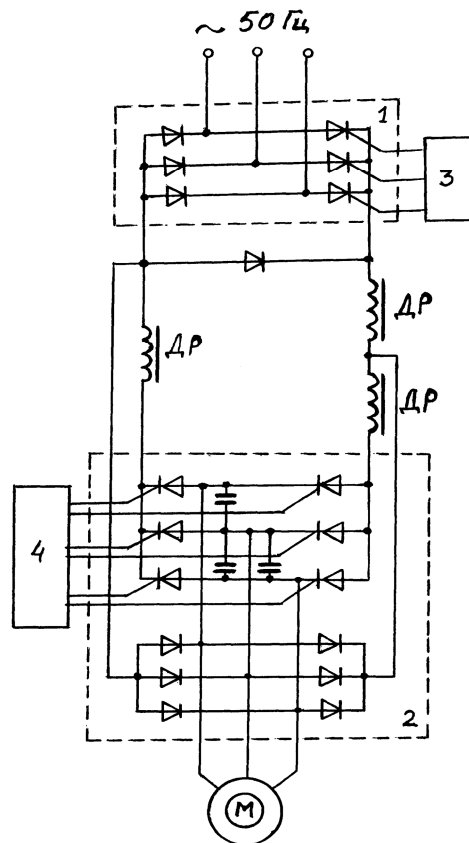


Рис. 2.21. Схема ТПЧ для регулируемого асинхронного электропривода

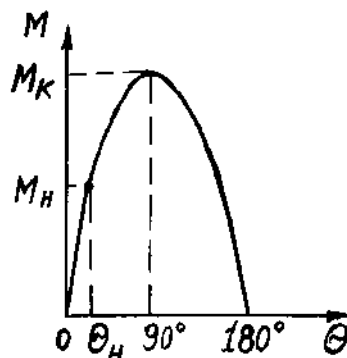


Рис. 2.22.

2.3. 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.

Электромагнитный момент синхронного двигателя $M = M_{\max} \sin\theta$ (рис. 2.22).

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 $\theta = 20-30^\circ$. Поэтому перегрузочная способность синхронного двигателя $\lambda_k = M_{\text{макс}}/M_n = 2-3$.

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.

Схема синхронного двигателя приведена на рис. 2.23, а. На роторе расположены две обмотки: короткозамкнутая (пусковая) *ОП* и возбуждения постоянного тока *ОВ*. Обмотка возбуждения двигателя при пуске замыкается на разрядный резистор R_p , который предохраняет ее от пробоя. При скорости, близкой к синхронной ($\omega \geq 0,95\omega_0$), обмотка возбуждения автоматически подключается к источнику постоянного тока на полное напряжение (контакты *КМ* замыкаются). При этом двигатель входит в синхронизм. Для нормального вхождения в синхронизм необходимо, чтобы входной момент был больше статического момента на валу $M_{\text{вх}} > M_c$.

Механическая характеристика синхронного двигателя (рис. 2.23, 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 относительно полюсов вращающегося поля статора (или угол сдвига вектора напряжения статора относительно вектора ЭДС, индуцированной в обмотке статора полем ротора). *Зависимость момента двигателя M от угла θ называется угловой характеристикой синхронного двигателя, которая представляет собой синусоиду $M = M_{\text{макс}} \sin\theta$.*

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.

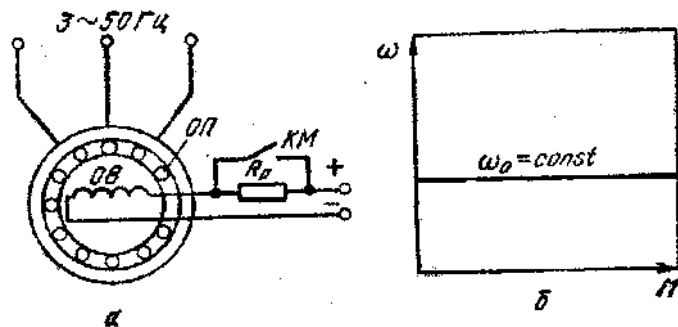


Рис. 2.23. Схема синхронного двигателя

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.

Раздел 3. Аппаратура и схемы управления электроприводами

3.1. Аппараты ручного управления

Рубильники. В схемах электрооборудования КШМ простейшим аппаратом ручного управления является рубильник. Он используется для снятия напряжения с электрической схемы электрооборудования и создания видимого разрыва электрической цепи при осмотрах, ремонтах или длительных перерывах в работе. Такие рубильники называются *вводными*, а рабочий ток электродвигателя разрывают обычно другие аппараты. Чтобы ножи отключенного рубильника не находились под напряжением и не представляли опасности при случайном к ним прикосновении, провода от питающей сети присоединяют к контактным стойкам (губкам) рубильника, прикосновение к которым менее вероятно.

Иногда рубильники снабжаются боковой рукояткой, при этом сам рубильник помещают внутри шкафа с электроаппаратурой так, чтобы рукоятка находилась снаружи.

В цепях трехфазного переменного тока применяют трехполюсные рубильники (на 60, 100, 200 А напряжением до 500 В), а в цепях постоянного тока — двухполюсные.

Тумблер. Тумблеры применяют для включения ламп местного освещения и других потребителей малой мощности. **Тумблером** называют *однополюсный или двухполюсный выключатель с прижимным контактом, который управляется поворотным рычажком, воздействующим на спусковое устройство, пружина которого обеспечивает мгновенное переключение контактов при повороте рычажка*. Скорость срабатывания контактов тумблера не зависит от скорости

перемещения рычажка. Этим обеспечивается быстрый разрыв дуги между контактами.

Пакетный переключатель (выключатель). По сравнению с рубильником пакетный выключатель является более компактным, используется он в качестве вводного выключателя в электрических схемах КШМ, а также в цепях управления и сигнализации как переключатель. Пакетный выключатель состоит из нескольких примыкающих друг к другу однополюсных переключателей, управляемых поворотом общей оси. Однополюсные переключатели можно устанавливать так, что при повороте оси одни будут замыкать электрические цепи, а другие размыкать. Пакетный выключатель снабжен механизмом, обеспечивающим фиксацию и быстрое перемещение контактов, не зависящее от скорости поворота рукоятки выключателя. Их изготавливают на 4 – 250 А при напряжении до 380 В.

Контроллеры. В станкостроении для одновременного переключения большого числа электрических цепей применяют барабанные или кулачковые контроллеры (переключатели). Например, у контроллера барабанного типа на валу закреплены барабан из изолирующего материала, на поверхности которого расположены вертикальные медные сегменты, различным образом соединенные между собой. При повороте барабана рукояткой в разные положения через указанные медные сегменты замыкаются определенные так называемые *пальцы* (контакты), от которых в разные точки электрической схемы отходят провода.

3.2. Аппараты дистанционного автоматического управления

Контакторы. *Контактор – это электромагнитный сильноточный аппарат, предназначенный для дистанционного или автоматического управления (включения или отключения силовых электрических цепей).* Управление осуществляется по командному сигналу или оператора (при дистанционном управлении), или устройства автоматики (при автоматическом управлении). Контактор состоит (рис. 3.1) из главных (силовых, рабочих) подвижных и неподвижных контактов, электромагнита (сердечник с катушкой и якорь) и блок-контактов.

Принцип работы контактора заключается в следующем: при замыкании цепи катушки (через кнопку или замыкающий контакт реле автоматики) по ней протекает ток; сердечник электромагнита намагничивается и притягивает якорь, который поворачивается или прямолинейно перемещается, в результате чего замыкаются рабочие и блокировочные контакты. При отключении тока в цепи катушки контактор отключается (приходит в исходное состояние) под действием силы тяжести подвижных частей (или специальной пружины).

Катушка контактора имеет большое число витков тонкого провода, обладает значительным сопротивлением и ток, протекающий через нее, составляет менее 100 мА. Кнопочные станции управления контакторами размещают там, где удобно рабочему, а сами контакторы, имеющие при больших мощностях электропривода значительные размеры, устанавливают в подходящем месте на машине или в специальных шкафах.

Рабочие контакты для значительных токов изготавливают из красной меди, а для небольших токов – с накладками из сплава серебра с кадмием. Рабочие контакты могут сильно обгорать под действием электрической дуги, возникающей при отключении контактором электродвигателя. Для ускорения разрыва электрической

дуги (при значительных токах) применяют контакторы с дугогасительными катушками или с дугогасительными решетками (камерами). Дугогасительная катушка состоит из нескольких витков толстой проволоки, по которой проходит рабочий ток, и создаваемое магнитное поле замыкается через промежуток между рабочими контактами, где возникает электрическая дуга. Под влиянием этого магнитного поля дуга перемещается вверх, быстро удлиняется и рвется.

