

Министерство образования Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



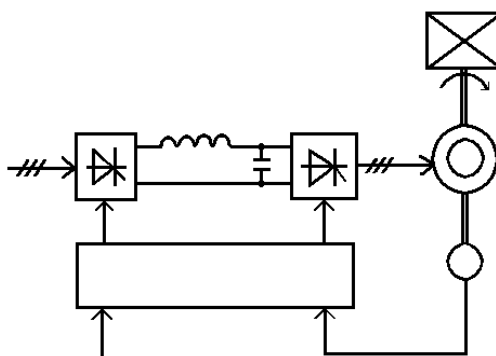
Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных
установок и технологических комплексов»

С. Н. Павлович

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Курс лекций

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



Электронный учебный материал

Минск 2016

УДК 621.34-52 (075.8)
ББК 31.291я7
П 12

Рецензенты:

*доктор технических наук, профессор Б. И. Фираго;
кандидат технических наук, доцент В. П. Беляев*

Павлович, С.Н.

Автоматизированный электропривод: курс лекций для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» / С. Н. Павлович. – Минск: БНТУ, 2016. -128 с.

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

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37
Регистрационный № БНТУ/ФИТР46-2.2016

© Павлович С.Н., 2016
© БНТУ, 2016

Содержание

<i>Лекция 1. ВВЕДЕНИЕ.....</i>	<i>4</i>
<i>Лекция 2. ВИДЫ ПЕРЕДАТОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ</i>	<i>12</i>
<i>Лекция 3. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА..</i>	<i>18</i>
<i>Лекция 4. УРАВНЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА</i>	<i>24</i>
<i>Лекция 7. ТИРИСТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА.....</i>	<i>64</i>
<i>Лекция 8. КОНТАКТНАЯ АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ</i>	<i>69</i>
<i>Лекция 9. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ</i>	<i>76</i>
<i>Лекция 10. АППАРАТУРА И СХЕМЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.....</i>	<i>87</i>
<i>Лекция 11. БЕСКОНТАКТНАЯ АППАРАТУРА ДАТЧИКИ.....</i>	<i>92</i>
<i>Лекция 12. КРИТЕРИИ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО НАГРЕВУ.....</i>	<i>97</i>
<i>Лекция 13. ПОСТРОЕНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ ДИАГРАММ МЕХАНИЗМА И ЭЛЕКТРОПРИВОДА. МЕТОДЫ РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКЕ</i>	<i>104</i>
<i>Лекция 14. РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ</i>	<i>110</i>
<i>Лекция 15. РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОМ И КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМАХ РАБОТЫ</i>	<i>114</i>
<i>Лекция 16. ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЧЕЛОВЕКА</i>	<i>118</i>
<i>Лекция 17. ОСНОВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ</i>	<i>122</i>
<i>Л и т е р а т у р а</i>	<i>130</i>

Лекция 1. ВВЕДЕНИЕ

Цель вводной лекции: рассмотреть цель и задачи изучения дисциплины; изучить основные понятия и их определения, структурную схему автоматизированного электропривода, классификацию электроприводов, краткий исторический обзор и основные этапы развития электропривода.

Цель и задачи изучения дисциплины «Автоматизированный электропривод». Целью изучения дисциплины является формирование у студентов знаний по электрооборудованию и автоматизированным электроприводам, применяемым в современных металлорежущих станках и автоматических линиях.

Основными задачами дисциплины являются **изучение:** электромеханических свойств электродвигателей постоянного и переменного тока; методов расчета и выбора электродвигателей; аппаратов и систем управления электроприводами металлорежущих станков, а также общих вопросов электробезопасности.

В результате освоения дисциплины «Автоматизированный электропривод» студент должен

знать:

- устройство, принцип действия и электромеханические свойства электродвигателей постоянного и переменного тока;
- способы пуска, торможения и регулирования скорости электродвигателей постоянного и переменного тока;
- контактную и бесконтактную аппаратуру, применяемую в схемах управления автоматизированными электроприводами;
- методы расчёта номинальной мощности электродвигателей;
- основные мероприятия по повышению электробезопасности;

уметь:

- определять оптимальное передаточное число редуктора для электропривода;
- рассчитывать приведенные к валу электродвигателя моменты и силы сопротивления, моменты инерции и массы движущихся частей станков; механические характеристики электродвигателей постоянного и переменного тока;
- читать типовые электрические схемы релейно-контакторного управления электродвигателями постоянного и переменного тока;
- рассчитывать пусковые и тормозные сопротивления для электродвигателей.

Основные понятия и их определения. Эффективность производства в значительной степени определяется способом получения энергии, необходимой для выполнения механической работы в производственных процессах. Создание в качестве двигателя паровой машины (взамен гидравлического двигателя) в XIX в. по-

служило мощным толчком развития промышленного производства (*поэтому XIX век назван веком пара*). В XX веке основным источником механической энергии стал более совершенный электрический двигатель, а основным видом привода рабочих машин в промышленном производстве – электрический привод (*поэтому XX век назван веком электричества*).

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

Современное промышленное производство характеризуется большим многообразием технологических процессов с применением различных производственных машин и механизмов (металлорежущих станков, прессов, прокатных станов, конвейеров, подъемных кранов, насосов, вентиляторов и др.). *Производственный механизм* (или *рабочая машина*) состоит из множества взаимосвязанных узлов.

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

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

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

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

Итак, для осуществления исполнительным органом необходимого движения при выполнении технологической операции и преодоления возникающих усилий к нему должна быть подведена определенная механическая энергия от устройства, которое в соответствии со своим назначением получило название *привода*. Таким образом, привод вырабатывает механическую энергию путем преобразования других видов энергии, в зависимости от которых различают гидравлический, пневматический, электрический и другие виды. Простейший привод – *ручной*, затем *конный* (как развитие ручного), *механический* (от ветряного двигателя, водяного колеса, турбины, паровой машины, двигателя внутреннего сгорания). В настоящее время водяные и паровые турбины широко применяются на электрических станциях (гидравлических и тепловых). Однако для привода рабочих машин основным является *электрический двигатель*, на основе которого строится *электропривод*, а на современном этапе развития техники – *автоматизированный электропривод*, потребляемый около 90 % всей вырабатываемой электрической энергии. Такое широкое применение электрической энергии и электропривода объясняется целым рядом их достоинств и преимуществ по сравнению с другими видами энергии и приводов:

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

Электрическим приводом (ЭП) называется электромеханическое устройство, сообщаемое движению рабочему органу производственной машины и состоящее из электродвигателя с аппаратурой (системой) управления и механической передачи. Другими словами, можно сказать, учитывая рассмотренное выше понятие 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 ее технологическим процессом, состоящее из электродвигателя, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств. **Преобразовательное устройство** (между электрической питающей сетью и электродвига-

телем) служит для преобразования неизменных параметров электроэнергии питающей сети в переменные в соответствии с управлением регулируемого электропривода, а *управляющее устройство* – для обеспечения оптимального управления по определенным критериям.

В настоящее время используются в основном полупроводниковые преобразовательные устройства (транзисторные, тиристорные), которые преобразуют трехфазное напряжение переменного тока промышленной сети в постоянное напряжение или в напряжение также трехфазное переменного тока, но другой величины и другой частоты. Современный автоматизированный электропривод может представлять собой целый комплекс электрических машин, аппаратов и систем управления, например АЭП промышленных роботов.

Под *электрооборудованием* понимается совокупность электротехнических устройств (или изделий), в которых по принципу действия при их работе *производится, преобразуется, передается, распределяется, потребляется электрическая энергия*. К ним относятся, например: электрические генераторы и двигатели, трансформаторы, управляемые выпрямители и преобразователи частоты, воздушные ЛЭП и кабели, электрические печи, электрические аппараты управления и защиты и многие другие устройства.

В зависимости от условий работы электрооборудования различают *электрооборудование общего назначения* (оно выполняется без учета специфических требований для определенной области или отрасли промышленности) и *специальное электрооборудование*, которое выполняется с учетом специфических требований, характерных для конкретной области применения, например для шахт.

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

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

Структурная схема АЭП. Структурная схема АЭП представлена на рис. 1.1. Электрическая мощность, потребляемая электроприводом от электрической сети (ЭС), в силовой части преобразовательного устройства (СПрУ) преобразуется в регулируемую по показателям электрическую мощность, которая подводится к обмоткам электродвигателя. На схеме двигатель представлен двумя элементами – электромеханическим преобразователем ЭМП, преобразующим электрическую мощность в механическую, и массой ротора РД, на которую воздействует вращающий момент двигателя M при угловой скорости ω . Механическая мощность

от ротора электродвигателя передается передаточному механизму ПМ, в котором она преобразуется (могут изменяться как момент и угловая скорость, так и вид движения) и передается к исполнительному органу рабочей машины РМ.

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

Классификация электроприводов. В АЭП используются следующие силовые и управляющие устройства:

- электродвигатели различных видов и типов;
- механические передаточные устройства, электромагнитные муфты;
- силовые преобразователи электрической энергии;
- блоки управления: кнопки управления, командоаппараты, реле, логические элементы, регуляторы, усилители, микропроцессоры и управляющие электронные машины.

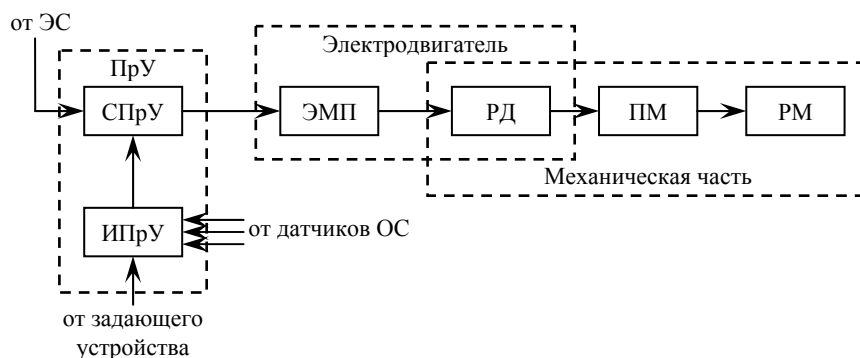


Рис. 1.1. Структурная схема автоматизированного электропривода

Реализация электроприводов весьма разнообразна, что находит отражение в их классификации по таким основным критериям:

1. По характеристике движения различают электроприводы вращательного и поступательного движения, при этом скорость ИО может быть регулируемой или нерегулируемой, а само движение - непрерывным или дискретным, однонаправленным, двунаправленным (реверсивным) или вибрационным (возвратно-поступательным).

2. По количеству используемых электродвигателей различают групповой, индивидуальный (одиночный) и взаимосвязанный (многодвигательный). Групповой ЭП характеризуется тем, что один двигатель приводит в движение несколько ИО на одной рабочей машине или по одному ИО на нескольких рабочих маши-

нах. *Индивидуальный* ЭП обеспечивает движение одного ИО рабочей машины. *Взаимосвязанный* ЭП представляет собой два или более индивидуальных ЭП, связанных между собой электрически или механически и работающих совместно. Если движения ЭП связаны между собой механически и работают на один общий вал, то такой взаимосвязанный ЭП называют *многодвигательным*, а если движения ЭП связаны между собой электрически (электрическими цепями), то взаимосвязанный ЭП называют *электрическим валом*.

3. По виду силового преобразователя различают:

- с управляемым или неуправляемым выпрямителем, которые преобразуют напряжение переменного тока в напряжение постоянного (выпрямленного) тока;
- с инверторами, выполняющими обратные преобразования напряжения;
- с преобразователями частоты и напряжения переменного тока, изменяющими параметры переменного тока;
- с импульсными преобразователями напряжения постоянного тока с различными видами модуляции выходного напряжения.

Современные силовые преобразователи выполняются на полупроводниковых силовых элементах (транзисторах, диодах, тиристорах).

Хотя конкретная реализация ЭП может быть разнообразной, однако работа ЭП имеет некоторые общие закономерности, связанные с процессом преобразования энергии, с определением характера механического движения и с его управлением. Эти и некоторые другие вопросы теории ЭП рассматриваются в изучаемом предмете.

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

Историю развития ЭП обычно начинают отсчитывать с 1938 года, когда русский академик Б. С. Якоби установил изобретенный им в 1834 г. первый электродвигатель (это был электродвигатель постоянного тока вращательного движения), питаемый от батареи гальванических элементов, на небольшом катере и совершил его испытательные рейсы с пассажирами по Неве. Это был первый пример реализации электрического привода и этим самым была доказана возможность практического применения электрического привода. В дальнейшем появились и другие примеры реализации электропривода: в артиллерийских установках (для их наведения на цель), в швейных машинках, для перемещения электродов дуговой сварки. Однако до конца XIX века пар и вода оставались основной силой, приводившей в движение станки и механизмы в промышленности.

В 80-х годах XIX в. было открыто явление вращающегося магнитного поля: его изобретателями считаются Галилео Феррарис – итальянский физик и электротехник, который открыл это явление в 1885 г., и Никола Тесла (серб по национальности, с 1884 г. жил в США) – электро- и радиотехник, который независимо от Г. Феррариса описал в 1888 г. явление вращающегося магнитного поля. В 1891 г. русский инженер М. О. Доливо-Добровольский, используя это явление, изобрел трехфазный асинхронный двигатель, который благодаря своей простоте и надежности до настоящего времени широко распространен на промышленных предприятиях.

В настоящее время автоматизированный электропривод является главным средством электрификации и автоматизации разнообразных технологических процессов, создания высокопроизводительных машин, механизмов и технологических комплексов.

К основным направлениям развития современных АЭП относятся:

- разработка и выпуск комплектных регулируемых электроприводов с использованием современных силовых полупроводниковых преобразователей, с использованием микропроцессорного управления;
- расширение области применения частотно-регулируемых асинхронных электроприводов (особенно с векторным управлением);
- применение ЭП с новыми типами двигателей (линейными, шаговыми, вентильными, вибрационными, повышенного быстродействия и др.);
- повышение эксплуатационной надежности, к.п.д. и других энергетических показателей электродвигателей и АЭП на их основе;
- подготовка инженерно-технических и научных кадров, способных проектировать, создавать и грамотно эксплуатировать современные АЭП.

Решение этих и ряда других связанных вопросов по электрооборудованию и электроприводам позволит достичь дальнейшего технического прогресса промышленного производства.

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

ным, потому что были велики потери в трансмиссиях. Групповой электропривод характерен для промышленных предприятий дореволюционной России.

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

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

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

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

Раздел 1. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Цель: изучить виды передаточных механизмов и кинематические схемы электроприводов; типы механических характеристик производственных механизмов и электродвигателей; принципы приведения моментов и сил сопротивления, моментов инерции и масс движущихся элементов кинематической схемы электропривода к валу электродвигателя; уравнение вращательного движения электропривода; методику расчета оптимального передаточного числа редуктора.

Лекция 2. ВИДЫ ПЕРЕДАТОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

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

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

где C_k – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей машины.

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

По конструктивному исполнению различают следующие виды ПМ (рис. 2.1, 2.2):

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

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 угловая скорость;

ω_2 – выходная угловая скорость.

Передаточное число n -ступенчатого редуктора

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

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).

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).

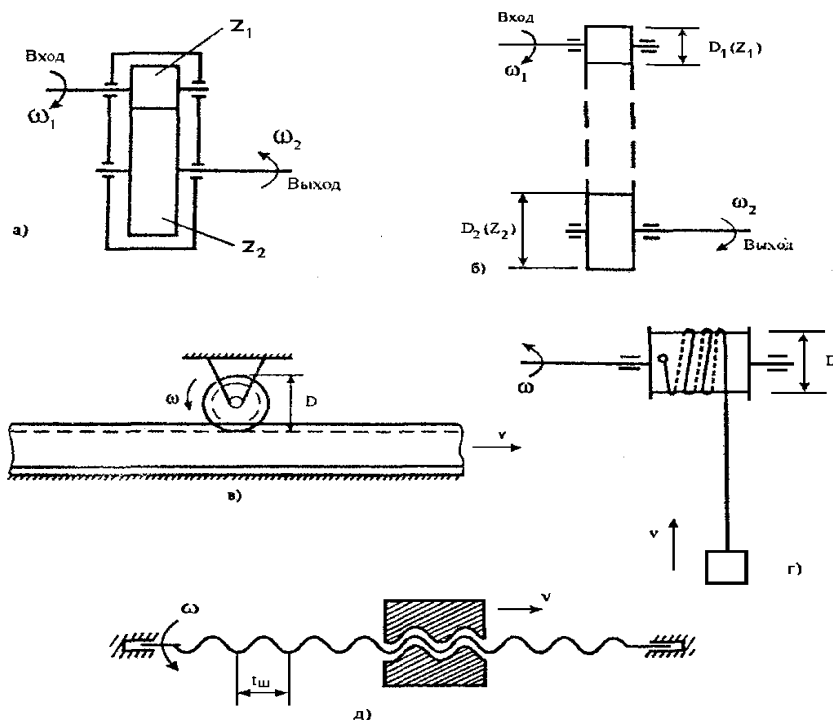


Рис. 2.1. Передаточные механизмы:

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

Передачи типа «зубчатое колесо – рейка», «барабан – трос (шкив – канат)» и «винт – гайка» преобразуют вращательное движение в поступательное и характеризуются радиусом приведения ρ : $\rho = V/\omega$, м/рад.

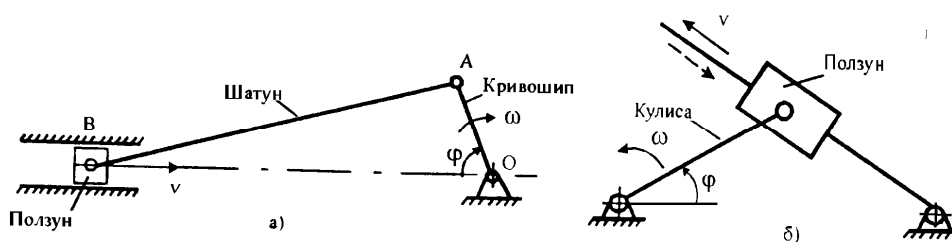


Рис. 2.2. Рычажные передаточные механизмы: а) кривошипно-шатунный механизм; б) кулисный механизм.

Кривошипно-шатунный механизм (рис. 2.2, а) служит для преобразования вращательного движения кривошипа в возвратно-поступательное движение пол-

зуна или, наоборот, возвратно-поступательного движения ползуна во вращательное движение кривошипа.

Кулисный механизм (рис. 2.2, б) предназначен для преобразования качательного движения кулисы в поступательное движение ползуна или, наоборот, поступательного движения ползуна в качательное движение кулисы.

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

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

Кинематическая схема ЭП центробежного вентилятора (рис. 2.3). Ротор электродвигателя D соединяется с рабочим колесом вентилятора с помощью соединительной муфты CM . Все элементы кинематической схемы движутся с одной и той же угловой скоростью ω . На рабочем колесе вентилятора развивается момент сопротивления движению $M_{\text{мех}}$, зависящий от скорости $\omega_{\text{мех}}$ (рис. 2.4):

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

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

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

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

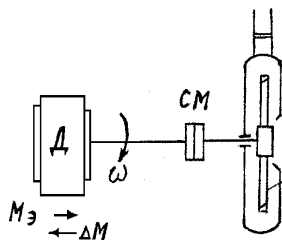


Рис. 2.3. Кинематическая схема вентилятора

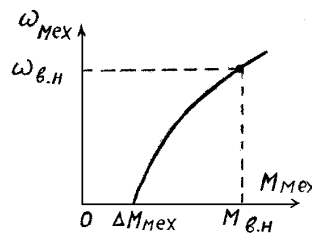


Рис. 2.4. Механическая характеристика ЭП вентилятора

К ротору двигателя приложен электромагнитный момент двигателя $M_э$, а также момент механических потерь в двигателе ΔM , обусловленный силами трения в подшипниках, и момент сопротивления движению $M_в$, создаваемый вентилятором.

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

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

Кинематическая схема электропривода шпинделя токарного станка (рис. 2.5). В этой схеме движение от электродвигателя Д к шпинделю Ш с заготовкой обрабатываемой детали З передается через клиноременную передачу КРП и коробку передач КП. Передаточное число j может изменяться ступенчато за счет введения в зацепление шестерен с различным числом зубьев. В результате взаимодействия вращающейся детали с неподвижным резцом возникает усилие резания F_z и момент резания

$$M_{мех} = M_z = F_z R_3,$$

где R_3 – радиус заготовки обрабатываемой детали.

В процессе обработки детали усилие и момент резания остаются постоянными и не зависят от угловой скорости ω_3 (рис. 2.6). Полезный момент нагрузки механизма $M_{мех}$ при постоянном усилии резания F_z пропорционален радиусу обрабатываемой детали R_3 .

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

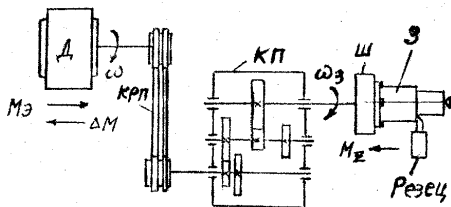


Рис. 2.5. Кинематическая схема ЭП шпинделя токарного станка

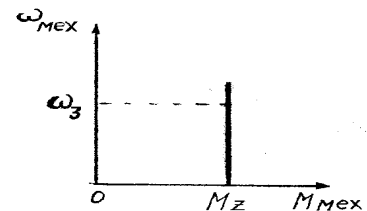


Рис. 2.6. Механическая характеристика

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

производственному механизму позволяет обеспечить наиболее высокую его производительность и экономичную работу.

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

$$\omega = f(M_c).$$

Производственные механизмы обладают различными механическими характеристиками. Существует следующая эмпирическая обобщенная формула для механических характеристик производственных механизмов:

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

где M_c – момент сопротивления механизма при угловой скорости ω ;

M_0 – момент сопротивления трения в движущихся частях механизма;

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

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

Различают четыре основных вида (класса, категории) механических характеристик и соответственно производственных механизмов (рис. 2.7):

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

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

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

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

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

Различают естественные и искусственные механические характеристики электродвигателя. *Естественная* механическая характеристика соответствует работе электродвигателя с номинальными параметрами при нормальной схеме включения.

Искусственная механическая характеристика соответствует работе электродвигателя с параметрами, отличающимися от номинальных, например, при введении сопротивления, изменении питающего напряжения, частоты и др.

Для оценки изменения скорости при изменении момента на валу служит так называемая *жесткость характеристики*, которая равна отношению приращения момента ΔM к соответствующему приращению скорости $\Delta \omega$ (рис. 2.8):

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

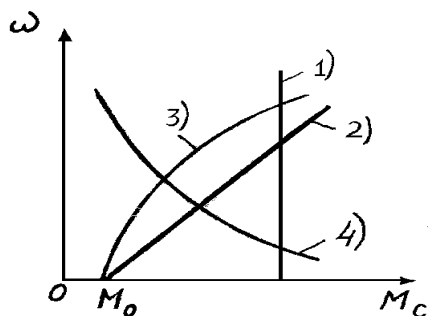


Рис. 2.7. Механические характеристики производственных механизмов

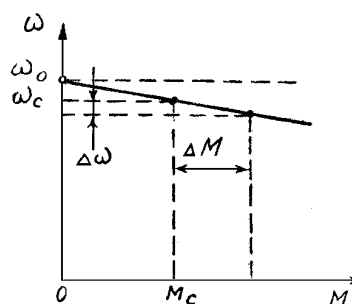


Рис. 2.8. К пояснению жесткости механической характеристики электродвигателя

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

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

Естественные механические характеристики электродвигателей по степени жесткости разделяются на следующие группы (рис. 2.9):

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

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

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

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

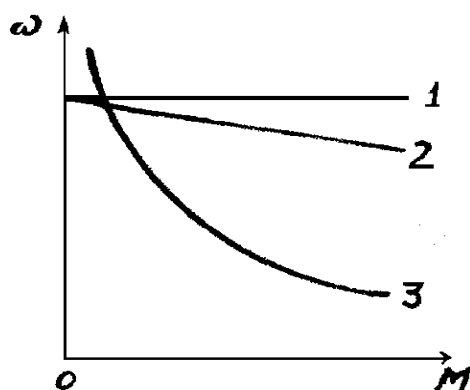


Рис. 2.9. Механические характеристики электродвигателей

Лекция 3. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

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

В инженерных расчетах, не требующих большой точности, в системах с незначительными упругостями элементов и небольшими зазорами (т.е. с большой жесткостью) принимают *допущение*, что механические связи элементов являются

ся абсолютно жесткими. При таком допущении движение одного элемента дает полную информацию о движении и других элементов.

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

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

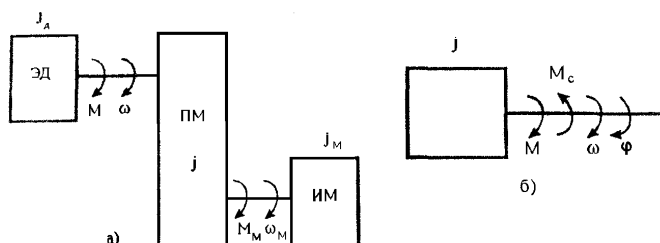


Рис. 3.1. Приведение многомассовой системы к одномассовой при вращательном движении механизма

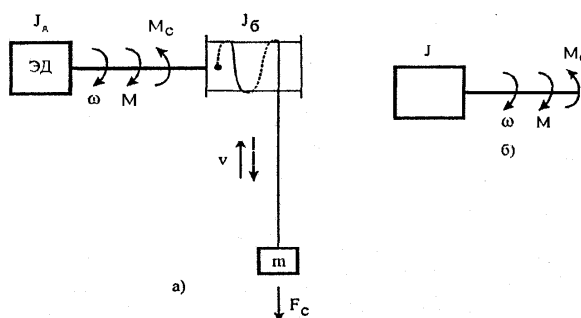


Рис. 3.2. Приведение многомассовой системы к одномассовой при поступательном движении механизма

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

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

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

$$M_c = M_m(\omega_m / \omega) = M_m / (\omega / \omega_m) = M_m / j, \quad (3.1)$$

где $j = \omega / \omega_m$ – передаточное число ПМ.

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

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

$$M_c \omega = F_c V,$$

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

F_c – сила сопротивления в установившемся режиме;

V – линейная скорость подъема груза.

Тогда из этого равенства получаем

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

где 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 (см. рис. 3.1):

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

Из этого равенства находим, что суммарный момент инерции приведенной системы

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

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 (см. рис. 3.2) приведение поступательно движущихся масс к вращательному движению вала ЭД осуществляется на основании равенства кинетических энергий приведенной и исходной (не приведенной) систем:

$$J \omega^2 / 2 = (J_d + J_b) \omega^2 / 2 + mV^2 / 2,$$

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.**

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.

Механическая часть ЭП (рис. 3.3) включает ротор ЭД, вращающийся с угловой скоростью ω и приложенным моментом M , передаточный механизм ПМ с КПД $\eta_{п}$ и передаточным числом i и исполнительный механизм ИМ, вращающийся со скоростью ω_M и приложенным моментом сопротивления M_M . При направлении энергии от ЭД к ИМ имеем двигательный режим работы ЭП, а при обратном потоке энергии – тормозной. В установившемся режиме работы ЭП, который мы и будем рассматривать для учета потерь в ПМ, движущий момент M на валу ЭД равен приведенному к валу статическому моменту M_c , который учитывает момент сопротивления M_M ИМ и момент потерь в ПМ, т.е. $M = M_c$. Для наглядности обозначим M_c в двигательном режиме ЭП через $M_{c\uparrow}$, а в тормозном – через $M_{c\downarrow}$. Тогда, исходя из закона сохранения энергии, можно записать равенства:

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

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

из которых следует, что

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

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

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

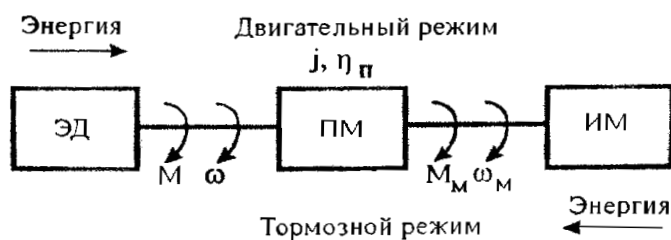


Рис. 3.3. Механическая часть электропривода

Следовательно, для учета потерь в ПМ при приведении статических моментов и сил сопротивления ИМ в формулах (3.1) и (3.2) необходимо в двигательном режиме работы ЭП учесть КПД $\eta_{п}$ в знаменателе, а в тормозном режиме – в числителе, т.е.

$$M_{c\uparrow} = M_M / (j \eta_{\text{п}}) = F_c \rho / \eta_{\text{п}},$$

$$M_{c\downarrow} = M_M \eta_{\text{п}} / j = F_c \rho \eta_{\text{п}}.$$

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

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

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

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

Пример 1. Рассчитать приведенный к валу двигателя момент инерции электропривода механизма подъема мостового крана. Кинематическая схема электропривода показана на рис. 3.4. Данные кинематической схемы:

$$m = 3000 \text{ кг}; Z_1 = Z_3 = 15; Z_2 = Z_4 = 60; J_1 = J_{\text{д}} + J_1 = 0,65 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; J_2 = J_{z_2} + J_{z_3} = 0,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; J_3 = J_{z_4} + J_6 + J_{\text{мф}} = 9 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; D_6 = 0,8 \text{ м}.$$

Решение. Рассчитываем передаточные числа зубчатой передачи:

$$j_1 = Z_2 / Z_1 = 60 / 15 = 4; \quad j_2 = Z_4 / Z_3 = 60 / 15 = 4.$$

Запишем выражение для приведенного момента инерции электропривода механизма подъема

$$J = J_1 + J_2 / j_1^2 + J_3 / (j_1^2 \cdot j_2^2) + m \rho^2,$$

где $\rho = v / \omega = \omega_6 \cdot D_6 / (2\omega) = D_6 / (2j)$.

Находим численное значение приведенного к валу двигателя момент инерции электропривода

$$J = 0,65 + 0,8 / 4^2 + 9 / (16^2) + 3000 \cdot (0,8 / 32)^2 = 2,61 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

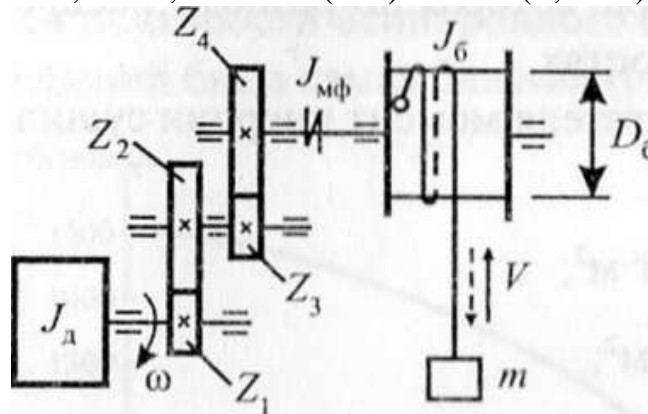


Рис. 3.4. Кинематическая схема электропривода механизма подъема мостового крана

Пример 2. Рассчитать приведенный к валу двигателя момент инерции электропривода продольно-строгального станка, кинематическая схема которого показана на рис. 3.5.