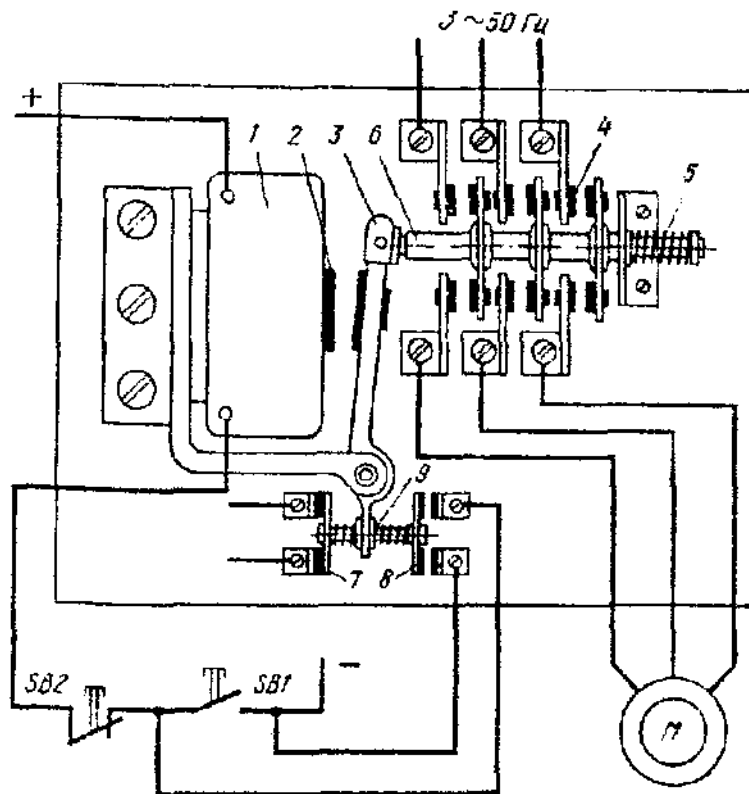


Рис. 3.1. Схема контактора

В дугогасительных камерах, которые располагаются над рабочими контактами, в стенках укреплены стальные пластины. При размыкании рабочих контактов дуга вытесняется внутрь искрогасительной решетки под действием магнитного поля, при этом пластины решетки отбирают у электрической дуги много тепла, газовая среда деионизируется, дуга между пластинами разбивается на части и очень быстро гаснет. Другой причиной (кроме магнитного поля, создаваемого самой дугой и заставляющего дугу двигаться в промежутки между пластинами) является поток нагретого дугой воздуха, проходящего через щели камеры наружу.

Для маломощных электродвигателей применяют контакторы без дугогасительных катушек и решеток.

Блокировочные контакты (блок-контакты) предназначены для работы в цепях управления с малыми токами и выполняются из сплава серебра и кадмия (привариваются к подвижным и неподвижным пластинам с пружинами — для надежного прижатия контактов).

Нормальным положением контактора (отключенным состоянием) называется положение его контактов (главных и блокировочных), когда в катушке электромагнита ток отсутствует. Контакт, который замыкается при включении контактора, называется **замыкающим**, а который размыкается при включении контактора — **размыкающим**. Таким образом, наименование контактов соответствует их действию при переходе контактора из отключенного

(нормального) состояния во включенное (или рабочее). управления контакторы допускают большее число включений (150-1200) в час.

Промежуточное реле. Электромагнитный малогабаритный аппарат, по устройству аналогичный прямоходовому контактору, но имеющий контакты, предназначенные для работы в цепях управления (с небольшими токами) называется **промежуточным реле**. Для его включения через катушку пропускают относительно небольшой ток, а его контакты могут пропускать значительно больший ток. Таким образом, промежуточное реле может работать в качестве усилителя командного импульса, недостаточного для воздействия на исполнительный орган. Если контакты промежуточного реле включаются в различные цепи, то в этом случае осуществляется *размножение* командного сигнала.

Кнопки. Для управления контакторами применяют кнопки, которые могут иметь различные контакты: *закрывающие* – для включения контактора; *размыкающие* – для его отключения. Широко распространены также кнопки с одним замыкающим и одним размыкающим контактами, а иногда применяют кнопки с двумя замыкающими контактами. *Нормальным* считают положение кнопки при отсутствии воздействия (нажатия) на нее. При нажатии на кнопку сжимается возвратная пружина, которая возвращает кнопку в исходное состояние при ее отпуске. У КШМ (у кривошипных прессов) применяют также управление с помощью **педали** с контактной системой (в корпус педали встроен переключатель с замыкающими и размыкающими контактами). При нажатии ногой на рифленую поверхность педали контакты переключаются. При прекращении нажима педаль возвращается в исходное положение посредством пружины.

В КШП для включения пресса используют одновременное нажатие двумя руками рабочего двух кнопок управления. Такое управление обеспечивает большую безопасность, чем управление педалью.

Командоконтроллеры. При необходимости одновременного воздействия на несколько кнопок в различных комбинациях применяют вместо кнопок *кулачковые переключатели*, предназначенные для работы в цепях управления и называемые *командоконтроллерами* (или переключателями управления).

3.3. Основные схемы 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 **замыкающие** (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, **FK** – электротепловое реле защиты по току перегрузки, **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: **PT** – реле тепловое, **ПП** – реле промежуточное, **П** или **КнП** – кнопка «Пуск», **С** или **КнС** – кнопка «Стоп».

На рис. 3.2, 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.

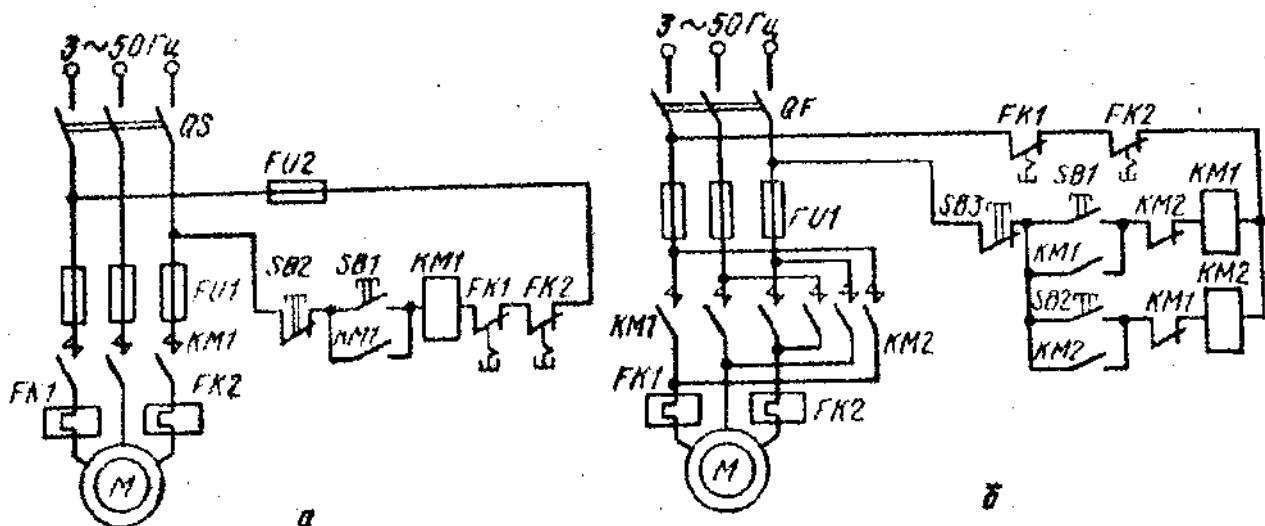


Рис. 3.2. Схемы пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

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. 3.2, 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*.

Комплект контактной аппаратуры, предназначенный для пуска и реверса (а иногда и для защиты) асинхронного короткозамкнутого двигателя (АД) называют **магнитным пускателем**.

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. 3.2 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. 3.2, б). Путевые блокировки ограничивают движение механизмов и защищают их от поломки.

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.

3.4. Аппаратура и схемы защиты электродвигателей

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. 3.3).

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.

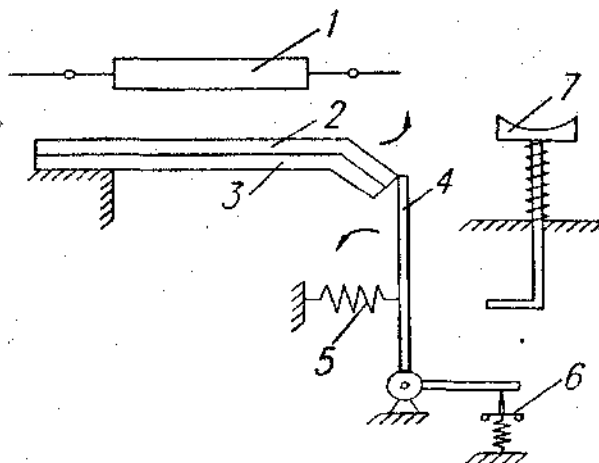


Рис. 3.3. Схема теплового реле

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 3.2.

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 3.4. 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 так, что контакты 9 будут разомкнуты мостиком 4.

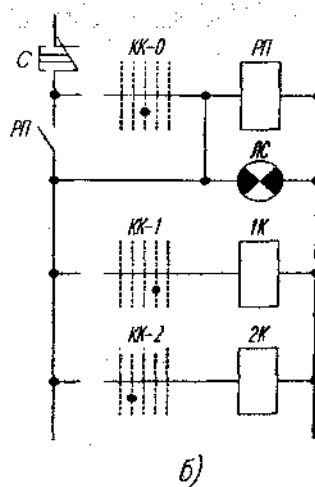
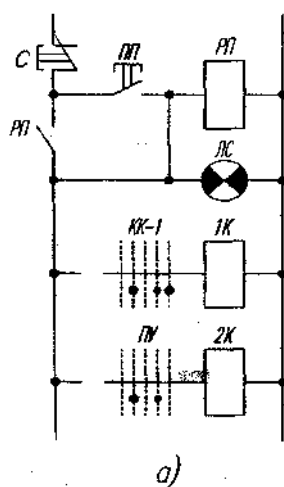
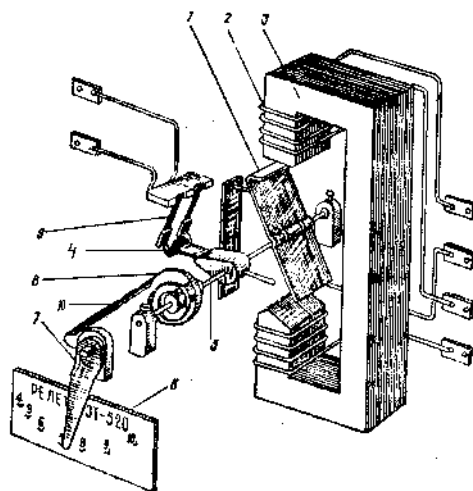


Рис. 3.4. Конструктивная схема
в схемах
электромагнитного реле тока
командоконтроллером

Рис. 3.5. Нулевая защита

с

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 быстросрабатывающую защиту, чем плавкие предохранители.