Электродвигатель ЭД имеет момент инерции $J_d = 2,375 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Моменты инерции зубчатых колес $Z_1 - Z_5$ с учетом валов соответственно равны: $J_1 = 0,073 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $J_2 = 0,05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $J_3 = 0,043 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $J_4 = 0,814 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $J_5 = 0,515 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Зубчатые колеса $Z_1 - Z_5$ имеют числа зубьев: $Z_1 = 17$; $Z_2 = 51$; $Z_3 = 19$; $Z_4 = 86$; $Z_5 = 29$. Шаг зубчатого колеса Z_5 равен $t_{\text{ш}} = 34,5 \text{ мм}$. Масса стола с обрабатываемой деталью составляет 4400 кг.

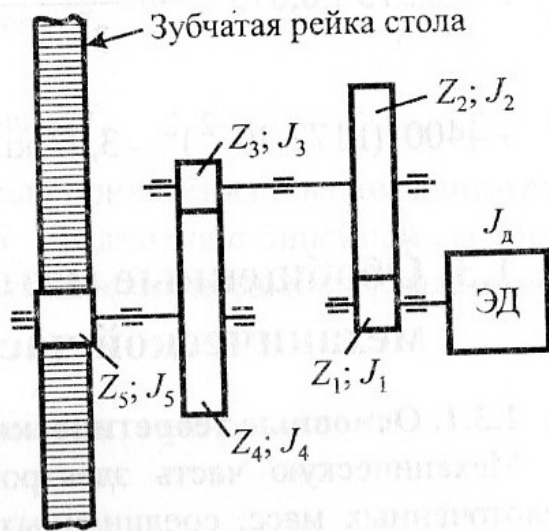


Рис. 3.5. Кинематическая схема электропривода стола продольно-строгольного станка

Решение. Определяем передаточные числа:

$$j_1 = Z_2/Z_1 = 51/17 = 3; \quad j_2 = Z_4/Z_3 = 86/19 = 4,526; \quad j = j_1 \cdot j_2 = 3 \cdot 4,526 = 13,58.$$

Находим радиус приведения

$$\rho = v/\omega = l/\varphi = (t_{\text{ш}} \cdot Z_5)/(2\pi \cdot j) = (34,5 \cdot 10^{-3} \cdot 29)/(2\pi \cdot 13,58) = 1,172 \cdot 10^{-2} \text{ м/рад.}$$

Записываем формулу для вычисления момента инерции электропривода стола в соответствии с кинематической схемой рис. 3.5:

$$J = J_d + J_1 + (J_2 + J_3)/j_1^2 + (J_4 + J_5)/(j_1^2 \cdot j_2^2) + m\rho^2,$$

в которую подставляем численные данные:

$$J = 2,375 + 0,073 + (0,05 + 0,043)/3^2 + (0,814 + 0,515)/13,58^2 + 4400 \cdot (1,172 \cdot 10^{-2})^2 = 3,07 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Пример 3. Шахтная подъемная лебедка поднимает груз $G = 60\,000 \text{ Н}$ (рис. 3.6). Определить приведенные к валу электродвигателя суммарный момент инерции ЭП подъемной лебедки и статический момент нагрузки, если даны номинальная скорость вращения электродвигателя $n_n = 494 \text{ об/мин}$, вес каната $G_k = 7\,800 \text{ Н}$, передаточное число редуктора $j = 11,5$, КПД редуктора $\eta = 0,94$, момент инерции барабана Б вместе с зубчатым колесом 2 $J_2 = 67,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, момент инерции двигателя вместе с зубчатым колесом 1 $J_1 = 106 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, диаметр барабана $D_6 = 3 \text{ м}$.

Решение.

1. Определим скорость подъема груза V_M :

$$V_M = \pi D_6 n_H / (j \cdot 60) = 3,14 \cdot 3 \cdot 494 / (11,5 \cdot 60) = 6,75 \text{ м/с.}$$

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

$$J = J_1 + J_2 / j^2 + ((G + G_K) / g) \cdot (V_M / \omega_H)^2 = 106 + 67,5 / (11,5)^2 + (60\,000 + 7\,800) / (9,8) \cdot (6,75 / 51,7)^2 = 224,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

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

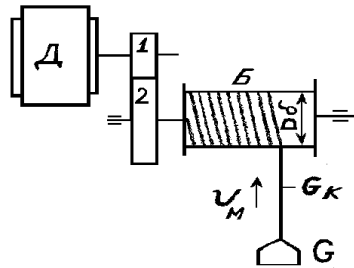


Рис. 3.6. Кинематическая схема подъемной лебедки

3. Приведенный к валу электродвигателя момент сопротивления нагрузки:

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

или

$$M_{c\uparrow} = ((G + G_K) / 9,8) \cdot \rho / \eta = (60\,000 + 7\,800) / 9,8 \cdot 6,75 / 51,7 / 0,94 = 9\,400 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Лекция 4. УРАВНЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

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

Изучением поведения электропривода в переходных режимах занимается *динамика электропривода*, используя уравнение движения электропривода. Рассмотрим данное уравнение. При работе электропривода под нагрузкой с постоянной скоростью вращения вращающий момент электродвигателя M уравновешивается статическим моментом сопротивления M_c , приложенным к валу электродвигателя со стороны рабочей машины, т.е.

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

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

$$M = M_c + M_{\text{дин}}, \quad (4.2)$$

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

$$M_v = M \pm M_0.$$

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

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

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

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

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

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

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

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

где J – момент инерции всех движущихся частей, кг·м²;

$d\omega/dt$ – угловое ускорение (замедление), рад/с²;

ω – угловая скорость, рад/с;

t – время, с.

При постоянном моменте инерции уравнение движения электропривода

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} \quad (4.2)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

где αM_n – средний момент при пуске;

α – коэффициент, учитывающий кратность среднего пускового момента по отношению к номинальному моменту электродвигателя M_n .

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

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

При электрическом *торможении электропривода* уравнение движения будет иметь вид

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

Из этого уравнения следует, что время торможения электропривода

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$M_n \omega_n = P_n; \quad M_c \omega_n = P_c; \quad J_d \delta \omega_n^2 = 2W_{к.д}; \\ J_m (\omega_n / j)^2 = J_m \omega_m^2 = 2W_{к.м}.$$

Здесь ω_n – номинальная угловая скорость вращения.

Тогда

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

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

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

P_n – номинальная мощность электродвигателя;

P_c – статическая мощность нагрузки на валу электродвигателя.

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

Тогда

$$j_{\text{опт}} = \omega_{\text{н опт}} / \omega_m.$$

Пример. Определим оптимальное передаточное число редуктора (т.е. номинальную частоту вращения электродвигателя) из условия минимума общего времени пуска и торможения для механизма с $n_m = 300$ об/мин и мощностью $P_c = 6,8$ кВт.

Решение. Принимаем асинхронный электродвигатель серии АО2 (закрытого, обдуваемого исполнения). Ближайшая номинальная мощность электродвигателя по каталогу $P_n = 7,5$ кВт. Электродвигатели этой мощности в данной серии выпускаются с $n_n = 2910, 1460, 970, 725$ об/мин. Решение задачи сводится к выбору одного из четырех возможных электродвигателей. Каталожные и расчетные данные приведены в таблице 4.1.

$$j_{\text{опт}} = 3,3.$$

Таблица 4.1

Каталожные данные				Расчетные данные		
Типы электродвигателя	P_n (кВт)	n_n (об/мин)	J_d (кг·м ²)	j	J^2	$J_d \cdot j^2$
АО2-42-2	7,5	2910	0,024	9,7	94,0	2,3
АО2-51-4	7,5	1460	0,06	4,7	21,9	1,3
АО2-52-6	7,5	970	0,11	3,3	10,8	1,19
АО2-61-8	7,5	725	0,21	2,4	5,8	1,22

Раздел 2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

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

Лекция 5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

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

Нужная скорость резания станка обеспечивается совместно электродвигателем и кинематической цепью станка. Если требуемая частота вращения шпинделя станка, например шлифовального, достаточно велика (1000...3000 об/мин), то вал электродвигателя можно связать непосредственно со шпинделем. А если же нужна низкая частота вращения шпинделя, то применять электродвигатель с пониженной номинальной частотой вращения нецелесообразно, так как при этом масса

электродвигателя возрастает примерно обратно пропорционально номинальной частоте его вращения при той же мощности. Возрастают размеры и стоимость электродвигателя. Такой привод становится конструктивно и экономически неприемлемым. Поэтому, как показал опыт, в станкостроении целесообразно использовать электродвигатели с относительно высокой номинальной частотой вращения (1000...3000 об/мин) и механическими передачами для последующего понижения частоты вращения до нужного значения.

При небольшой частоте вращения шпинделя электродвигатель может иметь различные номинальные частоты вращения. Чем быстрходнее двигатель, тем он меньше по габаритам и дешевле, но тем сложнее механическая передача от двигателя к рабочему органу станка. Лучшее решение выбирают из экономического сравнения возможных вариантов. Это относится и к приводам подачи и вспомогательных перемещений. Но в отдельных случаях в станкостроении применяют и тихоходные электродвигатели специальной конструкции для повышения жесткости передачи или упрощения конструкции.

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

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

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

Устройство асинхронных электродвигателей. Асинхронные электродвигатели состоят из двух основных частей: статора (неподвижная часть) и ротора (вращающаяся часть). В зависимости от конструкции ротора они делятся на двигатели с короткозамкнутым и с фазным ротором. Наиболее широкое применение получили АД с короткозамкнутым ротором, так как они не имеют скользящих контактов и являются самыми простыми и дешевыми двигателями.

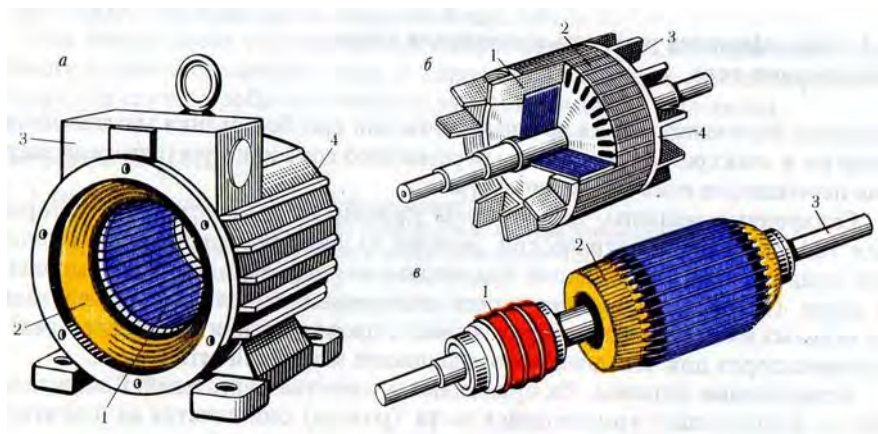


Рис. 5.1. Конструкция асинхронных двигателей

Статор состоит из корпуса 4 (рис. 5.1, а), магнитопровода 1 и обмотки 2. Корпус выполняют в двигателях небольшой мощности литым из чугуна, стали или алюминиевого сплава, в мощных двигателях – сварным. По торцам к корпусу крепят подшипниковые щиты. Магнитопровод набирают из колец, отштампованных из листовой электротехнической стали. На внутренней поверхности магнитопровода имеются пазы, в которые закладывается трехфазная обмотка статора, представляющая собой симметричную систему из трех обмоток фаз. Начала первой, второй и третьей обмоток фаз обозначают соответственно С1, С2 и С3, а концы их – С4, С5 и С6. Выводы обмоток фаз присоединяют к зажимам коробки выводов 3, что позволяет соединять обмотки в звезду или в треугольник и благодаря этому подключать двигатель в сеть с различным напряжением, например 380 или 220 В.

В статоре двигателя с фазным ротором на одном из подшипниковых щитов имеется щеточное устройство.

Ротор состоит из магнитопровода, набранного из листовой электротехнической стали, обмотки и вала. Обмотку короткозамкнутого ротора изготавливают обычно заливкой магнитопровода ротора расплавленным алюминием, который при заполнении пазов магнитопровода 2 (рис. 5.1, б) образует стержни 1 обмотки. Одновременно образуются короткозамыкающие кольца 4 и вентиляционные лопасти 3. Обмотку 2 фазного ротора (рис. 5.1, в) выполняют изолированным проводом, располагаемым в пазах магнитопровода, аналогично обмотке статора. Концы обмоток фаз соединяют между собой, а начала, обозначаемые Р1, Р2 и Р3, присоединяют к расположенным на валу 3 контактными кольцам 1.

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

Схема асинхронного электродвигателя с *короткозамкнутым ротором* приведена на рис. 5.2, а, с *фазным ротором* – на рис. 5.2, в, а соответствующие им механические характеристики в двигательном режиме на рис. – 5.1, 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

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

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

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

$$n_0 = 60 f_1 / p,$$

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

Принцип действия асинхронного электродвигателя заключается в следующем. Трехфазный ток, протекающий по обмотке статора, создает вращающееся магнитное поле с частотой вращения n_0 (или угловой скоростью 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. Под действием ЭДС ротора в замкнутых его обмотках протекают токи. Эти токи (по закону Ленца) стремятся своим магнитным полем ослабить вызвавшее их магнитное поле статора. Механическое взаимодействие токов ротора с вращающимся магнитным полем статора приводит к тому, что ротор станет вращаться в ту же сторону, в какую вращается магнитное поле статора (в этом можно убедиться, применив *правило левой руки*).

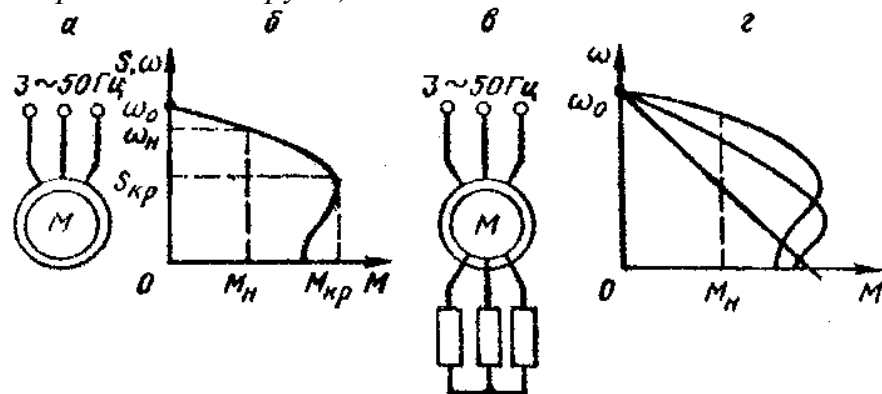


Рис. 5.2. Схемы и механические характеристики асинхронных двигателей

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

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

Двигатель называется *асинхронным* потому, что его ротор вращается *не синхронно* с вращающимся магнитным полем статора: скорость ротора ω не может равняться ω_0 , так как при их равенстве вращающееся поле не пересекало бы обмотку ротора, в ней отсутствовали бы токи и ротор не испытывал бы вращающего момента.

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

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

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

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

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

Величина критического момента M_k определяет перегрузочную способность электродвигателя. У асинхронных короткозамкнутых электродвигателей нормального исполнения кратность критического момента $\lambda_k = M_k / M_n = 1,8...2,5$, у двигателей краново-металлургической серии $\lambda_k = 2...3,5$. Величина критического момента пропорциональна квадрату напряжения в сети U_1 :

$$M_k = 3U_1^2 / (2\omega_0 X_k).$$

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

Уравнение механической характеристики асинхронного электродвигателя имеет вид (упрощённая формула Клосса, в которой активное сопротивление обмоток статора двигателя принято равным нулю)

$$M = 2M_k / (s/s_k + s_k/s). \quad (5.1)$$

При этом критическое скольжение s_k вычисляется через номинальное скольжение s_n и λ_k по выражению $s_k = s_n (\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1})$.