Широкое распространение в машиностроении получили **автоматические выключатели**. Включают и отключают их вручную. При возрастании тока аппарат отключается автоматически тепловыми или электромагнитными расцепителями. Выключатель может быть 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. 3.5). В схеме рис 3.5, 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. 3.5, 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 *1К* и др. при появлении напряжения питания необходимо предварительно вернуть командоконтроллер в нулевое положение.

Принципы автоматического управления пуском и торможением двигателей. При автоматическом пуске (или торможении) с помощью релейно-контакторных или бесконтактных аппаратов осуществляются определенные переключения как в силовой цепи, так и в цепи управления. Для асинхронных двигателей с фазным ротором и ДПТ в цепи роторов и якорей двигателей включаются пусковые резисторы, которые при разгоне двигателей по ступеням выключаются. Когда пуск закончится, пусковые резисторы полностью шунтируются. Процесс торможения двигателей также может быть автоматизирован. После команды на торможение с помощью релейно-контакторной аппаратуры осуществляются необходимые переключения в силовых цепях. При подходе к скорости, близкой к нулю, двигатель отключается от сети.

Управление пуском двигателя осуществляется в функции ЭДС (или скорости), тока, времени и пути.

3.5. Автоматическое управление в функции времени

Во время работы КШМ часто нужна определённая пауза между 2-мя последовательными перемещениями. В этом случае кроме путевых переключателей нужно применить **реле времени**, которое после отработки установленной выдержки времени замкнёт или разомкнёт определённые цепи управления.

Наряду с автоматизацией технологических процессов реле времени применяют и для автоматизации процессов пуска и торможения электроприводов.

Широкое распространение получили *пневматические реле времени*, обеспечивающие выдержку времени от 0,4 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).

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.

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. 3.6.

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.

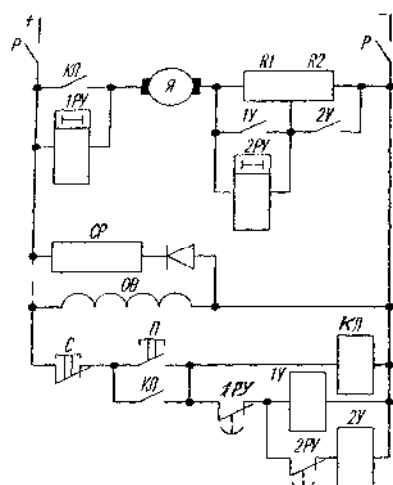


Рис. 3.6. Автоматизация пуска ДПТ
в функции времени

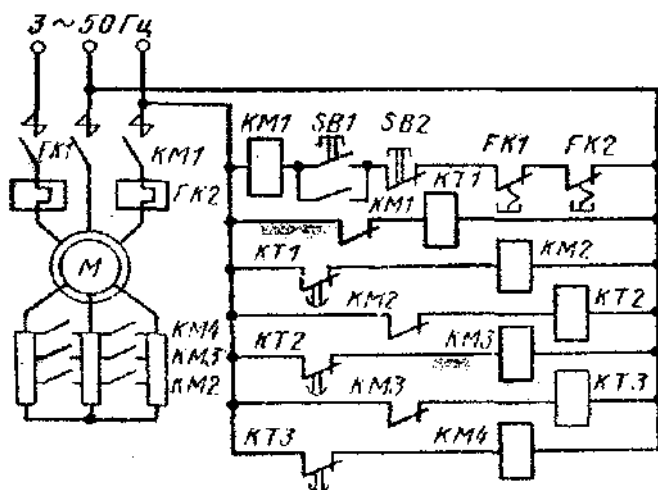


Рис. 3.7. Схема пуска АД с фазным ротором

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 открывает 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 $1У$, главный контакт которого замыкает накоротко ступень $R1$ пускового реостата и одновременно – катушку реле

времени $2PY$. Реле это отпадает с выдержкой времени и размыкающим контактом $2PY$ включает контактор $2Y$, а главный контакт последнего замыкает накоротко вторую ступень $R2$ пускового реостата.

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

Схема автоматического пуска асинхронного двигателя с использованием реле времени электромагнитного типа показана на рис. 3.7. 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.

При **динамическом торможении ДПТ** необходимо обмотку якоря двигателя замкнуть на добавочное сопротивление, а обмотку возбуждения оставить под напряжением. Такое торможение можно осуществить в функции скорости или в функции времени.

Динамическое торможение ДПТ независимого возбуждения в функции времени осуществляется по схеме, приведенной на рис. 3.8.

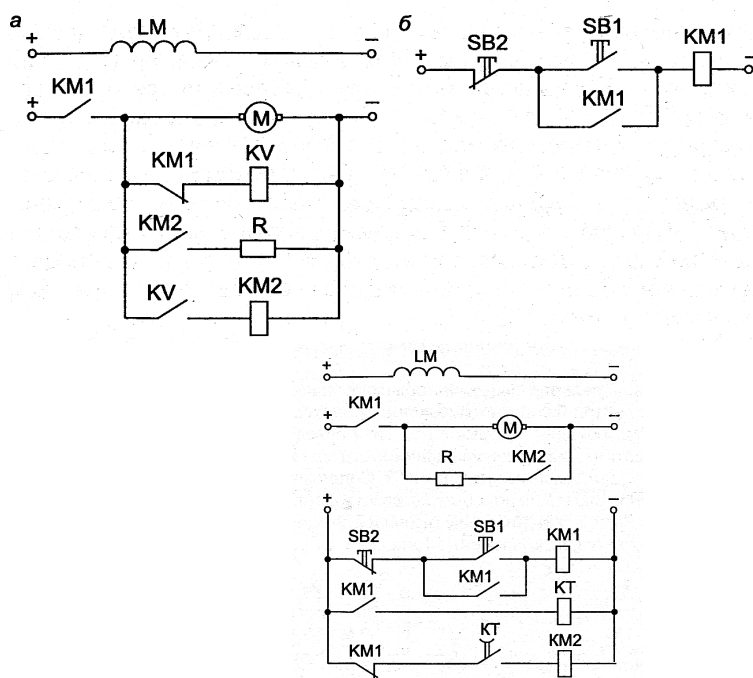


Рис. 3.9. Схема динамического торможения
ДПТ в функции скорости (или ЭДС)
времени

Рис. 3.8. Схема
ДПТ в функции
времени

При работе двигателя реле времени $КТ$ включено, но цепь контактора $KM2$ разомкнута. Для торможения необходимо нажать кнопку $SB2$ (стоп). Контактор

КМ1 и реле времени КТ теряют питание; срабатывает контактор КМ2, так как контакт КМ1 в цепи контактора КМ2 замыкается, а контакт реле времени КТ размыкается с выдержкой времени. На время выдержки времени контактор КМ2 получает питание, замыкает свой контакт и подключает якорь двигателя к добавочному резистору R. Осуществляется динамическое торможение двигателя. В конце его реле КТ после выдержки времени размыкает свой контакт и отключает контактор КМ2 от сети. Дальнейшее торможение до полной остановки осуществляется под действием момента сопротивления M_c .

Управление в функции скорости (ЭДС) при динамическом торможении можно выполнить по схеме рис. 3.9. При отключении контактора КМ1 якорь двигателя отключается от сети, но на его зажимах в момент отключения имеется напряжение. Реле напряжения KV срабатывает и замыкает свой контакт в цепи контактора КМ2, который своим контактом замыкает якорь двигателя на резистор R. При скорости, близкой к нулю, реле KV теряет питание. Дальнейшее торможение от минимальной скорости до полной остановки происходит под действием статического момента сопротивления. Для увеличения эффективности торможения можно применять две или три ступени торможения.

3.6. Автоматическое управление в функции тока

Пуск асинхронных электродвигателей с фазным ротором средней и большой мощности производится в большинстве случаев с помощью реостата, включенного в цепь ротора (рис. 3.10, б) в автоматическом режиме. Пуск двигателей постоянного тока и асинхронных с фазным ротором обычно осуществляют в соответствии с заданной пусковой диаграммой, при этом закорачивание ступеней реостата происходит либо при достижении двигателем определенной скорости, либо при определенной силе тока, частоте или через заданные промежутки времени.

На рис. 3.10, 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

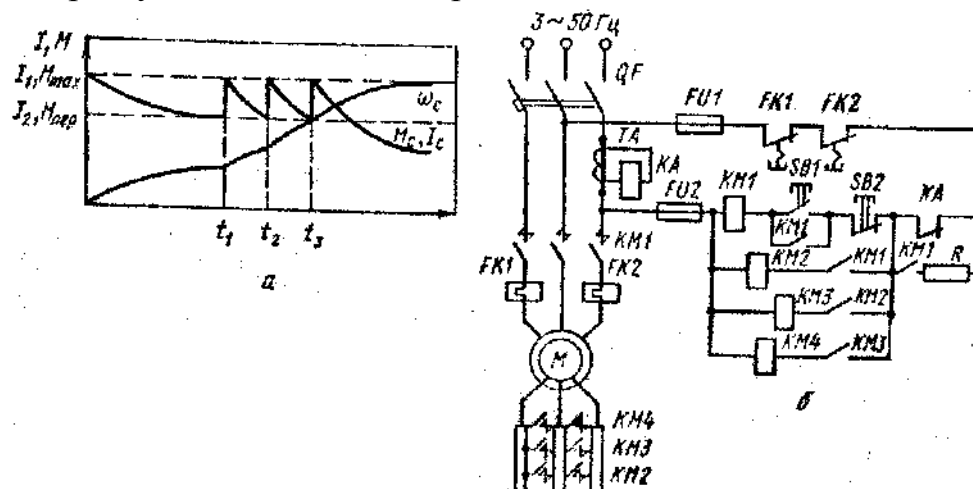


Рис. 3.10. Пусковая диаграмма (а) и схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором в функции тока

Величина тока во время пуска двигателя колеблется в заданных пределах (см. рис. 3.10, а) $I_1 - I_2$, где I_1 – наибольший пусковой ток в момент включения электродвигателя. По мере разгона двигателя его ток снижается до величины I_2 , при которой часть пускового реостата шунтируется, что приводит к новому увеличению тока до значения I_1 и т.д. Рассматриваемый метод управления основан на применении токовых реле с катушками, включаемыми в силовую цепь двигателя непосредственно или через трансформатор тока. На рис. 3.10, б показана *схема пуска асинхронного электродвигателя в функции тока*. После включения линейного контактора $KM1$ двигатель пускается в ход при полностью введенном в ротор реостате. Под действием пускового броска токовое реле KA включается и размыкает свой контакт. Катушка $KM1$ при этом получает питание через блок-контакт $KM1$ и резистор R . Замыкание блок-контакта $KM1$ в цепи ускоряющего контактора $KM2$ не вызывает включения последнего из-за значительной величины сопротивления резистора R . Только после уменьшения тока двигателя до величины I_1 реле KA , отрегулированное на соответствующую силу тока, отпустит свой якорь и замкнет размыкающий контакт KA . При этом контактор $KM2$ своими силовыми контактами шунтирует первую секцию пускового реостата. Соответствующий этому бросок тока снова вызовет включение реле KA , которое своим блок-контактом препятствует мгновенному включению второго ускоряющего контактора $KM3$. Контактор же $KM2$ остается включенным через блок-контакт $KM1$ и резистор R , так как его ток при этом достаточен для удержания якоря в притянутом положении. Аналогично происходит шунтирование остальных ступеней реостата. *Достоинством данного способа пуска* является автоматическое изменение выдержки времени при изменении нагрузки.

Схема пуска ДПТ *параллельного возбуждения в функции тока* представлена на рис. 3.11. Сопротивления ступеней пускового резистора выбирается таким образом, чтобы в момент включения двигателя и шунтирования ступеней ток I_1 в цепи якоря и момент M_1 не превосходили допустимого уровня.

Пуск двигателя осуществляется включением автоматического выключателя QF и нажатием кнопки $SB1$ (Пуск). При этом срабатывает контактор $KM1$ и замыкает свои контакты. По силовой цепи двигателя проходит пусковой ток I_1 , под действием которого срабатывает реле максимального тока $KA1$. Его контакт размыкается, и контактор $KM2$ не получает питания.

Когда ток уменьшается до минимального значения I_2 , реле максимального тока $KA1$ отпадает и замыкает свой контакт. Срабатывает контактор $KM2$ и своим главным контактом шунтирует первую секцию пускового резистора и реле $KA1$. При переключении ток возрастает до значения I_1 . При повторном увеличении тока до значения I_1 реле $KA1$ не включается, поскольку его катушка шунтирована контактом $KM2$. Под действием тока I_1 реле $KA2$ срабатывает и размыкает свой контакт. Когда в процессе ускорения ток вновь уменьшается до значения I_2 , реле $KA2$ отпадает и включается контактор $KM3$. Пуск заканчивается, двигатель работает на естественной механической характеристике.

Для правильной работы схемы необходимо, чтобы время срабатывания реле $KA1$ и $KA2$ было меньше времени срабатывания контакторов.

Чтобы остановить двигатель, необходимо нажать кнопку $SB2$ (Стоп).

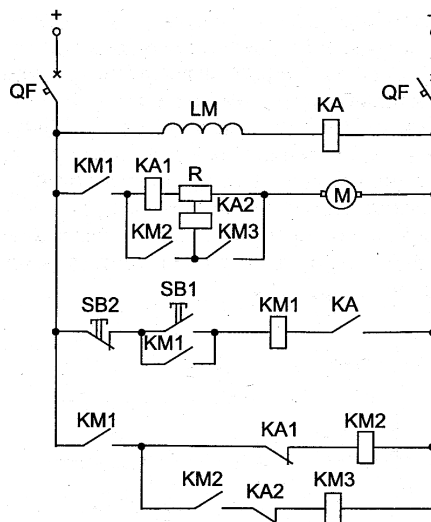


Рис. 3.11. Схема пуска ДПТ параллельного возбуждения в функции тока

3.7. Автоматическое управление в функции скорости

Простейшим командным аппаратом в системах автоматического управления в функции скорости является *индукционное реле контроля скорости* (рис. 3.12). 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.

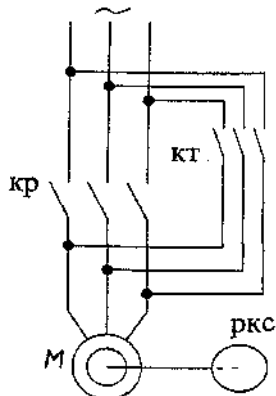
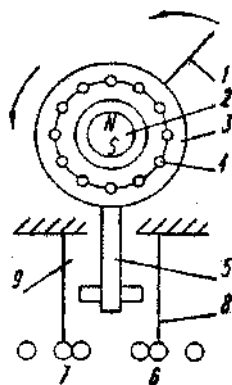


Рис. 3.12. Конструктивная схема
АД противовключением
реле контроля скорости (РКС)

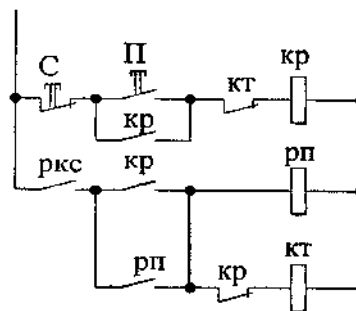


Рис. 3.13. Схема торможения

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.

Наиболее широкое применение в машиностроении реле контроля скорости получило в схемах торможения *противовключением* асинхронных двигателей. Одна из таких схем представлена на рис. 3.13. 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 контуры *РКС* и *РП* включается тормозной контактор *ТК*. Его главные контакты включают электродвигатель на реверс, магнитное поле начинает вращаться в обратную сторону и происходит торможение электродвигателя *противовключением*. При снижении частоты вращения до 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.

На рис. 3.14 представлена схема автоматического пуска ДПТ параллельного возбуждения в функции ЭДС (или скорости), а на рис. 3.15 его *пусковая диаграмма*.

Пуск двигателя происходит вначале по искусственной характеристике 3 (рис. 3.15) с полностью введенным в цепь якоря пусковым реостатом. При этом ток и момент двигателя ограничиваются до заданного (допустимого) уровня $I_1 = I_{\text{доп}}$ и $M_1 = M_{\text{доп}}$. Пуск осуществляется следующим образом:

- включается автоматический выключатель *QF*, обмотка возбуждения двигателя подключается к источнику питания; срабатывает реле *КА* и замыкает свой контакт *КА* в цепи катушки контактора *КМ1*;

- нажимается кнопка *SB1* (Пуск); срабатывает контактор *КМ1*, подключается двигатель к источнику питания (контактор *КМ1* становится на самопитание и

кнопку SB1 можно отпустить); двигатель разгоняется с резистором R в цепи якоря до скорости ω_1 (см. рис. 3.15);

- срабатывает реле KV1 и замыкает свой контакт в цепи катушки контактора KM2, который включается и закорачивает своим контактом первую ступень пускового резистора R. Двигатель переходит на характеристику 2 (рис. 3.15) и по ней разгоняется до скорости ω_2 ;

- при скорости ω_2 срабатывает реле KV2 и своим контактом замыкает цепь питания катушки контактора KM3, который срабатывает и закорачивает своим контактом вторую ступень пускового резистора R. Двигатель переходит на естественную характеристику 1 и заканчивает по ней разгон.

Для правильной работы схемы необходимо настроить реле напряжения KV1 и KV2 на срабатывание при ЭДС двигателя, соответствующих скоростям ω_1 и ω_2 (для KV2).

Остановка двигателя осуществляется нажатием на кнопку SB2 (Стоп).

Отметим, что *характеристики пусковой диаграммы* могут быть использованы и для *регулирования скорости* двигателя.