Формулой Клосса (уточненной или упрощенной) пользуются обычно при условии постоянства параметров схемы замещения АД. Однако в современных

асинхронных короткозамкнутых двигателях, имеющих глубокие пазы в роторе, параметры изменяются в достаточно широких пределах с изменением скольжения. Поэтому формулой Клосса можно пользоваться для приближенных расчетов. Имеются полуэмпирические формулы, например, формула К.А.Чекунова, которая дает удовлетворительные результаты только в области скольжений от критического до единицы. В [1] рассмотрена предложенная автором методика расчета механических характеристик АД при изменении скольжения от 0 до 2 (для двигательного режима и режима противовключения) по уточненной формуле Клосса и предварительно определенным по каталожным данным параметрам эквивалентной схемы АД для номинального режима работы.

В каталогах обычно приводят следующие технические данные асинхронного двигателя: P_H (кВт), n и n_0 (об/мин), λ_K и $\lambda_{II} = M_{II}/M_H$ (M_{II} – пусковой момент). По этим данным можно определить значения всех величин, необходимых для приближенных расчетов и определения механических характеристик по (5.1), из выражений: $\omega_H = \pi n_H / 30$, $\omega_0 = \pi n_0 / 30$, $M_H = P_H / \omega_H$; $M_K = \lambda_K M_H$; $s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0}$;

$$s_K = s_H (\lambda_K + \sqrt{\lambda_K^2 - 1}).$$

Из рис. 5.2 видно, что верхний (рабочий) участок естественной механической характеристики обладает большой жесткостью β ($\beta = dM/ds$). Увеличение сопротивления в цепи ротора (рис. 5.2, з) 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

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

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

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

Решение

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

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

б. Задаваясь значениями s для двигательного режима от 0 до 1, рассчитываем соответствующие им значения момента M (табл. 5.1) и строим характеристику (рис. 5.3).

Таблица 5.1

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

Асинхронный двигатель может работать в **трех** известных тормозных режимах.

Рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть можно получить, если к валу асинхронного двигателя, подключенного к сети, приложить добавочный момент по направлению вращения такой величины, чтобы ротор стал вращаться со скоростью выше синхронной ($\omega > \omega_0$). При этом скольжение будет отрицательным $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0 < 0$. В данном случае относительное движение проводников ротора в поле статора по сравнению с двигательным режимом изменится на обратное. Следовательно, изменится направление ЭДС в проводниках ротора и соответственно ток ротора, который, взаимодействуя с полем статора, создает электромагнитный момент и будет выполнять роль тормоза. Вырабатываемая при этом активная электрическая энергия в обмотке статора поступает в сеть. Такой режим торможения можно получить, например, в подъемных установках при опускании тяжелых грузов, в эскалаторах метро при спуске с большим количеством пассажиров и других установках с активным статическим моментом на валу электродвигателя. Активная мощность к тому же изменяет знак, т.е. электрическая машина работает генератором, преобразуя кинетическую энергию от активного момента (опускающегося груза и др.) в электрическую и отдавая ее в сеть. Переход работы из двигательного режима в генераторный происходит автоматически, поэтому механические характеристики являются продолжением характеристик двигательного режима и располагаются во II и IV квадратах (рис. 5.4, линии с двумя за-сечками).

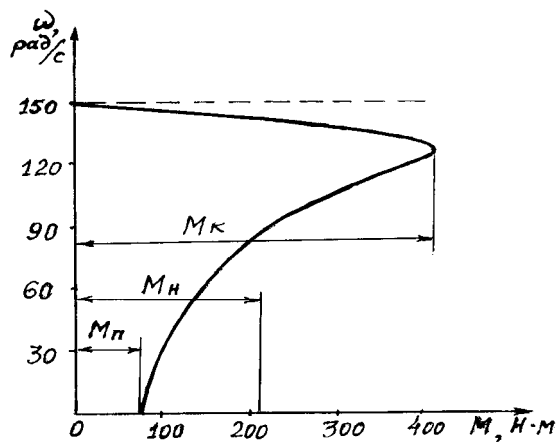


Рис. 5.3. Естественная механическая характеристика АД в двигательном режиме

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

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

и ток ротора превышает ток короткого замыкания.

Для ограничения величины тока в цепь ротора вводят ступень реостата. Механические характеристики в данном режиме торможения являются продолжением характеристик двигательного режима (при $s > 1$ или $\omega < 0$) и располагаются во II и IV квадратах (рис. 5.4, линии с четырьмя засечками). Таким образом, ротор двигателя, включенного на подъем, вращается в противоположную сторону, так как в цепь ротора введено большое сопротивление и момент электродвигателя достигает момента сопротивления лишь при отрицательном скольжении (на рис. 5.4, точка *Б*). Такой режим часто используется в металлургических кранах при спуске грузов в тормозном режиме.

Торможение **противовключением** может осуществляться реверсом магнитного поля статора (переменой мест двух фаз статора). Одновременно в цепь ротора вводится ступень реостата, ограничивающая ток и увеличивающая тормозной момент. На рис. 5.4 показан график перехода асинхронного двигателя с фазным ротором в режиме торможения **противовключением**. В точке 1 двигательного режима осуществляется реверс и двигатель переходит на работу в точку 2, по линии 2–3 осуществляется интенсивное торможение **противовключением**. В точке 3 двигатель останавливается и его необходимо отключить от сети, иначе он начнет вращаться в противоположном направлении.

В режиме **динамического торможения** двигатель отключают от сети переменного тока и две фазы обмотки статора подключают к источнику постоянного тока. В статоре создается неподвижное в пространстве магнитное поле, которое индуцирует в обмотках вращающегося ротора ток. Взаимодействие его с неподвижным полем статора создает тормозной момент. На рис. 5.4 показаны механические характеристики в этом режиме при различных значениях сопротивления цепи ротора (линии с тремя засечками).

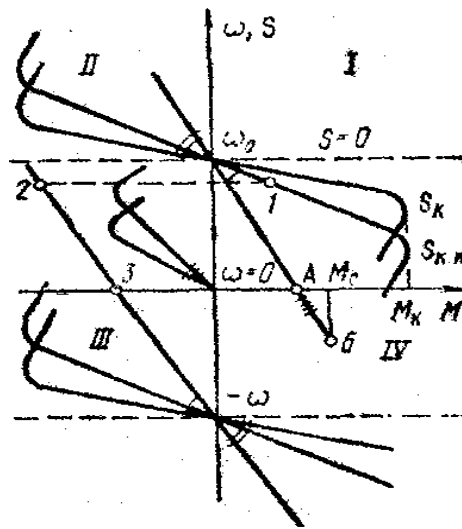


Рис. 5.4. Совмещенные механические характеристики асинхронной машины

На рис. 5.5 представлена схема осуществления динамического торможения с самовозбуждением, когда для возбуждения используется выпрямленное напряжение обмотки ротора. Условие самовозбуждения наступает лишь при определенном граничном значении угловой скорости $\omega_{гр}$, которое зависит от суммарного сопротивления фазы ротора. Таким образом, в интервале от 0 до $\omega_{гр}$ условие самовозбуждения отсутствует, а механическая характеристика (рис. 5.5, б) совпадает с осью ординат. При $\omega = \omega_{гр}$ двигатель самовозбуждается и его момент быстро увеличивается до значения, определяемого моментом нагрузки на валу. Увеличение сопротивления роторной цепи приводит к возрастанию $\omega_{гр}$ (рис. 5.5, кривая 2). Механические характеристики имеют достаточно высокую жесткость, что позволяет получать низкие устойчивые скорости спуска грузов. Достоинством этого режима торможения является экономичность, поскольку при спуске груза энергия из сети не потребляется.

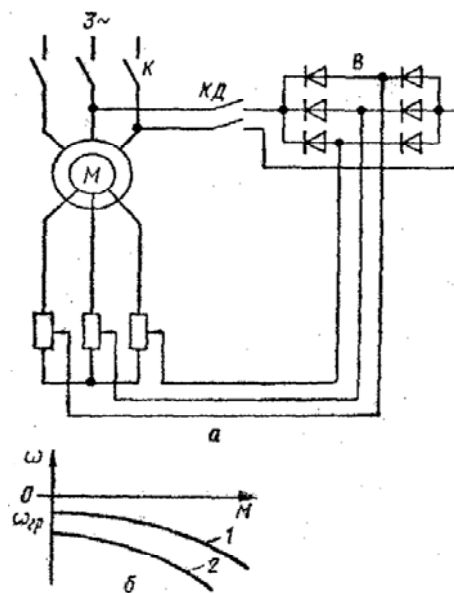


Рис. 5.5. Схема (а) и механические характеристики (б) асинхронного двигателя при динамическом торможении с самовозбуждением

Пуск асинхронных электродвигателей. Пусковые свойства асинхронных двигателей (АД) характеризуются кратностью пускового момента $\lambda_{\text{п}} = M_{\text{п}} / M_{\text{ном}}$, кратностью пускового тока $\lambda_{\text{п}} = I_{\text{п}} / I_{\text{ном}}$, а также сложностью и экономичностью пуска. Начальный пусковой ток превышает номинальный в 6 – 10 раз, так как в момент пуска скорость пересечения вращающимся полем проводников ротора и ЭДС ротора имеют наибольшие значения. Поэтому ток ротора и индуктивно связанный с ним ток статора возрастут. По мере разгона двигателя ЭДС ротора и токи ротора и статора уменьшаются.

При пуске АД меняется также и частота тока в роторе, которая, как и ЭДС ротора, пропорциональна разности скоростей вращения поля статора и ротора. В начальный момент пуска частота тока в роторе f_2 равна частоте тока в статоре (т.е. частоте сети f_1). При разгоне двигателя частота f_2 уменьшается в соответствии с выражением $f_2 = f_1 \cdot S$. Одновременно с частотой пропорционально скольжению S меняется и индуктивное сопротивление ротора. В начальный момент пуска при наибольшем индуктивном сопротивлении ротора оно преобладает над активным сопротивлением и $\cos \varphi_2$ имеет малое значение. Поэтому, несмотря на большой пусковой ток, начальный пусковой момент АД мал.

Пуск АД с короткозамкнутым ротором осуществляется в основном *непосредственным включением их в сеть (это так называемый прямой пуск)*. Большой пусковой ток при редких пусках не вызывает опасного перегрева обмоток, так как время его действия незначительно. Однако при пуске мощных двигателей, соизмеримых по мощности с питающим трансформатором, в момент пуска наблюдается резкое снижение напряжения в сети, которое может неблагоприятно отразиться на работе других электроприемников.

Если питающая сеть недостаточно мощная, применяется пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором *при пониженном напряжении* с помощью реактора (индуктивная катушка) L или автотрансформатора (рис. 5.6). При реакторном пуске сначала замыкается линейный контактор КМ1, а после разгона двигателя – контактор КМ2, а КМ1 отключается. При автотрансформаторном пуске сначала включаются контакторы КМ1 и КМ3, а после разгона двигателя КМ1 и КМ3 отключаются, а контактор КМ2 включает двигатель на полное напряжение сети.

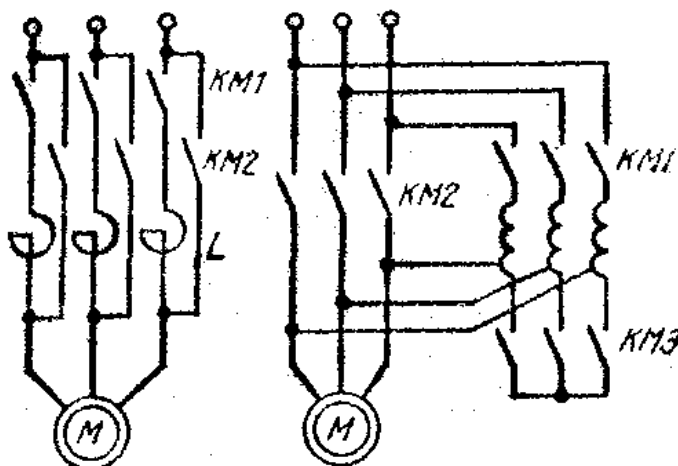


Рис. 5.6. Схемы пуска АД с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении

При понижении напряжения на двигателе во время пуска уменьшается пусковой ток. Недостатком такого способа является одновременное уменьшение пускового момента, причем при снижении напряжения, например в 2 раза, пусковой ток уменьшится также в 2 раза, а пусковой момент – в 4 раза. Поэтому пуск при пониженном напряжении можно применять только для двигателей, приводящих во вращение рабочие машины, для которых не нужен большой пусковой момент (центробежные насосы, вентиляторы и др.).

Пуск АД с фазным ротором. Для ограничения бросков тока и одновременного повышения пускового момента пуск АД с фазным ротором, особенно средней и большой мощности, осуществляется через специальное пусковое устройство. Простейшее из них – пусковой реостат (рис. 5.7, а), секции которого изготавливают из стали, чугуна, хрома, фехраля и других сплавов с повышенным сопротивлением. По мере разгона двигателя реостат выводится ступенями (рис. 5.7, б). Естественная (т.е. при закороченной обмотке ротора - выведенном пусковом реостате) механическая характеристика показана на рис.5.7, б кривой 4. Начальный пусковой момент составляет $(0,7...0,8) M_{ном}$, а пусковой ток равен $(8...10) I_{ном}$. Для увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока в цепь ротора через контактные кольца и щетки ХА (рис. 5.7, а) включают пусковой реостат с активным сопротивлением. При этом увеличивается критическое

скольжение и характеристики смещаются (кривые 1, 2 и 3). Пусковой реостат состоит из нескольких ступеней ($R1$, $R2$, $R3$), причем полное сопротивление реостата принимают таким, чтобы $S_{кр} = 1$, а $M_{п} = M_{max}$.

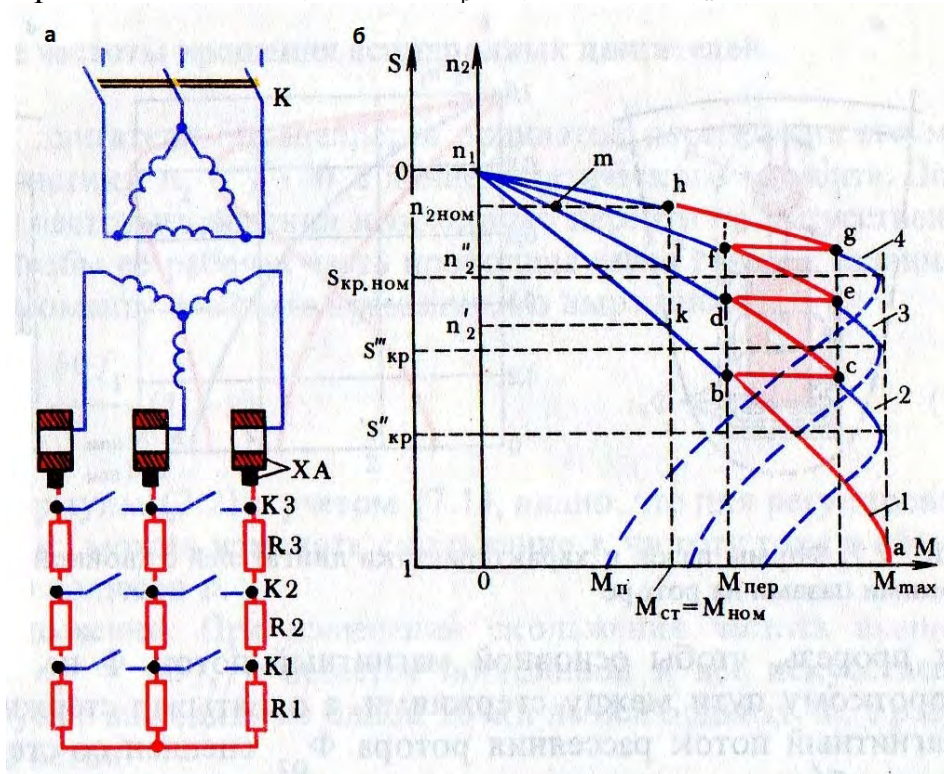


Рис. 5.7. Электрическая схема АД с фазным ротором (а) и графики пусковых характеристик (б)

Для пуска включают контактор K при полностью введенном реостате. Двигатель начинает разгоняться по характеристике 1 от точки a . Момент двигателя при разгоне уменьшается. Если не производить переключений, двигатель разгонится до точки k ($M = M_{ст}$). Однако ранее, чем это произойдет, при $M = M_{пер} = (1,1...1,2) M_{ст}$ (точка b) включают контактор $K1$, который закорачивает ступень $R1$ роторного реостата. В результате ток и момент увеличиваются и двигатель переходит в точку c на характеристике 2. Далее процесс пуска происходит аналогично, и после замыкания последней ступени $R3$ пускового реостата двигатель выходит на естественную характеристику 4 (точка g) и разгоняется по ней до точки h , в которой $M = M_{ст}$.