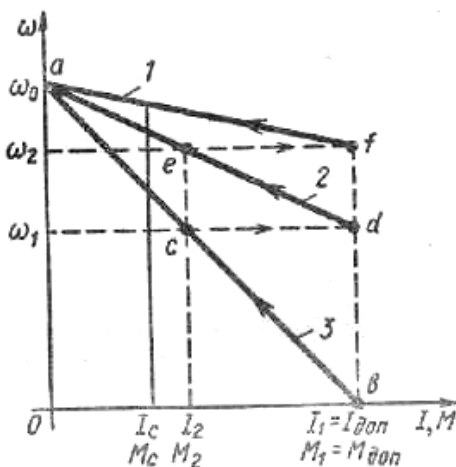
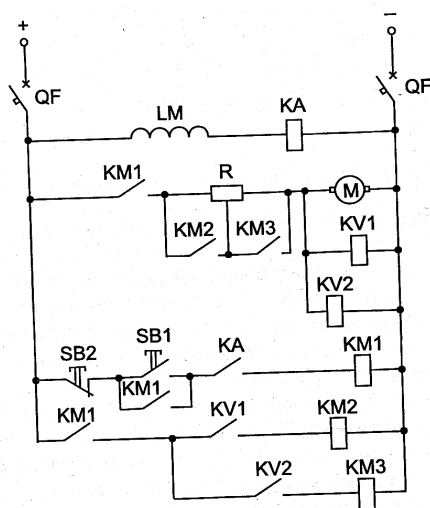


Рис. 3.14. Схема автоматического пуска ДПТ
диаграмма ДПТ параллельного
параллельного возбуждения в функции ЭДС (скорости)
возбуждения в функции скорости (ЭДС)

Рис. 3.15. Пусковая

3.8. Бесконтактное логическое управление КШМ

В автоматическом управлении кузнечно-штамповочных машин (КШМ) все более широкое применение находит бесконтактная аппаратура благодаря таким преимуществам перед контактной аппаратурой, как высокие допустимая частота включений и быстродействие, большие долговечность и надежность (так как они не имеют механических контактов и быстроизнашивающихся деталей). Наибольшее применение получили бесконтактные аппараты дискретного действия и малой мощности, называемые *бесконтактными логическими элементами* (БКЭ).

Для построения схем дискретного логического управления, как бесконтактного, так и контактного используют специальный математический аппарат – *алгебру логики*. Двоичная переменная **a** может быть равна 1 или 0. Это соответствует наличию или отсутствию входного сигнала. Логическая функция этой переменной $x = f(a)$ может быть так же 1 или 0. Если подача сигнала **a** на вход БКЭ вызывает на его выходе такой же сигнал $x = f(a) = a$, то такой элемент называют *повторителем* (рисунок 3.16, а). Действие повторителя эквивалентно включению реле X контактом **a**, после чего закрывается замыкающий контакт x этого реле (рисунок 3.16, б).

Если при подаче сигнала **a** на вход БКЭ сигнал на его выходе исчезает, то такой БКЭ называют *инвертором* или элементом НЕ. Логическую функцию в этом случае обозначают $x = f(a) = \bar{a}$, где черта над **a** означает операцию отрицания (инверсии). Схема элемента НЕ и эквивалентная ему релейно-контактная схема показаны на рисунках 3.16, в, г. Элемент ИЛИ с двумя входами и эквивалентная ему релейно-контактная схема показаны на рисунках 3.16, д, е. У этого элемента выходной сигнал появляется при наличии сигнала или на первом, или на втором входе, или на обоих входах. Элемент И с двумя входами и его эквивалентная релейно-контактная схема показаны на рисунке 3.16, ж, з. У этого элемента выходной сигнал появляется при наличии сигнала и на первом, и на втором входах.

Алгебра логики позволяет составить схему управления с минимальным числом элементов, необходимых для её реализации на БКЭ. Кроме рассмотренных элементов применяют также многофункциональные логические элементы с несколькими выходами, реализующими различные логические функции (например, И, ИЛИ, ИЛИ – НЕ в одном элементе).

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. 3.17 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.

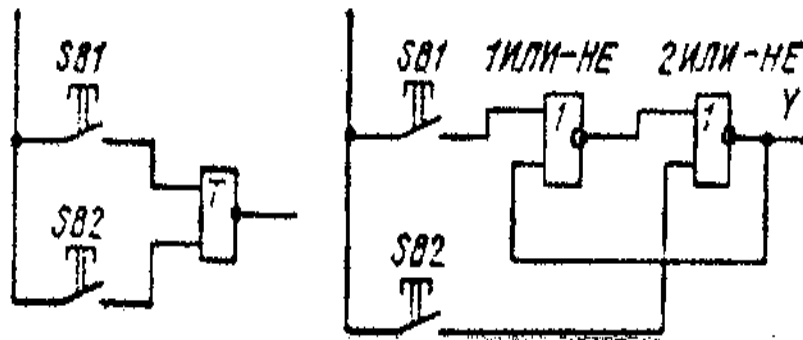


Рис. 3.17. Схема элемента «Память»

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

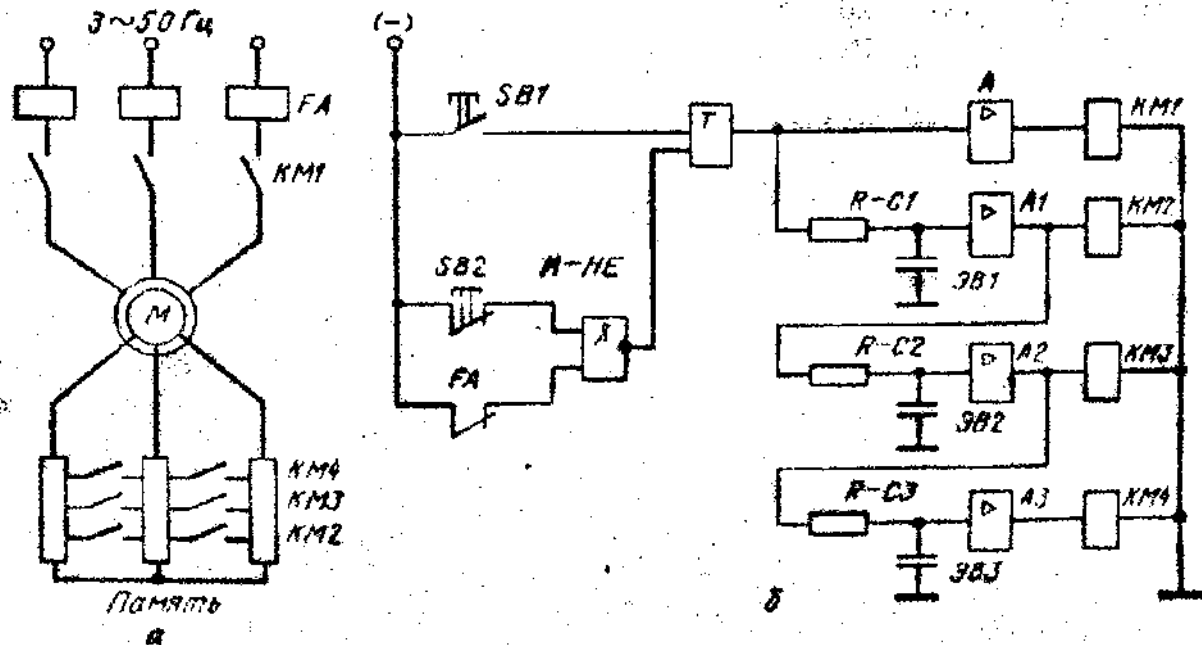


Рис. 3.18. Схема автоматического пуска двигателя с использованием логических элементов

На рис. 3.18 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 A1 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 KM3 и KM4, 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.

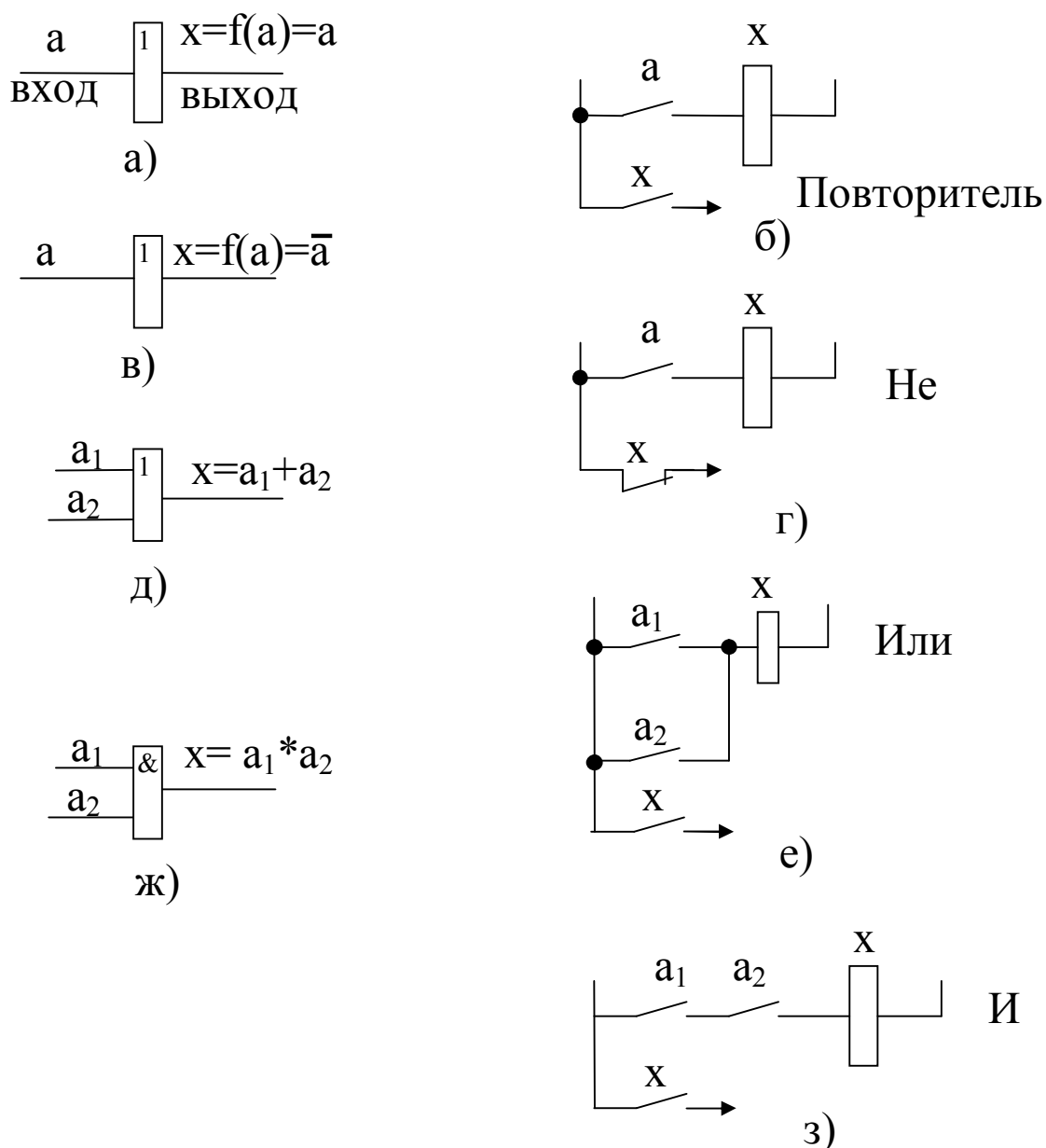


Рис. 3.16. Функции основных логических элементов

Раздел 4. Методы расчета и выбора электропривода

4.1. 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 станицы, 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.