В современных промышленных установках пусковой реостат имеет 5 – 7 ступеней, которые выводятся автоматически.

Расчет пусковых реостатов. Для расчета пусковых реостатов используют различные методы. Целью расчета является определение величин сопротивлений каждой пусковой секции (и ступеней) и всего реостата в целом. После этого производится выбор пускового реостата из стандартных элементов (ящичков).

Рассмотрим *аналитический метод* расчета пускорегулировочных и тормозных сопротивлений асинхронного двигателя с фазным ротором [1].

Механические характеристики АД в рабочем диапазоне изображаются линейными зависимостями, т.е. в относительных единицах

$$v=1-\rho\cdot\mu, \quad (5.2)$$

где $v=\omega/\omega_0$; $\mu=M/M_H$; $\rho=R_{2\Sigma}/R_H$; $R_H=U_{2H}/(\sqrt{3}\cdot I_{2H})$;

ω_0 – синхронная угловая скорость;

$R_{2\Sigma}$ – суммарное активное сопротивление фазы ротора, состоящее из собственного сопротивления фазы ротора $R_{2.0}$ и сопротивлений включенных секций пускового реостата;

I_{2H} – номинальный ток ротора;

U_{2H} – номинальная линейная ЭДС ротора.

Пусковой реостат рассчитывается таким образом, чтобы при пуске электромагнитный момент АД находился в пределах от μ_1 до μ_2 , при этом отношение моментов

$$\lambda = \mu_1 / \mu_2 = \rho_n / \rho_{n-1} = \dots = \rho_2 / \rho_1 = \rho_1 / \rho_e,$$

где $\rho_e = R_{2.0} / R_H = S_H$.

$$\text{Тогда } \rho_n = \rho_e \lambda^n = \lambda^n \cdot S_H, \quad (5.3)$$

где n – число ступеней пускового реостата.

В начальный момент пуска $v = 0$, $\rho = \rho_n$, $\mu = \mu_1$. Подставляя эти значения в уравнение (5.2) и решая его относительно ρ_n , получим $\rho_n = 1/\mu_1$. Теперь решая (5.3) относительно λ при $\rho_n = 1/\mu_1$, получим соотношение, связывающее числа λ , μ_1 , n и S_H :

$$\lambda = \sqrt[n]{1/(\mu_1 \cdot S_H)}. \quad (5.4)$$

При расчетах обычно задаются величиной $\mu_1 = (0,8 - 0,9) \lambda_{к}$ и числом пусковых ступеней $n = (3 - 5)$, вычисляют отношение моментов

$$\lambda = \sqrt[n]{1/(\mu_1 \cdot S_H)}$$

и находят $\mu_2 = \mu_1 / \lambda$.

Таким образом, относительные значения сопротивлений пусковых ступеней будут равны (рис. 5.8):

$$\rho_1 = \rho_e \lambda = S_H \lambda; \rho_2 = S_H \lambda^2; \dots; \rho_n = S_H \lambda^n.$$

Сопротивления секций реостата вычисляются таким образом:

$$\rho_{с.1} = (\lambda - 1) S_H; \rho_{с.2} = \lambda (\lambda - 1) S_H; \dots \rho_{с.n} = \lambda^{n-1} (\lambda - 1) S_H.$$

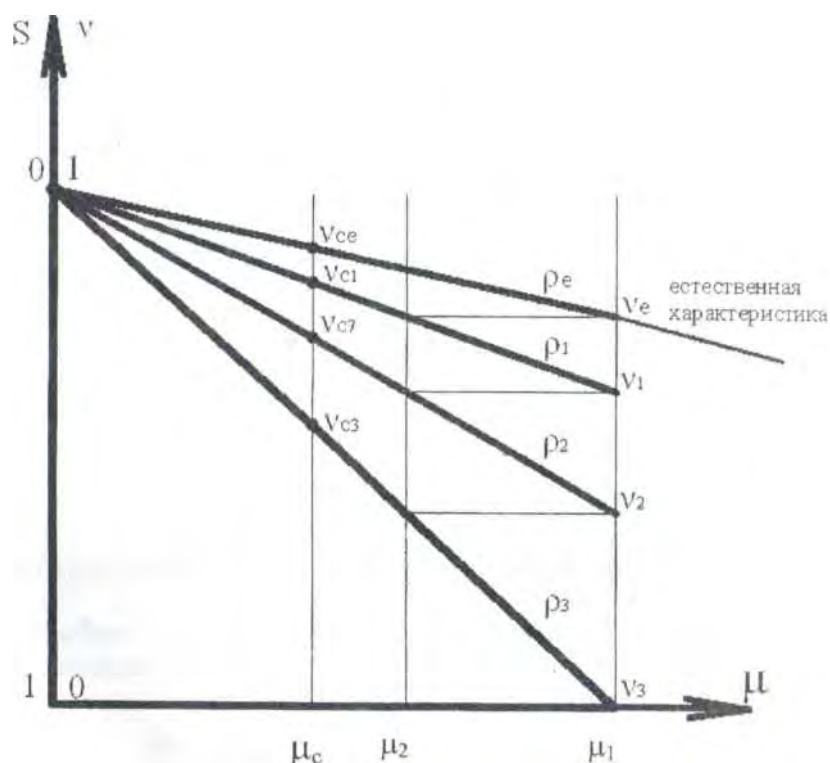


Рис. 5.8. Механические характеристики АД с фазным ротором при пуске в 3 ступени

Однако можно использовать и **графический метод расчета** [7]. Он основан на использовании аналитического выражения (5.2) механических характеристик АД, приближенно считая их в рабочей части линейными, и состоит в следующем. Вначале строят естественную механическую характеристику двигателя, рассчитанную по формуле Клосса, (рис. 5.9). Затем задаются моментами при пуске: наибольшим $M_1 = (0,8 - 0,9)M_k$ и моментом переключения $M_{пер}$, величина которого зависит от числа ступеней реостата, но должна быть всегда больше M_c . Из точек M_1 и $M_{пер}$ проводят две вертикальные линии до пересечения с естественной механической характеристикой (точки *a*, *б*). Через эти две точки проводят прямую до пересечения с горизонталью $s = 0$ (точка *t*). Из точки *t* проводят луч *t-i* и из полученной точки *k* на вертикали $M_{пер}$ проводят горизонталь *k-g*. Аналогично из точки *t* проводят лучи *t-q*, *t-e*, *t-c*, *t-a* и из точек *h*, *f*, *d* проводят горизонтали *h-e*, *f-c*, *d-a*. Последняя горизонталь должна попасть в точку *a*. В противном случае все графическое построение следует произвести вновь, изменив в нужном направлении момент $M_{пер}$ (уменьшив его или увеличив).

Сопротивления ступеней пускового реостата затем определяют по выражениям:

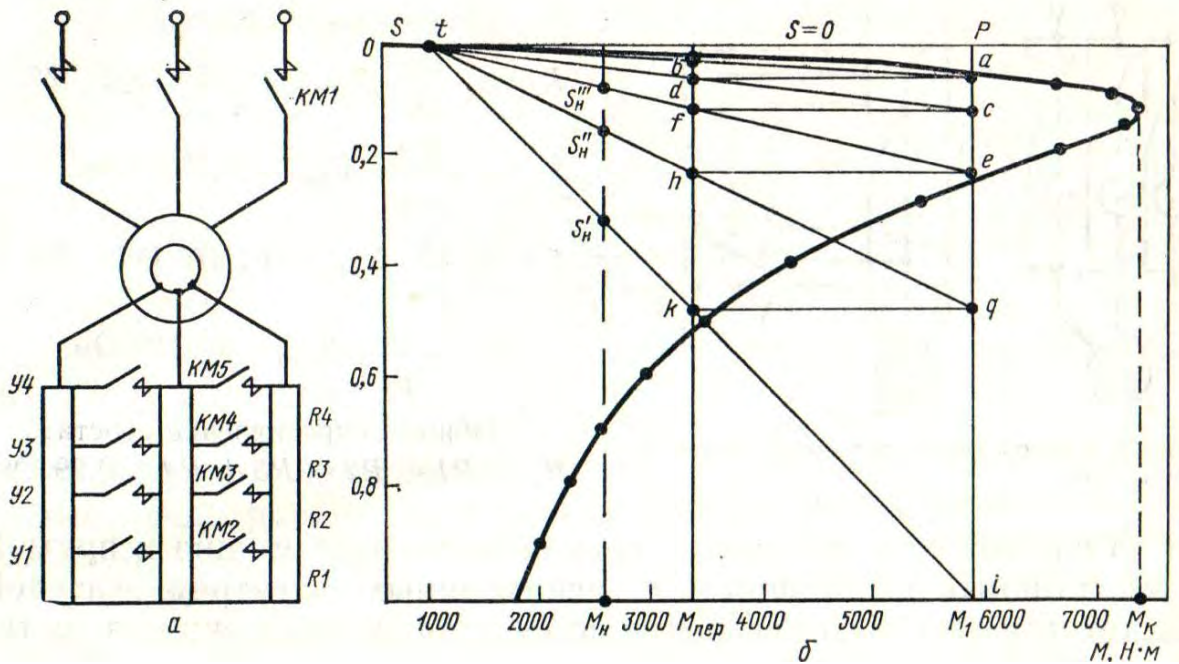


Рис. 5.9. К расчету пускового реостата

$$R1 = q-i / p-a \cdot R_{\text{рот}}; \quad R2 = e-g / p-a \cdot R_{\text{рот}}; \quad R3 = c-e / p-a \cdot R_{\text{рот}}; \quad R4 = a-c / p-a \cdot R_{\text{рот}}.$$

Величину собственного активного сопротивления фазы ротора $R_{\text{рот}}$ определяют из выражения $R_{\text{рот}} = E_{2н} S_n / (\sqrt{3} I_{2н})$, где $E_{2н}$, $I_{2н}$ – соответственно номинальная линейная ЭДС и номинальный ток обмотки ротора.

Общее сопротивление ступеней пускового реостата

$$R_{\text{п}} = R1 + R2 + R3 + R4.$$

Пример 1. Рассчитаем сопротивления секций пускового реостата *графическим методом* для АД с фазным ротором типа МТН713-10. Пуск двигателя осуществляется в четыре ступени. Механические характеристики построены на рис. 5.9. Наибольший момент при пуске примем равным $M_1 = 0,8M_{\text{max}} = 0,8 \cdot 7400 = 5920 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Момент переключения $M_{\text{пер}} = 1,3M_n = 1,3 \cdot 2607 = 3380 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Активное сопротивление фазы ротора, приняв из каталога номинальную силу тока ротора $I_{2н} = 244 \text{ А}$, а номинальную линейную ЭДС ротора $E_{2н} = 408 \text{ В}$,

$$R_{\text{рот}} = E_{2н} S_n / (\sqrt{3} I_{2н}) = (408 \cdot 0,023) / (1,73 \cdot 244) = 0,02225 \text{ Ом}.$$

Сопротивления секций пускового реостата:

$$R1 = q-i / p-a \cdot R_{\text{рот}} = 0,156 \text{ Ом}; \quad R2 = e-g / p-a \cdot R_{\text{рот}} = 0,0786 \text{ Ом}; \quad R3 = c-e / p-a \cdot R_{\text{рот}} = 0,0376 \text{ Ом}; \quad R4 = a-c / p-a \cdot R_{\text{рот}} = 0,0179 \text{ Ом}.$$

Общее сопротивление пускового реостата

$$R_{\text{п}} = R1 + R2 + R3 + R4 = 0,29 \text{ Ом}.$$

Замечание. Построение искусственных линейных механических характеристик АД при пуске значительно упрощается, если после принятия конкретного

значения момента M_1 (или μ_1) вычислить значение λ по формуле (5.4), а затем момент переключения M_2 (или μ_2).

Пример 2. Рассчитаем сопротивления секций пускового реостата *аналитическим методом* для АД с фазным ротором типа 4МТФ(Н)200ЛВ6, имеющего следующие данные: $P_n=30$ кВт, $U_n=380/220$ В; $n_n=935$ об/мин; $I_{1.n}=75$ А. Число пусковых ступеней $n=5$.

Решение. Рассчитываем необходимые величины:

- номинальное скольжение
 $s_n = (n_0 - n_n) / n_0 = (1000 - 935) / 1000 = 0,065$;
- номинальное сопротивление ротора
 $R_{2n} = U_{2n} / (\sqrt{3} \cdot I_{2n}) = 235 / (\sqrt{3} \cdot 73) = 1,86$ Ом;
- активное сопротивление фазы ротора
 $R_2 = R_{2n} \cdot s_n = 1,86 \cdot 0,065 = 0,121$ Ом;
- синхронная угловая скорость АД
 $\omega_0 = \pi n_0 / 30 = \pi \cdot 1000 / 30 = 104,72$ рад/с;
- номинальная угловая скорость
 $\omega_n = \pi n_n / 30 = \pi \cdot 935 / 30 = 97,91$ рад/с;
- номинальный момент
 $M_n = P_n \cdot 10^3 / \omega_n = 30 \cdot 10^3 / 97,91 = 306,4$ Н·м.

Для расчета сопротивлений используем линеаризованные механические характеристики АД. В относительных единицах линеаризованные механические характеристики АД записывается в виде $v = 1 - \mu \cdot \rho$, где $v = \omega / \omega_0$; $\mu = M / M_n$; $\rho = R_2 / R_n$.

Предварительная ступень сопротивления в крановых асинхронных электроприводах выбирается таким образом, чтобы при неподвижном двигателе ($v = 0$) относительный его момент составлял $\mu_{пр} = 0,5 \div 0,7$.

Примем $\mu_{пр} = 0,7$, тогда получим $\rho_{пр} = 1 / \mu_{пр} = 1 / 0,7 = 1,428$.

Дальнейший расчет сопротивлений выполняется, исходя из максимального момента на втором положении рукоятки командоконтроллера (первая пусковая ступень). Примем максимальный пусковой момент $\mu_1 = 1,7$. При автоматическом пуске колебания момента (и соответственно тока) будут находиться в пределах

$$\lambda = \frac{\mu_1}{\mu_2} = n \sqrt{\frac{1}{s_{ном} \mu_1}} = 5 \sqrt{\frac{1}{0,065 \cdot 1,7}} = 1,55,$$

откуда находим $\mu_2 = \mu_1 / \lambda = 1,7 / 1,55 = 1,1$.