4.2. 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 $t_{\text{доп}}$ 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; $t_{\text{доп}} = 105^{\circ}\text{C}$;

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

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

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

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 \cdot $^{\circ}\text{C}$);

$T = C / A$ – *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. 4.1 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.

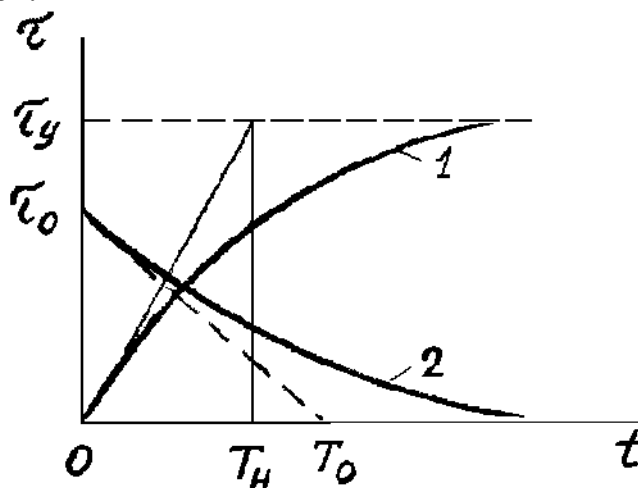


Рис. 4.1. Кривые нагрева (1) и охлаждения (2) двигателя

При отключении от сети нагретого электродвигателя он начнет охлаждаться (рис. 1.4). Уравнение его охлаждения имеет вид:

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

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

Из приведенных уравнений следует, что процессы нагрева 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.

4.3. 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 . 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.

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 .

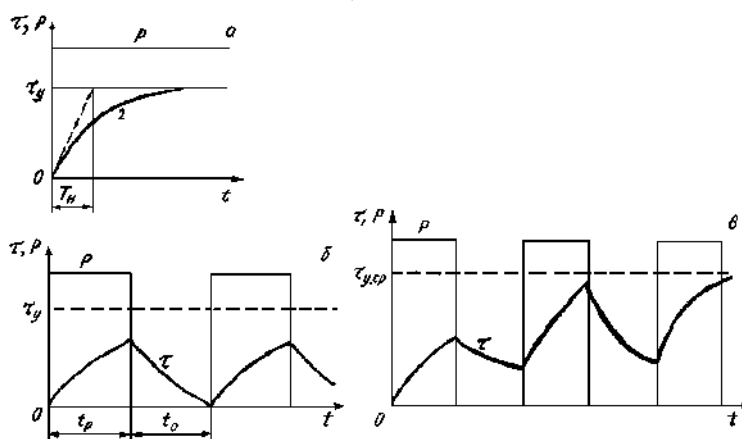


Рис. 4.2. Графики номинальных режимов электроприводов

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.

4.4. Методы расчета мощности электродвигателя при переменной нагрузке

В электроприводах, у которых мощность на валу электродвигателя изменяется по определенному нагрузочному графику, *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 машиностроении и других областях) обычно используют обычные электродвигатели, предназначенные для длительного режима работы с постоянной нагрузкой. Поэтому электродвигатель выбирают на такую постоянную мощность P_d 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:

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

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 .

Отсюда получаем формулу средних потерь:

$$\Delta P_3 = \sum (\Delta P_i t_i) / t_{\Sigma} \quad (4.1)$$

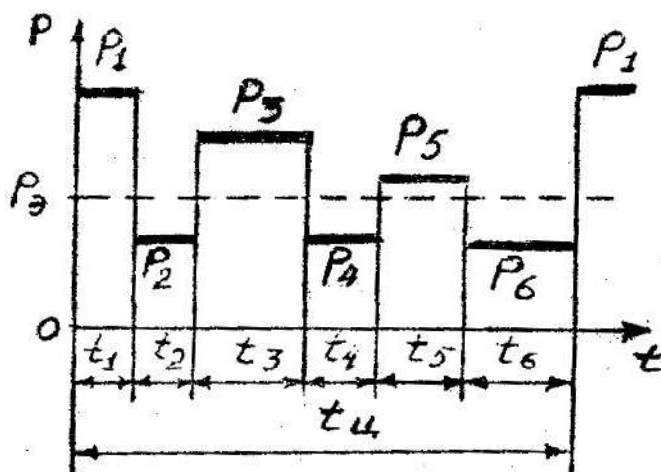


Рис. 4.3. Нагрузочный график при переменной нагрузке

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:

$$\eta_i \approx \eta_n \sqrt[3]{(P_i / P_n)} \quad (4.2)$$

2. Вычисляют ΔP_3 по формуле (4.1) 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.

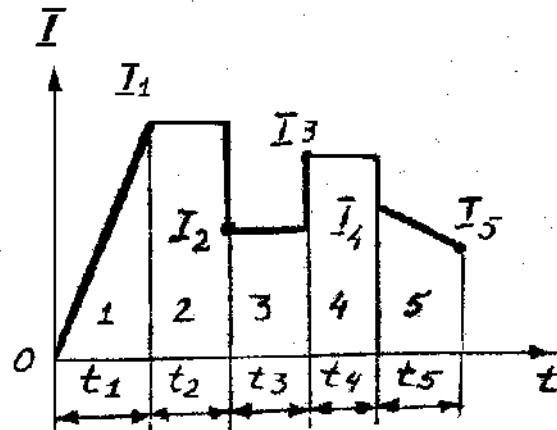


Рис. 4.4. Нагрузочный график $I = f(t)$

Метод эквивалентного тока. Если в формуле (4.1) потери мощности разделить на *постоянные* и *переменные*, пропорциональные квадрату тока нагрузки I^2 , то получим:

$$\Delta P_{\text{пост}} + b I_3^2 = \sum ((\Delta P_{\text{пост}} + b I_i^2) t_i) / t_{\text{ц}} . \quad (4.3)$$

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 (4.3) относительно I_3 получим:

$$I_3 = \sqrt{ (\sum (I_i^2 t_i) / t_{\text{ц}}) } . \quad (4.4)$$

Эта формула соответствует нагрузочному графику (рис. 4.3) с прямоугольными участками. Если нагрузочный график $I = f(t)$ содержит треугольные и трапецидальные участки (рис. 4.4), то в формулу (4.4) вместо I_1 и I_5 следует подставлять $I_{13} = I_1 / \sqrt{3}$; $I_{53} = \sqrt{ (I_4^2 + I_4 * I_5 + I_5^2) / 3 }$.

Метод эквивалентного тока основан на использовании формулы (4.4) при проверке электродвигателя по нагреву и состоит в следующем:

1. Рассчитывают I_3 по (4.4), 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

$$M_3 = \sqrt{ (\sum (M_i^2 t_i) / t_{\text{ц}}) } , \quad (4.5)$$

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

Метод эквивалентной мощности. Если скорость вращения электродвигателя во время работы изменяется незначительно, что характерно для

электродвигателей с жесткими механическими характеристиками, то мощность примерно пропорциональна моменту. Тогда можно пользоваться методом эквивалентной мощности, использующим формулу эквивалентной мощности:

$$P_3 = \sqrt{(\sum (P_i^2 t_i) / t_n)} . \quad (4.6)$$

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.

4.5. 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, правильных, волочильных, ленторазрезных и других КШМ), то его мощность рассчитывается по эмпирическим формулам с учетом поправочных коэффициентов.

Примеры таких формул:

1. Для электропривода центробежного насоса

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

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

H – высота напора, м ;

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

$\eta_{\text{нас}}$ – КПД насоса;

$\eta_{\text{пер}}$ – КПД передачи.

2. Для электропривода поршневого компрессора насосно-аккумуляторной станции

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

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

η_k – КПД компрессора.

3. Для электропривода насоса гидравлического пресса

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

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

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

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 $P_n \geq P$. 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_n для центробежного насоса с $Q = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$, $n_n = 1450$ об/мин,

$H_{\text{воды}} = 22 \text{ м}$, $\eta_{\text{нас}} = 0,5$, $\eta_{\text{пер}} = 1$.

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

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

Выбираем АД с короткозамкнутым ротором закрытого исполнения типа А02 – 42- 4 с $P_n = 5,5 \text{ кВт}$ и $n_n = 1450$ 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 $\lambda = 0,9^2 \lambda_k$ ($\lambda_k = M_k / M_n$ – берется из каталога);

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

Обычно сначала рассчитывают мощность электродвигателя по нагреву и выбирают конкретный двигатель (с учетом и других критериев выбора), а затем проверяют его по перегрузке:

$$P_n \geq P_1.$$

Если это условие перегрузки не соблюдается, 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.

Пример. Выбрать электродвигатель для механизма, работающего по нагрузочному графику, представленному на рис. 4.5. Скорость вращения вала $\omega = 146 \text{ рад/с}$ ($n = 1460 \text{ об/мин}$).

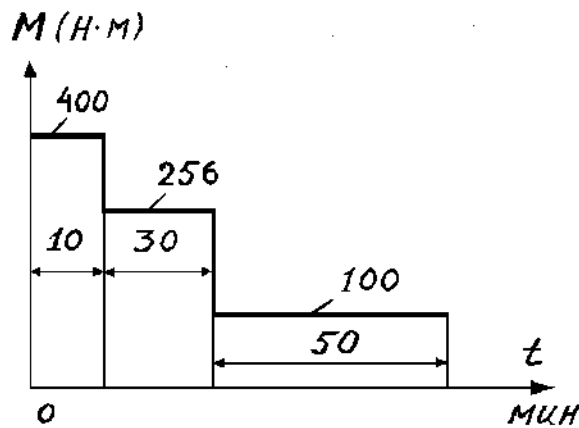


Рис. 4.5 Нагрузочный график $M = f(t)$

Решение. Эквивалентный момент (из графика)

$$M_3 = \sqrt{(400^2 \cdot 10 + 256^2 \cdot 30 + 100^2 \cdot 50) / 90} = 213 \text{ (Н·м)}.$$

Расчетная мощность электродвигателя

$$P = M_3 \cdot \omega = 213 \cdot 146 \cdot 10^{-3} = 31 \text{ (кВт)}.$$

Принимаем по каталогу АД типа А02 – 81 – 4 с $P_n = 40$ кВт, $n = 1460$ об/мин, $\lambda_k = 2$, $\lambda_n = M_n / M_3 = 1,1$.

Номинальный момент АД

$$M_n = P_n / \omega_n = 40 / 146 \cdot 10^3 = 274 \text{ (Н·м)}.$$

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

$$\begin{aligned} 0,9^2 M_k &= 0,9^2 \cdot 2 \cdot 274 = 546 \text{ (Н·м)}; \\ 0,9^2 M_n &= 0,9^2 \cdot 1,1 \cdot 274 = 244 \text{ (Н·м)}. \end{aligned}$$

Сопоставление полученных данных с данными нагрузочного графика показывает, что принятый электродвигатель удовлетворяет требованиям перегрузки ($546 > 400$ Н·м), но не проходит по пусковым условиям ($244 < 400$ Н·м).

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

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

Проверим данный электродвигатель по пусковому моменту:

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

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

4.6. 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 обработке любого числа деталей. 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:

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

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

Решение.

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

4.7. Расчет электропривода с маховиком

Приближенный расчет. Работа всех КШМ характеризуется резким периодическим изменением момента сил сопротивления M_c в зависимости от угла поворота кривошипного вала (рис. 4.6). В пределах угла операции $\alpha_{оп}$ момент достигает очень большого значения, так как в это время машина деформирует материал заготовки. Угол $\alpha_{оп}$ у большинства КШМ составляет 5-10% от полного оборота кривошипного вала. После окончания рабочей операции момент M_c резко уменьшается до величины $M_{х.х}$, обусловленной лишь силами трения при холостом ходе машины.

В КШМ без маховика приведенный момент инерции движущихся частей незначителен. А так как момент M_c во время операции весьма большой, то двигатель, выбранный на этот момент, также будет очень большим.

При применении маховика с моментом инерции J_m наибольшая нагрузка двигателя уменьшается, так как во время деформации заготовки вращение маховика замедляется и он начинает развивать момент, имеющий тот же знак, что и момент двигателя. Это следует из уравнения движения

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

где J - общий момент инерции, приведенный к валу электродвигателя.

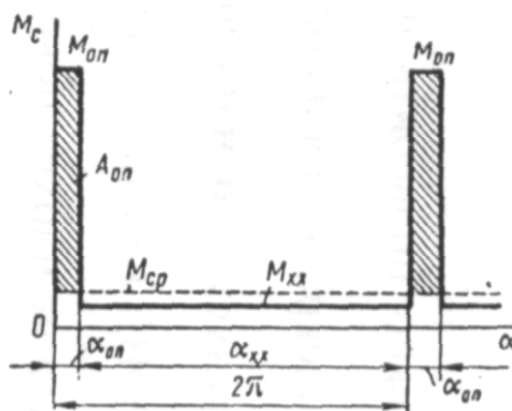


Рис. 4.6. График нагрузки КШМ с маховиком

При $d\omega / dt < 0$ имеем $M + J \, d\omega / dt = M_c$, т.е. наибольший момент нагрузки $M_{оп}$ преодолевается суммой моментов двигателя и маховика.

Общий приведенный момент инерции J в КШМ практически равен приведенному моменту инерции маховика, поскольку приведенные моменты вращающихся частей машины, ползуна и шатуна сравнительно (по отношению к моменту инерции маховика) малы.

В пределах угла холостого хода $\alpha_{x.x}$ нагрузка мала ($M_c = M_{x.x}$), маховик разгоняется и энергия, отданная им во время операции, восстанавливается. При этом двигатель при разгоне

($d\omega / dt > 0$) преодолевает динамический момент, развиваемый маховиком, и момент сил сопротивления при работе машины вхолостую:

$M_{x.x} = A_{x.x} / \alpha_{x.x}$ - средний момент холостого хода, равный отношению энергии холостого хода $A_{x.x}$ к углу $\alpha_{x.x}$, на котором он осуществляется.

При идеальном маховике с моментом инерции $J = \infty$ нагрузка на валу двигателя была бы выровнена полностью и двигатель работал бы со средним моментом

$$M_{ср} = (M_{оп} \alpha_{оп} + M_{x.x} \alpha_{x.x}) / (2\pi) .$$

Двигатель в этом случае можно было бы выбрать на номинальный момент $M_n = M_{ср}$.

В реальных условиях при обычно применяемых маховиках нагрузка на валу электродвигателя полностью не выравнивается. Поэтому при ориентировочных расчетах номинальный момент электродвигателя обычно выбирают по формуле

$$M_n = k M_{cp},$$

где k – коэффициент запаса, учитывающий неточности расчета и выбираемый на основании опыта в пределах $k = 1,2 - 1,5$.

Номинальная мощность электродвигателя при этом $P_n = k P_{cp}$, полагая, что $\omega_{cp} \approx \omega_n$.

Момент инерции маховика J_m при ориентировочных расчетах выбирают из допущения, что площадь графика $M_c = f(\alpha)$, лежащая над уровнем среднего момента, равна энергии операции $A_{оп}$, отдаваемой маховиком при некоторой неравномерности его вращения δ .

$$A_{оп} = (J_m \omega_{\max}^2 / 2 - J_m \omega_{\min}^2 / 2) = J_m \omega_{cp}^2 \delta,$$

где ω_{\max} и ω_{\min} – наибольшая и наименьшая угловые скорости маховика;

$$\omega_{cp} = (\omega_{\max} + \omega_{\min}) / 2; \quad \delta = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / \omega_{cp}.$$

Тогда

$$J_m = A_{оп} / (\omega_{cp}^2 \delta).$$

При ориентировочных расчетах принимают, что $\omega_{cp} \approx \omega_{м.н}$, где $\omega_{м.н}$ – расчетная скорость маховика, которой соответствует номинальная скорость вращения электродвигателя, а коэффициентом неравномерности хода маховика δ задаются. В действительности величина δ зависит от параметров электродвигателя и от характера нагрузки. Приближенный метод расчета этой зависимости не учитывает, что и является основным недостатком этого метода расчета.

Уточненный расчет привода с маховиком. Вследствие значительных погрешностей рассмотренного ориентировочного расчета в промышленности используют более точные методы аналитического расчета. Один из таких методов рассмотрен в [1], с. 66-72. Сущность его состоит в следующем:

1. Исходя из проектируемой кинематической схемы машины, задаются синхронной угловой скоростью двигателя ω_0 .
2. По заданным значениям энергий $A_{оп}$, $A_{х.х}$, коэффициента запаса k определяют номинальную расчетную мощность электродвигателя по формуле

$$P_{н.р} = k (A_{оп} + A_{х.х}) / (1000 t_{ц}), \text{ кВт}.$$

Здесь $t_{ц}$ – время цикла в секундах, определяемое из заданной производительности (числа проходов в минуту $n_{пр}$) машины.

3. Выбирают конкретный электродвигатель из каталога по ω_0 (пункт 1) и мощности (пункт 2) $P_n \geq P_{н.р}$.

4. Определяют момент инерции маховика J_m по формуле

$$J_m = k_{\phi} A_{оп} / (j \omega^2), \text{ кг.м}^2.$$

Здесь κ_{ϕ} – коэффициент формы, учитывающий характерные особенности графика реальной нагрузки;

ω – средняя угловая скорость маховика за время цикла $t_{\text{ц}}$;

j – коэффициент, характеризующий неравномерность хода;

$j = 2 \kappa \xi (s_{\text{н}} + s_{\text{р}})$;

ξ – коэффициент, выбираемый в пределах 0,85 – 0,95 (из табл. 5.1);

$s_{\text{р}}$ – скольжение ремней (в приводах с клиноременной передачей), $s_{\text{р}} \approx 0,01$.