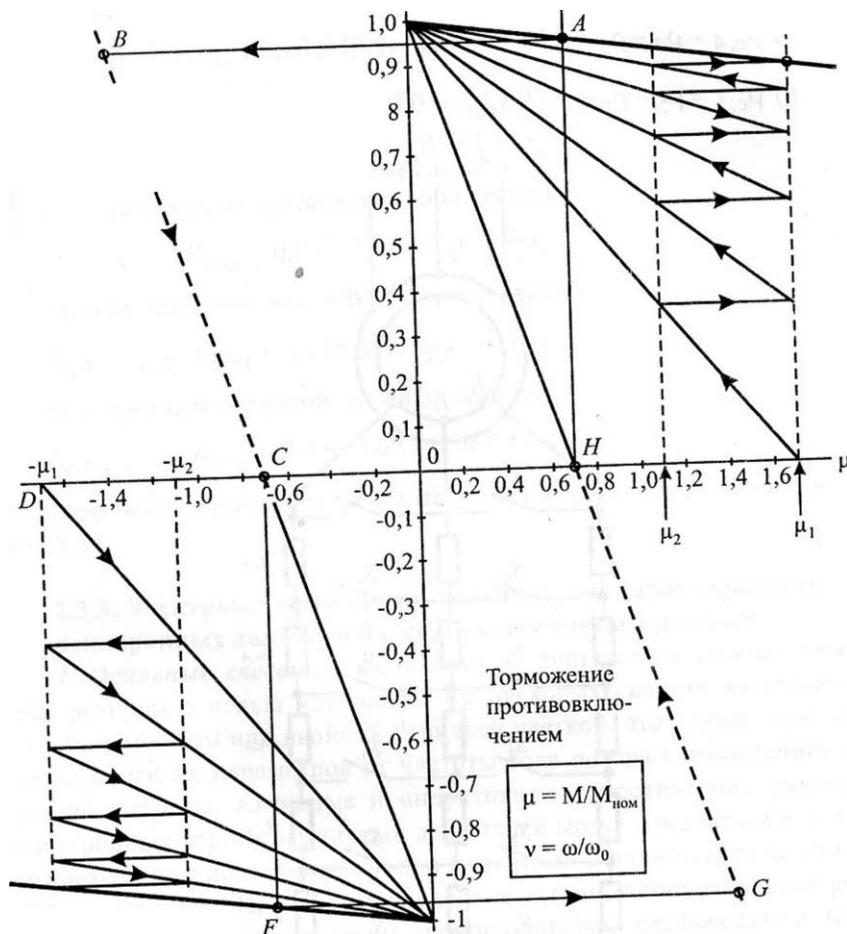


Рис. 5.10. Механические характеристики АД с фазным ротором при пуске и торможении

Теперь рассчитываем относительные значения сопротивлений пусковых ступеней: $\rho_1 = 1/\mu_1 = 1/1,7 = 0,588$; $\rho_2 = \rho_1/\lambda = 0,588/1,55 = 0,379$;
 $\rho_3 = \rho_2/\lambda = 0,379/1,55 = 0,244$; $\rho_4 = \rho_3/\lambda = 0,244/1,55 = 0,157$;
 $\rho_5 = \rho_4/\lambda = 0,157/1,55 = 0,101$.

Механические характеристики АД в относительных единицах, соответствующие рассчитанным ступеням, приведены на рис. 5.10.

Рассчитываем относительные значения сопротивлений отдельных секций пускового реостата: $\rho_{с.пр} = \rho_{пр} - \rho_1 = 1,428 - 0,588 = 0,84$;
 $\rho_{с.1} = \rho_1 - \rho_2 = 0,588 - 0,379 = 0,209$; $\rho_{с.2} = \rho_2 - \rho_3 = 0,379 - 0,244 = 0,135$;
 $\rho_{с.3} = \rho_3 - \rho_4 = 0,244 - 0,157 = 0,087$; $\rho_{с.4} = \rho_4 - \rho_5 = 0,157 - 0,101 = 0,056$;
 $\rho_{с.5} = \rho_5 - \rho_0 = 0,101 - 0,065 = 0,036$.

Абсолютные значения сопротивлений секций будут равны:

1) сопротивление секции противовключения

$$R_{с.пр} = \rho_{с.пр} \cdot R_{н} = 0,84 \cdot 1,86 = 1,562 \text{ Ом};$$

2) сопротивления пусковых секций:

$$R_{c.1} = \rho_{c.1} \cdot R_H = 0,209 \cdot 1,86 = 0,389 \text{ Ом}; \quad R_{c.2} = \rho_{c.2} \cdot R_H = 0,135 \cdot 1,86 = 0,251 \text{ Ом};$$

$$R_{c.3} = \rho_{c.3} \cdot R_H = 0,087 \cdot 1,86 = 0,162 \text{ Ом}; \quad R_{c.4} = \rho_{c.4} \cdot R_H = 0,056 \cdot 1,86 = 0,104 \text{ Ом};$$

$$R_{c.5} = \rho_{c.5} \cdot R_H = 0,036 \cdot 1,86 = 0,067 \text{ Ом}.$$

Включение пускового реостата в цепь ротора АД показано на рис. 5.11.

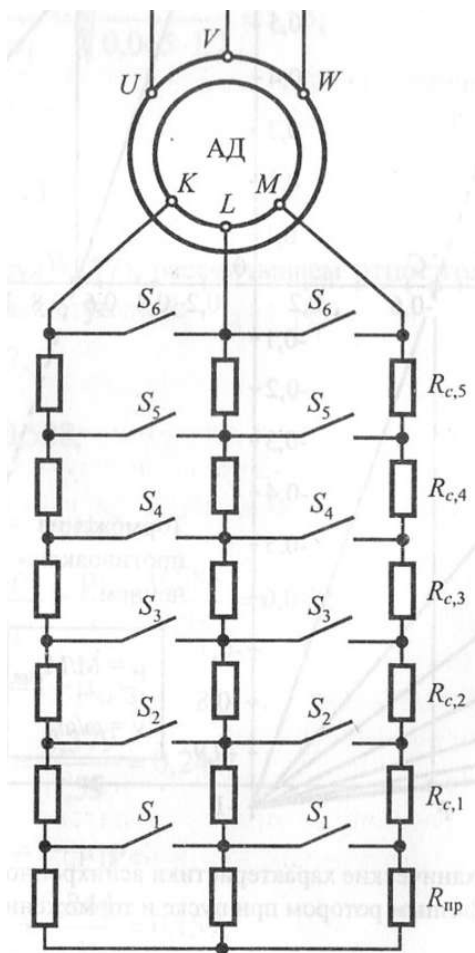


Рис. 5.11. Схема включения пуско-регулирующих сопротивлений АД с фазным ротором

Реверсирование асинхронных электродвигателей. Реверсирование, т.е. изменение направления вращения, производится путем реверсирования вращающегося магнитного поля статора. Для этого надо изменить на обратный порядок следования фаз А, В, С сети по отношению к обмоткам фаз статора, поменяв местами на зажимах двигателя или магнитного пускателя провода любых двух фаз.

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

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

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

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

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

менение в металлургических кранах из-за простоты и малой стоимости применяемой аппаратуры.

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

Регулирование скорости асинхронного привода *изменением питающего напряжения* осуществляется путем включения по встречно-параллельной схеме в каждую фазу статора двух тиристоров (рис. 5.10, а). Изменяя угол регулирования тиристоров, можно плавно регулировать величину подводимого к статору напряжения. При этом снижается критический момент двигателя и увеличивается наклон механических характеристик, так как вращающий момент двигателя пропорционален квадрату напряжения фазы статора (рис. 5.10, б). Практически этот метод регулирования находит применение лишь для двигателей с фазным ротором в замкнутых системах управления с тиристорными регуляторами напряжения.

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

Схема синхронного двигателя приведена на рис. 5.11. Статор СД выполняется аналогично статору АД с трехфазной обмоткой, подключаемой к сети переменного тока. Ротор имеет обмотку возбуждения ОВ, питаемую от источника постоянного тока, и пусковую короткозамкнутую обмотку ОП в виде беличьей клетки, предназначенную для пуска СД.

Вращающий момент в СД возникает в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, и магнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения (или постоянными магнитами на роторе). Взаимодействие этих полей может создавать постоянный по направлению вращающий момент только в том случае, когда ротор будет вращаться со скоростью ω_0 , т.е. синхронно с вращающимся полем статора.

Непосредственный пуск СД подачей напряжений на обмотки статора и возбуждения невозможен, так как ротор обладает значительным моментом инерции и не может мгновенно изменить свою частоту вращения (n) от нуля до частоты вращения магнитного поля статора (n_0). Поэтому для пуска синхронного двигателя необходимо предварительно разогнать его до синхронной или близкой к ней частоты вращения, т.е. применяют *асинхронный пуск*. Обмотка возбуждения дви-

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

Механическая характеристика синхронного двигателя абсолютно жесткая и представляет собой прямую, параллельную оси моментов, т.е. скорость двигателя независимо от нагрузки остается постоянной и равной скорости вращения магнитного поля статора. При увеличении нагрузки на валу электродвигателя возрастает лишь угол сдвига (θ) оси полюсов ротора относительно полюсов вращающегося поля статора (или угол сдвига вектора напряжения статора относительно вектора ЭДС, индуктированной в обмотке статора полем ротора). Зависимость момента двигателя M от угла θ называется **угловой характеристикой синхронного двигателя**, которая представляет собой синусоиду: $M = M_{\max} \sin\theta$.

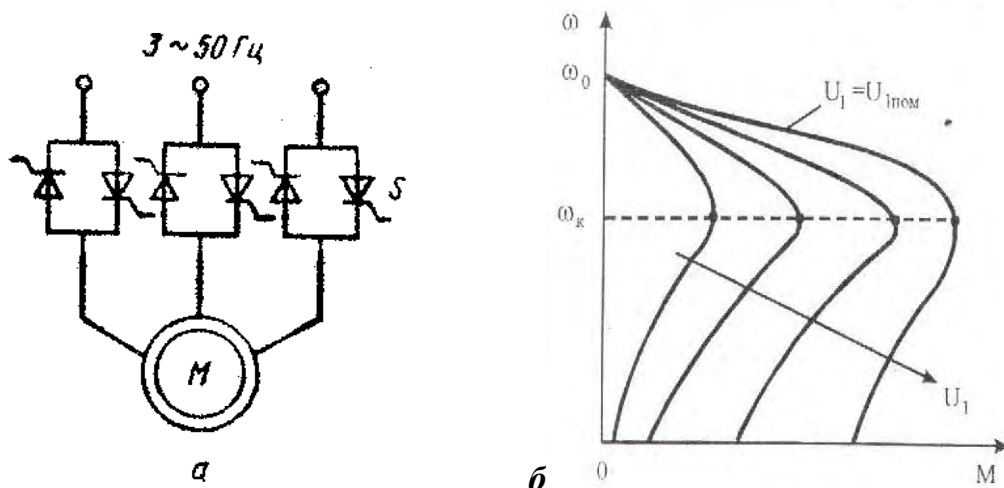


Рис. 5.10. Бесконтактное регулирование напряжения асинхронного двигателя

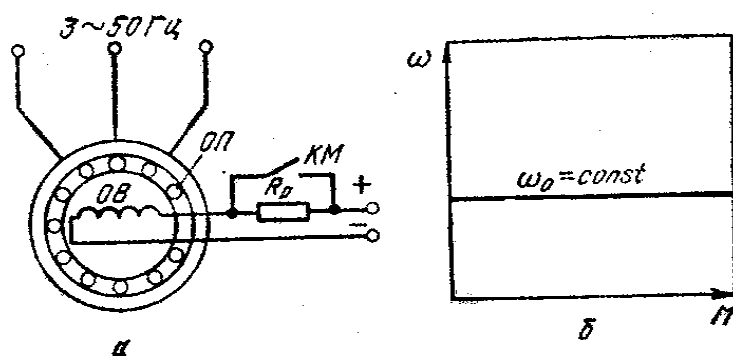


Рис. 5.11. Схема синхронного двигателя (а) и его механическая характеристика (б)

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

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

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

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

Синхронный двигатель может работать с различным углом сдвига φ между током и напряжением статора, что является его особенностью и ценным свойством, так как угол φ можно регулировать путем изменения тока возбуждения, регулируя этим самым потребляемую из сети реактивную мощность. В процессе изменения тока возбуждения вектор тока статора двигателя может совпадать с вектором напряжения сети, отставать от него или опережать. В случае совпадения данных векторов (при некотором значении тока возбуждения угол φ равен нулю, т.е. напряжение и ток статора совпадают по фазе, а синхронный двигатель представляет собой чисто активную нагрузку) двигатель потребляет из сети только активную мощность ($\cos\varphi = 1$). Если ток возбуждения уменьшить относительно этого значения (недовозбужденный двигатель), то ток статора будет отставать от напряжения, а двигатель будет представлять собой активно-индуктивную нагрузку. При увеличении тока возбуждения (перевозбужденный двигатель) ток статора будет опережать напряжение сети по фазе, а двигатель будет представлять собой ак-

тивно-емкостную нагрузку, т.е. двигатель будет отдавать в сеть реактивную мощность. Это свойство синхронного двигателя широко используют для компенсации реактивных нагрузок предприятия. В данном случае синхронный двигатель выполняет кроме основной функции также и функцию синхронного компенсатора, что дает большой экономический эффект.

Лекция 6. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Устройство машин постоянного тока. Машин постоянного тока состоят из двух основных частей: неподвижной – индуктора и вращающейся – якоря. В индуктор входят: станина 1 (рис. 6.1, а); главные полюсы, состоящие из сердечника 3 и обмотки возбуждения 4; добавочные полюсы 2. Главные полюсы предназначены для создания основного магнитного поля машины (поля возбуждения). К индуктору с двух сторон крепятся подшипниковые щиты, на одном из которых имеется щеточное устройство, состоящее из поворотной траверсы и щеткодержателей.

Якорь (рис. 6.1, б) состоит из сердечника якоря 2, набранного из листов электротехнической стали; обмотки якоря 3 и коллектора 4, который собирают из медных пластин, изолированных друг от друга и от вала. К коллекторным пластинам припаивают начала и концы секций обмотки якоря. Сердечник якоря и коллектор закреплены на валу 5. Со стороны, противоположной коллектору, на вал устанавливают вентилятор 1.

Механические характеристики электродвигателей постоянного тока. Электродвигатели постоянного тока могут иметь независимое, параллельное, последовательное или смешанное возбуждение (рис. 6.2).

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

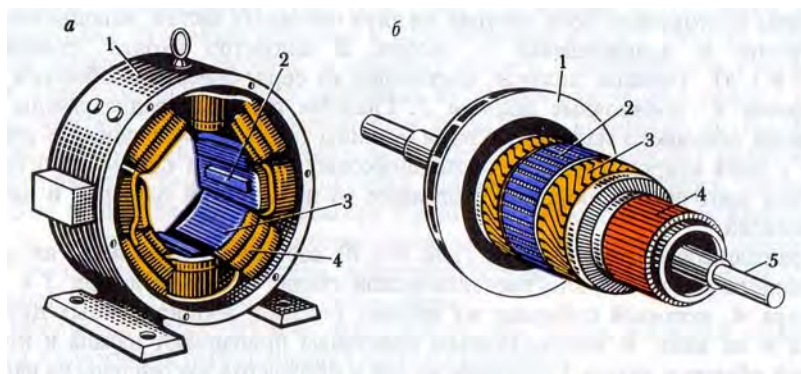


Рис. 6.1. Устройство машины постоянного тока

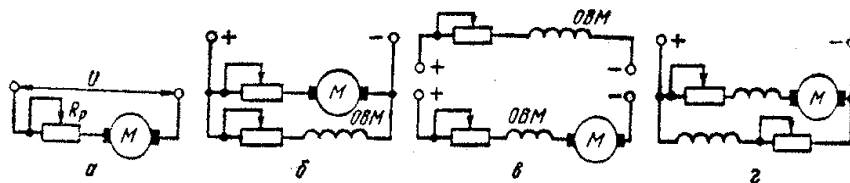


Рис. 6.2. Схемы электродвигателей постоянного тока независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения (верхняя часть схемы «в» принадлежит схеме «а»)

Преобразование механической энергии в электрическую (в генераторе) и наоборот (в двигателе) осуществляется на основе законов электромагнитной индукции и электромагнитных сил. В электродвигателе *вращающий момент* (соответственно и *электромагнитные силы*, действующие на проводники якоря с протекающими по ним токами) создается в результате взаимодействия тока якоря $I_{я}$ с магнитным потоком Φ , создаваемым обмоткой возбуждения. Вращающий момент M двигателя постоянного тока и его ЭДС E определяются по формулам

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

где k – конструктивный коэффициент двигателя;

Φ – магнитный поток, Вб;

$I_{я}$ – ток якоря, А.

ω – угловая скорость, рад/с.

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

$$\begin{aligned} \omega &= U/(k\Phi) - (R_{я} + R_p) / (k \Phi) I_{я}; \\ \omega &= U/(k\Phi) - (R_{я} + R_p) / (k^2 \Phi^2) M. \end{aligned} \quad (6.1)$$

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

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

На рис. 6.3 представлены механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) во всех режимах работы. Характерными точками характеристик в двигательном режиме являются: точка иде-

ального холостого хода ($\omega_0, M = 0$); точка номинального режима (ω_n, M_n); точка короткого замыкания ($\omega = 0, M = M_k$).

Жесткость механической характеристики определяется потоком возбуждения и сопротивлением якорной цепи $\beta = dM/d\omega = -k^2 \Phi^2 / (R_y + R_p) = -M_k / \omega$.

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

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

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

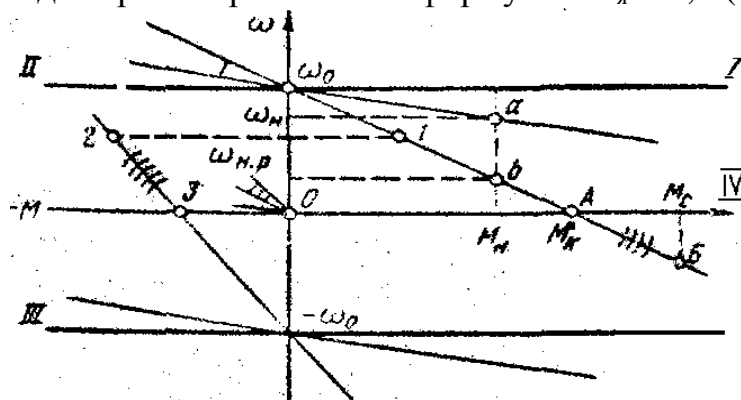


Рис. 6.3. Совмещенные механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

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

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

Для ДПТ НВ возможны следующие *три режима электрического торможения*.

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

2. **Динамическое торможение**. Якорь двигателя отключается от сети и замыкается на сопротивление. При этом механическая энергия движущихся частей

(механизма и якоря двигателя) преобразуется в электрическую, которая теряется в виде тепловой энергии в сопротивлениях якорной цепи. Механические характеристики в данном режиме торможения проходят через начало координат (на рис. 6.3 – линии с тремя засечками).

3. Торможение противовключением осуществляется двумя способами:

1) *введением большого сопротивления в цепь якоря*. При этом вращающий момент двигателя становится меньше, чем статический момент нагрузки M_c . Двигатель останавливается (в точке А), а затем под действием момента M_c начинает вращаться в другом направлении, развивая тормозной момент; в точке Б наступит установившийся режим. Механические характеристики являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима (на рис. 6.3 – линии с четырьмя засечками);

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

Пуск двигателей постоянного тока. К пуску ДПТ предъявляется основное требование: не допустить при пуске протекание через якорь большого тока (больше $2,5 I_{ном}$), опасного для двигателя по условиям коммутации.

Теоретически и практически возможны три способа пуска: 1) при включении в цепь якоря пускового сопротивления только на время пуска; 2) при пониженном напряжении в цепи якоря и 3) прямой пуск (без пускового сопротивления) – только для двигателей малой мощности, у которых пусковой ток меньше $4 I_{ном}$ и разгон двигателя происходит меньше 1 секунды.

Пуск ДПТ при включении пускового реостата R_p последовательно с якорем обеспечивает пусковой ток $I_{яп} = U_{я} / (R_{я} + R_p)$ до приемлемого значения ($I_{яп}$ меньше $2,5 I_{ном}$). По мере разгона двигателя пусковой реостат выводится до нуля.

У двигателей большой мощности $R_{я} = 0,02 - 1,1$ Ом и прямой пуск для них невозможен, так как в начальный момент пуска противо-ЭДС $E_{пр} = C_e \cdot \Phi \cdot \omega = 0$ и ток якоря $I_{яп} = U_{я} / R_{я}$ может превысить номинальный ток якоря $I_{ном}$ во много раз (до 100 раз). При большом пусковом токе на коллекторе ДПТ появляется значительное искрение и возможность возникновения *кругового огня* – дугового разряда по окружности коллектора между щетками разной полярности.

Пуск ДПТ с ограниченным пусковым током возможен (без пускового реостата) и при питании якоря двигателя от отдельного источника с регулируемым выходным напряжением. Тогда ограничение пускового тока и плавный разгон двигателя обеспечиваются постепенным повышением напряжения на якоре от нуля до номинального значения. Этот метод находит применение в регулируемых мощных электроприводах постоянного тока.

Автоматизация процесса пуска облегчает управление ДПТ, устраняет возможные ошибки при пуске и ведет к повышению производительности механизмов, особенно при повторно-кратковременных режимах их работы.

Пуск двигателей постоянного тока с пусковым реостатом в цепи якоря (и асинхронных двигателей с фазным ротором) обычно осуществляют в соответствии с заданной пусковой диаграммой, при этом закорачивание ступеней пускового реостата происходит либо при достижении двигателем определенной скорости, либо при определенной силе тока, либо через заданные промежутки времени.

На рис. 6.4 изображена пусковая диаграмма двигателя с тремя ступенями пускового реостата, из которой видно, что закорачивание ступеней пускового реостата производится через время t_1 (первая ступень), через время t_2 (вторая ступень) и t_3 (третья ступень). Ток двигателя при пуске изменяется в пределах от I_1 до I_2 .

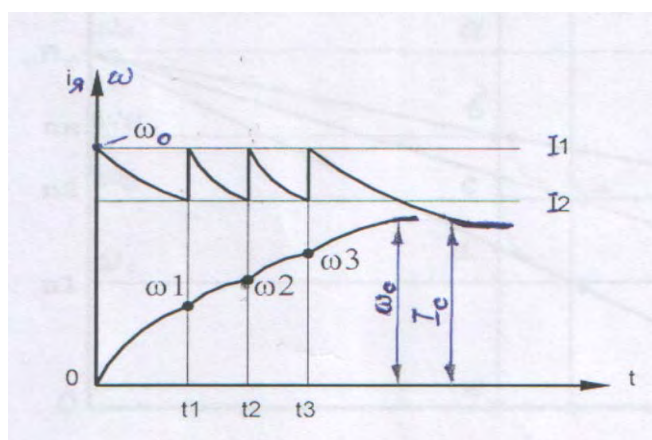


Рис. 6.4. Пусковая диаграмма

Из диаграммы рис. 6.4 также видно, что выключение (закорачивание, шунтирование) ступеней пускового реостата можно производить и при определенной угловой скорости двигателя (ω_1 , ω_2 , ω_3) или при определенной величине тока I_2 . Очевидно, что автоматическое управление пуском ДПТ может быть осуществлено: 1) в функции скорости; 2) в функции тока; 3) в функции времени. Для примера на рис 6.5 представлен узел управления пуском ДПТ с параллельным возбуждением в функции времени.

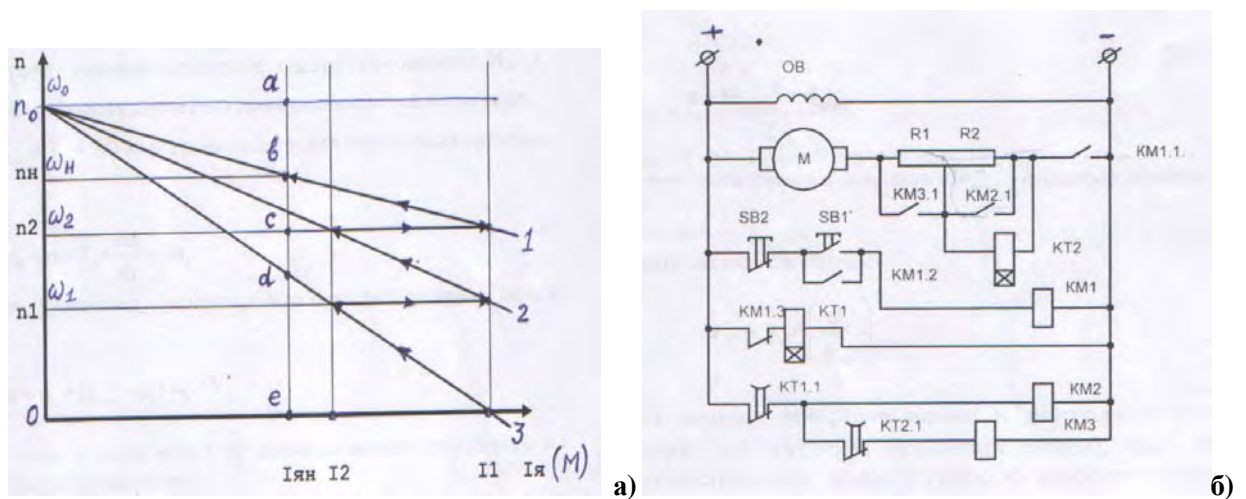


Рис. 6.5. Узел управления пуском ДПТ в функции времени

При нажатии кнопки SB1 контактор KM1 своим контактом KM1.1 подключает якорь двигателя к сети, а контактом KM1.3 отключает питание от катушки реле KT1. Падение напряжения от пускового тока на сопротивлении R1 вызывает срабатывание реле KT2, которое размыкает свой контакт. С определенной выдержкой времени замыкается контакт KT1.1 реле KT1 и контактор KM2 контактом KM2.1 шунтирует ступень R1 вместе с реле KT2. Последнее опять с выдержкой времени замыкает свой контакт KT2.1, что приводит к шунтированию ступени R2.

Управление в функции времени получило широкое применение в современных электроприводах постоянного и переменного тока благодаря своим достоинствам: простоте схемы, надежности и независимости ее работы от колебаний нагрузки или напряжения.

Реверсирование ДПТ. Для реверсирования двигателя необходимо изменить направление вращающего момента на противоположное, т.е. согласно формуле для момента $M = k \Phi I_{я}$ изменить направление или магнитного потока (направление тока в обмотке возбуждения), или тока в обмотке якоря.

В двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением (рис. 6.6, а) по обмотке возбуждения проходит тот же ток, что и по обмотке якоря. Поэтому магнитный поток при изменении нагрузки двигателя меняется. Магнитный поток возбуждения растет с увеличением нагрузки, вследствие чего угловая скорость снижается согласно уравнению (6.1) и механическая характеристика двигателя будет мягкой (рис. 6.6, б). Благодаря этому ДПТ НВ сравнительно легко и плавно преодолевает перегрузки и имеет высокий пусковой момент. Данные свойства двигателя позволяют широко применять его в приводе транспортных механизмов.

При больших нагрузках двигателя его магнитная цепь насыщена, так что небольшие изменения момента и, следовательно, тока возбуждения не приводят к

заметному изменению магнитного потока. Поэтому механическая характеристика в зоне больших нагрузок имеет, как и характеристика двигателя независимого возбуждения, небольшой наклон (кривая 1 на рис. 6.6, б)

При снижении нагрузки ток и магнитный поток двигателя уменьшаются. Изменение потока значительно сильнее влияет на положение механической характеристики, чем изменение падения напряжения на сопротивлении якоря, пропорционального току якоря и составляющего даже при полной нагрузке 2 – 7 % напряжения на двигателе. Вследствие этого при малых и средних нагрузках, когда магнитная цепь двигателя не насыщена, его механическая характеристика имеет вид гиперболы.

Если нагрузка двигателя мала (менее 25 % номинальной), частота вращения его может превысить допустимые по механической прочности пределы – двигатель «идет вразнос». При этом происходит разрыв бандажей, крепящих обмотку якоря, и двигатель выходит из строя.

Механические характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением в четырех квадрантах изображены на рис. 6.7. В двигательном режиме механические характеристики значительно смягчаются при введении в цепь якоря реостата (рис. 6.7, линии с одной засечкой).

Пуск двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением. Пуск осуществляют при введении реостата РП для уменьшения пускового тока. По мере разгона двигателя реостат выводят. Искусственные механические характеристики, соответствующие различному числу введенных ступеней реостата, показаны на рис. 6.6, б кривыми 2, 3 и 4.

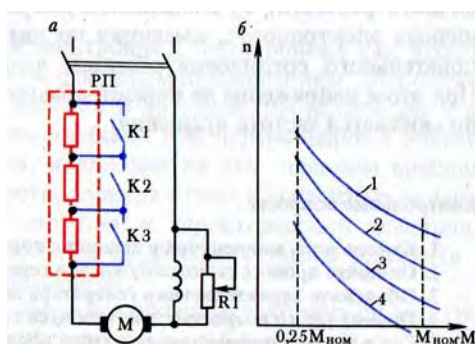


Рис. 6.6. Схема (а) и механические характеристики (б) двигателя последовательного возбуждения

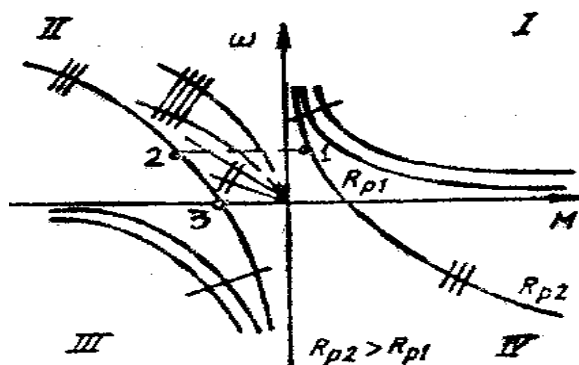


Рис. 6.7. Механические характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

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

Динамическое торможение может осуществляться по схеме с самовозбуждением и с независимым возбуждением. В первом случае якорь и обмотка возбуждения отключаются от сети и замыкаются на реостат. Чтобы избежать размагничивания машины, необходимо переключить обмотку возбуждения (или якорь) таким образом, чтобы направление тока в обмотке возбуждения не изменилось. В этом случае машина самовозбуждается при данном сопротивлении цепи якоря лишь при определенном значении угловой скорости; возбудившись, она создает тормозной момент. Механические характеристики нелинейны (на рис. 6.7 – кривые с четырьмя засечками).

Механические характеристики двигателя в режиме динамического торможения аналогичны соответствующим характеристикам двигателя с независимым возбуждением (на рис. 6.7 – линии с двумя засечками). Такой способ торможения нашел широкое применение, а первый способ используют редко, в основном как аварийный, например, при исчезновении напряжения сети.

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

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

При первом способе механическая характеристика будет продолжением характеристики, соответствующей двигательному режиму (на рис. 6.7 – линия с тремя засечками). При втором способе торможение осуществляется по линии 1–2–3.

Регулирование скорости электроприводов постоянного тока. Скорость ДПТ НВ можно регулировать:

- 1) путем изменения сопротивления в цепи якоря;
- 2) изменением потока возбуждения;

3) изменением напряжения, подводимого к якору.

Регулирование *по первому способу* имеет существенные недостатки:

- уменьшается жесткость механических характеристик при снижении угловой скорости, а потери мощности в главной цепи возрастают;
- диапазон регулирования ограничен, особенно при малых нагрузках;
- невелики плавность и точность регулирования.

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

По *второму способу* можно регулировать магнитный поток только в сторону уменьшения (так как в номинальном режиме магнитная цепь двигателя насыщена), что соответствует увеличению скорости выше номинальной. Возможный диапазон регулирования скорости при этом не превышает 2 для двигателя нормального исполнения. Верхний предел скорости ограничивается механической прочностью элементов якоря двигателя – бандажей обмотки якоря, коллектора.