Практика показывает, что существует определенная связь между производительностью машины и экономически оптимальными значениями κ , $s_{\text{н}}$ и ξ . Рекомендуемые значения этих величин приведены в табл. 5.1.

Таблица 4.1

Рекомендуемые значения расчетных величин

	Число ходов в минуту		
	до 15	15 – 50	больше 50
$s_{\text{н}}$	0,12 – 0,08	0,08 – 0,04	0,04 – 0,02
κ	1,2	1,3	1,4 – 1,6
ξ	0,85	0,9	0,95

Из этой таблицы видно, что при числе ходов КШМ, меньшем 50 в минуту, рекомендуется применять электродвигатели с повышенным скольжением (типа АС, АОС, АС-2, АОС-2).

Значение коэффициента формы κ_{ϕ} определяются по формуле

$$\kappa_{\phi} = 1 - \alpha_{\text{оп}} / 360 \quad - \text{ для однопикового графика нагрузки.}$$

Пример. Даны следующие величины: $A_{\text{оп}} = 15000$ Дж; $A_{\text{х.х}} = 2000$ Дж; $n_{\text{пр}} = 70$ ход / мин; $\omega = 27,2$ рад / с; $\alpha_{\text{оп}} = 60^\circ$; $\omega_0 = 104,7$ рад / с. Привод клиноременный с асинхронным короткозамкнутым двигателем. Требуется определить мощность двигателя и момент инерции маховика.

Решение:

1. Находим $t_{\text{ц}} = 60 / n_{\text{пр}} = 60 / 70 = 0,86$ с.

2. Расчетная номинальная мощность двигателя

$$P_{\text{н.р}} = \kappa (A_{\text{оп}} + A_{\text{х.х}}) / (1000 t_{\text{ц}}) = 1,4 (15000 + 2000) / (1000 \cdot 0,86) = 27,6 \text{ кВт.}$$

3. По каталогу выбираем двигатель А 81-6 с $P_{\text{н}} = 28$ кВт и $s_{\text{н}} = 0,025$.

4. Определяем момент инерции маховика

$$J_{\text{м}} = \kappa_{\phi} A_{\text{оп}} / (j \omega^2) = (1 - \alpha_{\text{оп}} / 360) A_{\text{оп}} / (j \omega^2),$$

$$\text{где } j = 2 \xi \kappa (s_{\text{н}} + s_{\text{р}}) = 2 \cdot 0,95 \cdot 1,4 \cdot (0,025 + 0,01) = 0,093.$$

Здесь $\kappa = 1,4$ (см. табл. 5.1), $\xi = 0,95$.

$$\text{Тогда } J_{\text{м}} = (1 - 60 / 360) \cdot 15000 / (27,2^2 \cdot 0,093) = 181 \text{ кг.м}^2.$$

Раздел 5. Электрооборудование кузнечно-штамповочных машин

5.1. Электрооборудование кривошипных кузнечно-штамповочных машин

Кривошипные прессы обычно приводятся в движение асинхронными короткозамкнутыми двигателями. На крупных прессах применяют также асинхронные двигатели (АД) с фазным ротором. В настоящее время на кривошипных прессах и автоматах все чаще используется главный привод с регулированием скорости.

Запас энергии маховика зависит от квадрата скорости его вращения. Поэтому с понижением скорости вращения резко уменьшается эффективность использования маховика. Это заставляет применять лишь небольшие диапазоны регулирования скорости главного привода, например 2:1, 3:1. Используют почти все существующие виды механического и электрического регулирования. Наиболее простым является привод с кремниевыми выпрямителями и двигателем постоянного тока (ДПТ), регулируемым путем изменения магнитного потока.

У крупных кривошипных КШМ иногда применяют АД с фазным ротором и регулятором скольжения. Это – реостат, управляемый автоматически в функции тока двигателя посредством, например, реле тока и контакторов. При перегрузке двигателя регулятор автоматически увеличивает сопротивление цепи ротора. Скорость привода при этом снижается, маховик отдает значительную энергию, ток электродвигателя ограничивается определенной величиной. В результате исключается чрезмерный нагрев двигателя при перегрузках и связанное с ним увеличение потерь энергии.

На кривошипных прессах применяют ряд вспомогательных приводов. К ним относятся приводы столов, транспортеров, подающих устройств, насосов смазки направляющих. Эти привода выполняются в основном на использовании короткозамкнутых АД.

5.2. Электрооборудование гидравлических прессов и насосно-аккумуляторных станций

У гидравлических прессов электродвигатели применяют в основном лишь для привода разного рода насосов, работающих длительно с неизменной нагрузкой. Наиболее часто применяют короткозамкнутые АД, реже – АД с фазным ротором. Для управления и защиты используют схемы и аппараты, рассмотренные выше. Для привода насосов тяжелых гидравлических прессов иногда применяют синхронные двигатели. Управление гидроприводами производится посредством клапанов и гидропереключателей, перемещаемых электромагнитами. Возврат клапана в исходное положение производит пружина. Таким образом, основной формой управления гидравлическим прессом является электрическое управление. Наиболее часто применяют автоматическое управление в функции пути. Для обеспечения выдержки изделия под давлением широко используют различные типы реле времени.

На крупных гидравлических прессах для контроля подъема ползуна применяют сельсинные высотомеры (на бесконтактных сельсинах, работающих в индикаторном режиме).

Для питания гидравлических прессов используют индивидуальные приводы насосов и насосно-аккумуляторные станции. Насосно-аккумуляторная станция предназначена для питания групп гидравлических прессов. В состав станции входят гидронасосы, гидравлические баллоны, компрессоры для получения сжатого воздуха и воздушные баллоны. Управление осуществляется посредством электрической и гидравлической аппаратуры. Для привода насосов и компрессоров станций малой и средней мощности применяют АД. На станциях большой мощности устанавливают синхронные двигатели, обладающие лучшими энергетическими показателями, чем АД. При перевозбуждении эти машины, работая в качестве синхронных компенсаторов, повышают коэффициент мощности предприятия.

Для управления насосно-аккумуляторными станциями применяют также поплавковые устройства с контактными и индуктивными датчиками, фотореле и реле давления.

5.3. Электрооборудование фрикционных прессов и других кузнечно-штамповочных машин

У фрикционного пресса используется АД, который непрерывно вращает два диска, попеременно прижимаемые к маховику, сидящему на вертикальном винте, связанном с ползуном. Перемещение дисков производится сжатым воздухом. Управление пневмосистемой осуществляется электромагнитами.

Электрооборудование пневматических молотов довольно просто. Для управления АД используют схему нереверсивного магнитного пускателя. В последнее время на ковочных молотах начинают применять программное управление. Это управление обеспечивает серию в 6 – 10 ударов любой силы, в любой последовательности и с любыми промежутками времени, необходимыми для переноса поковки в следующий ручей. В управлении используются электромагниты.

В КШП нашли широкое распространение электрические нагревательные устройства, встраиваемые в КШМ. Кроме того, применяют широко и отдельные установки для нагрева заготовок токами высокой частоты и по методу сопротивления.

5.4. Электрооборудование автоматических линий кузнечно-штамповочных машин

Производственные машины, осуществляющие однородную обработку и автоматически передающие друг другу деталь, образуют **автоматическую линию**. Автоматическую линию из разнородных производственных машин, например из МРС и КШМ, часто называют **автоматическим цехом** или **заводом-автоматом**. Автоматические линии обеспечивают резкое повышение производительности труда, высокое качество продукции и снижение ее стоимости. Управление работой всех агрегатов автоматической линии и согласование их действия выполняются средствами электроавтоматики.

Автоматические линии также имеют транспортеры (ленточные и цепные), подъемники, склизы (лотки), механические руки и др. Для управления автоматической линией используют ту же аппаратуру и те же принципы построения схем, что и для управления отдельными производственными машинами. Основной формой является управление в функции пути, так как в любой момент времени необходимо контролировать взаимное положение деталей и инструментов. Управление строят так, что команда на последующее перемещение подается только тогда, когда закончено предыдущее. Промежуток между подачей двух соседних команд называют **тактом линии**. Комплекс тактов, нужных для обработки детали, называют **циклом линии**. Обычно линии работают в двух основных режимах: в режиме автоматической работы и в режиме наладки.

Для управления автоматической линией устанавливают центральный пульт и местные пульта у всех агрегатов линии. Пуск КШМ производят с местных пультов на этих машинах. Для наладочного режима каждым агрегатом линии используются кнопки, устанавливаемые на этих агрегатах. Переключение на тот или иной режим работы производится переключателями.

Для аварийного останова линии в различных ее частях помещают кнопки «Стоп аварийный». Нажатие на такую кнопку приводит к отключению всех силовых цепей и всех цепей управления. При этом механизмы линии оказываются в промежуточном положении. Для нового их пуска используют кнопки наладочного режима (возвращают механизмы в исходное положение). На автоматических линиях применяют наиболее надежную электрическую аппаратуру и систему электрической сигнализации.

Литература

1. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода. – Мн.: ЗАО «Техноперспектива», 2007.
2. Харизоменов И.В. Электрооборудование кузнечно-штамповочных машин. – М.: Высшая школа, 1970.
3. Стоколов В.Е. и др. Электрооборудование кузнечно-прессовых машин (справочник). – М.: Машиностроение, 1981.
4. Гейлер Л.Б., Харизоменов И.В. Электрооборудование и электроавтоматика кузнечно-прессовых машин. – М., 1960.
5. Глаголев Г.И. Электрооборудование кузнечно-прессовых цехов. – М.: Госметаллургиздат, 1962.
6. Гульков Г.И. и др. Системы автоматизированного управления электроприводами. – Минск: Новое знание, 2007.