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

Регулирование скорости двигателей с последовательным возбуждением осуществляют: 1) изменением тока возбуждения и, следовательно, магнитного потока путем шунтирования обмотки возбуждения регулятором Р1 (рис. 6.6, а); 2) введением в цепь якоря регулировочного реостата; 3) изменением напряжения на обмотке якоря, что в электроприводах, имеющих по два двигателя (например, в электровозах), выполняют путем последовательного соединения обмоток якоря двигателей между собой. При этом напряжение на каждой обмотке уменьшается вдвое и соответственно снижается частота вращения.

Расчет добавочных резисторов в цепи якоря ДПТ НВ. Если известна естественная электромеханическая или механическая характеристика 1 двигателя (рис. 6.8) и его паспортные данные, то расчет сопротивления R_d , при включении которого в цепь якоря желаемая искусственная характеристика 2 пройдет через точку А с заданными координатами $\omega_{и}$, $I_{и}$ или $\omega_{и}$, $M_{и}$, можно выполнить следующими наиболее распространенными методами.

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

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

Тогда искомая величина $R_d = R_{\text{я}} (\Delta\omega_{\text{н}} / \Delta\omega_{\text{е}} - 1)$.

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

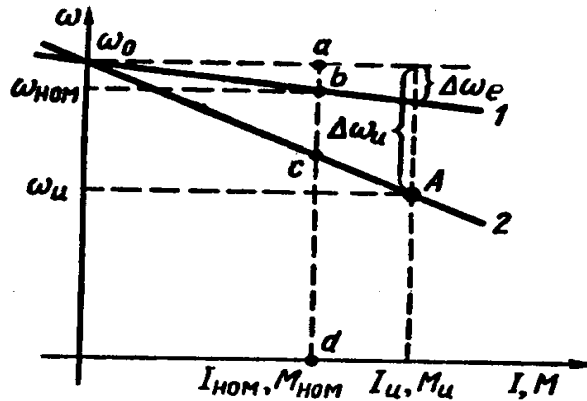


Рис. 6.8. Характеристики ДПТ НВ для расчета величины регулировочных резисторов

Запишем выражение для скорости двигателя на заданной искусственной характеристике (см. рис. 6.8) при номинальных токе $I_{\text{н}}$, моменте $M_{\text{н}}$, магнитном потоке $\Phi_{\text{н}}$ и напряжении $U_{\text{н}}$:

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

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

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

Здесь $R_{\text{н}} = U_{\text{н}} / I_{\text{н}}$ — так называемое **номинальное сопротивление**, являющееся базовой величиной при расчетах, Ом.

Соотношение $R / U_{\text{н}} = (\omega_0 - \omega_{\text{н}}) / \omega_0 = \delta$ отражает важное свойство ДПТ НВ: относительный перепад скорости $\delta = \Delta\omega / \omega_0$ равен относительному активному сопротивлению цепи якоря $R / R_{\text{н}}$.

Обозначим на рис. 6.5 характерные точки a, b, c, d и отметим, что $\omega_0 - \omega_{\text{н}} = \Delta\omega = ac$, $\omega_0 = ad$. Тогда $R = R_{\text{н}} \Delta\omega / \omega_0 = R_{\text{н}} ac / ad$; $R_d = R_{\text{н}} bc / ad$; $R_{\text{я}} = R_{\text{н}} ab / ad$.

Таким образом, для нахождения R_d необходимо сначала по характеристикам определить длины отрезков bc и ad при номинальном токе или моменте и рассчитать номинальное сопротивление $R_{\text{н}} = U_{\text{н}} / I_{\text{н}}$.

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

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

$$R_{\text{д1}} = (U / I_{\text{доп}}) - R_{\text{я}}.$$

Сопротивление резистора $R_{\text{д2}}$ при динамическом торможении

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

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

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

Пример 1. ДПТ НВ типа ПБСТ-53 имеет следующие паспортные данные: $P_{н} = 4,8$ кВт; $n_{н} = 1500$ об/мин; $U_{н} = 220$ В; $I_{н} = 24,2$ А; $R_{я} = 0,38$ Ом; $I_{в.н} = 0,8$ А. Требуется определить:

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

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

Решение

1. Для нахождения сопротивления $R_{д}$ используем метод пропорций, предварительно определив требуемые параметры двигателя:

$$\omega_{н} = 2\pi n_{н} / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1500 / 60 = 157 \text{ рад/с};$$

$$M_{н} = P_{н} / \omega_{н} = 4800 / 157 = 30,6 \text{ Н·м};$$

$$\kappa\Phi_{н} = M_{н} / I_{н} = 30,6 / 24,2 = 1,3 \text{ В·с};$$

$$\omega_0 = U_{н} / \kappa\Phi_{н} = 220 / 1,3 = 169 \text{ рад/с};$$

$$\Delta\omega_{е} = \omega_0 - \omega_{н} = 169 - 157 = 12 \text{ рад/с};$$

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

Тогда искомое сопротивление резистора

$$R_{д} = R_{я} ((\Delta\omega_{и} / \Delta\omega_{е}) - 1) = 0,38 \cdot ((79/12) - 1) = 2,12 \text{ Ом}.$$

2. Сопротивление пускового резистора

$$R_{д1} = (U / I_{доп}) - R_{я} = 220 / (3 \cdot 24,2) - 0,38 = 2,65 \text{ Ом}.$$

Сопротивление резистора, используемого при торможении:

$$\begin{aligned} R_{д3} &= ((U + E) / I_{доп}) - R_{я} \approx (2U / I_{доп}) - R_{я} = \\ &= 2 \cdot 220 / (3 \cdot 24,2) - 0,38 = 5,7 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Пример 2. Для ДПТ параллельного возбуждения типа 2ПО200L с номинальными данными: $P_{н} = 11$ кВт; $n_{н} = 1000$ об/мин; $U_{н} = 220$ В; $\eta_{н} = 86,5$ %; $R_{я} = 0,46$ Ом; $R_{об} = 126,5$ Ом требуется рассчитать пусковые сопротивления при пуске в 4 ступени и максимальном моменте $M_1 = 2M_{н}$, используя 1) **аналитический метод расчета** и 2) **графический метод (метод отрезков)**.

Решение. Электрическая схема реостатного пуска ДПТ параллельного возбуждения в 4 ступени показана на рис. 6.9.

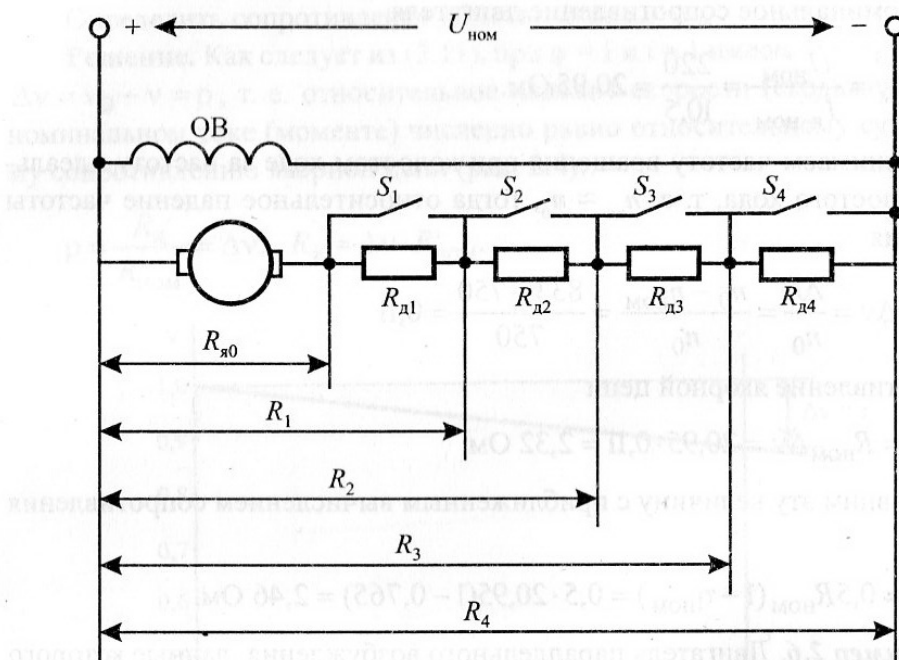


Рис. 6.9. Реостатный пуск ДПТ НВ в 4 пусковые ступени
Аналитический метод расчета

1. Рассчитываем:

- номинальный ток двигателя $I_H = P_H / (U_H \cdot \eta_H) = 11\,000 / (220 \cdot 0,865) = 57,8 \text{ А}$;
- номинальный ток возбуждения $I_{в.н} = U_H / R_{об} = 220 / 126,5 = 1,74 \text{ А}$;
- номинальный ток якоря $I_{я.н} = I_H - I_{в.н} = 57,8 - 1,74 = 56,06 \text{ А}$;
- номинальное сопротивление двигателя $R_H = U_H / I_{я.н} = 220 / 56,06 = 3,924 \text{ Ом}$;
- относительное сопротивление обмотки якоря $\rho_0 = R_{я} / R_H = 0,46 / 3,924 = 0,117$.

2. Принимая во внимание, что

$$\lambda = \mu_1 / \mu_2 = i_1 / i_2 = \rho_1 / \rho_0 = \rho_2 / \rho_1 = \rho_3 / \rho_2 = \rho_4 / \rho_3,$$

находим

$$\lambda = \sqrt[4]{(1 / (\mu_1 \cdot \rho_0))} = \sqrt[4]{(1 / (2 \cdot 0,117))} = 1,438,$$

где $\rho_1 = R_1 / R_H$; $\rho_2 = R_2 / R_H$; $\rho_3 = R_3 / R_H$; $\rho_4 = R_4 / R_H$;

R_1, R_2, R_3, R_4 - сопротивления пусковых ступеней ДПТ (см. рис. 6.9).

3. Вычисляем относительный ток переключения

(или относительный момент переключения $\mu_2 = \mu_1 / \lambda$)

$$i_2 = i_1 / \lambda = 2 / 1,438 = 1,39.$$

4. Теперь на основании уравнения $v = 1 - \rho \cdot \mu$ при $\mu_2 \leq \mu \leq \mu_1$,

$\rho_0 \leq \rho \leq \rho_4$ строим механические характеристики ДПТ при пуске в 4 ступени (рис. 6.10).

5. Рассчитываем:

- относительные сопротивления ступеней
 $\rho_1 = \lambda \cdot \rho_0 = 1,438 \cdot 0,117 = 0,168$; $\rho_2 = \lambda \cdot \rho_1 = 1,438 \cdot 0,168 = 0,242$;
 $\rho_3 = \lambda \cdot \rho_2 = 1,438 \cdot 0,242 = 0,347$; $\rho_4 = \lambda \cdot \rho_3 = 1,438 \cdot 0,347 = 0,499$;

- относительные сопротивления секций пускового реостата
 $\rho_{д1} = \rho_1 - \rho_0 = 0,051$; $\rho_{д2} = \rho_2 - \rho_1 = 0,074$; $\rho_{д3} = \rho_3 - \rho_2 = 0,105$;
 $\rho_{д4} = \rho_4 - \rho_3 = 0,152$;
- абсолютные величины сопротивлений секций
 $R_{д1} = \rho_{д1} \cdot R_H = 0,051 \cdot 3,924 = 0,2$ Ом; $R_{д2} = \rho_{д2} \cdot R_H = 0,074 \cdot 3,924 = 0,29$ Ом;
 $R_{д3} = \rho_{д3} \cdot R_H = 0,105 \cdot 3,924 = 0,412$ Ом; $R_{д4} = \rho_{д4} \cdot R_H = 0,152 \cdot 3,924 = 0,596$ Ом.

6. Общее сопротивление пускового реостата

$$R_{п} = R_{д4} + R_{д3} + R_{д2} + R_{д1} = 0,596 + 0,412 + 0,29 + 0,2 = 1,5 \text{ Ом.}$$

Графический метод (метод отрезков)

1. Строим естественную механическую характеристику (рис. 6.10) по двум точкам (**А** и **Б**), значения координат которых равны: $v_A = 1$; $\mu_A = 0$; $v_B = v_H = 1 - \rho_0 = 1 - 0,117 = 0,883$; $\mu_B = \mu_H = 1$.

2. Вычислим кратность максимального момента μ_1 к моменту переключения μ_2 при пуске ($\lambda = \mu_1 / \mu_2$), величина которого зависит от числа ступеней пускового реостата, но должна быть больше статического момента μ_c :

$$\lambda = \sqrt[4]{1/(\mu_1 \cdot \rho_0)} = \sqrt[4]{1/(2 \cdot 0,117)} = 1,438.$$

3. Вычислим значение относительного момента переключения μ_2 :

$$\mu_2 = \mu_1 / \lambda = 2 / 1,438 = 1,39.$$

4. Из точек **m1** (μ_1) и **m2** (μ_2) на оси моментов проведем две вертикальные линии до пересечения с естественной механической характеристикой (точки **a**, **b**) и с горизонталью $v = 0$ (точка **c**). Соединим точки **A** и **m1** и получим точку **d** на вертикали **m2** - **b**. Из этой точки **d** проведем горизонталь **d** - **e**. Аналогично из точки **A** проведем линии **A** - **e**, **A** - **g**, **A** - **k**, а из полученных точек **f**, **h**, **l** проведем горизонтали **f-g**, **h-k**, **l-a**. Последняя горизонталь **l-a** попадет в точку **a**, так как значение момента переключения μ_2 было вычислено ранее в зависимости от заданного значения момента μ_1 и числа ступеней n пускового реостата.

5. Определяем значения искомых сопротивлений секций пускового реостата из выражений, в которых используются измеренные длины отрезков из рис. 6.10 :

$$R_{д4} = m1-e/c-a \cdot R_{я} = 22/17 \cdot 0,46 = 0,596 \text{ Ом}; R_{д3} = g-e /c-a \cdot R_{я} = 15/17 \cdot 0,46 = 0,412 \text{ Ом}; R_{д2} = k-g/c-a \cdot R_{я} = 11/17 \cdot 0,46 = 0,29 \text{ Ом}; R_{д1} = a-k/c-a \cdot R_{я} = 7/17 \cdot 0,46 = 0,2 \text{ Ом.}$$

6. Общее сопротивление пускового реостата

$$R_{п} = R_{д4} + R_{д3} + R_{д2} + R_{д1} = 0,596 + 0,412 + 0,29 + 0,2 = 1,5 \text{ Ом.}$$

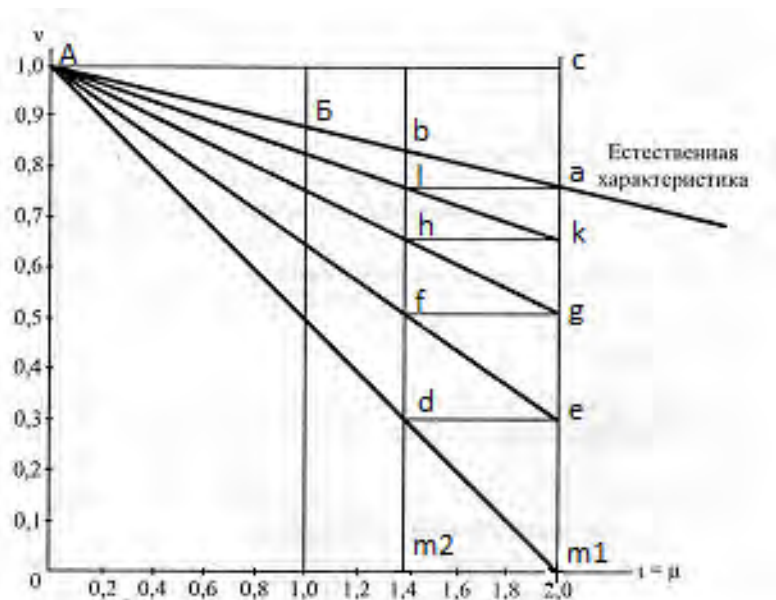


Рис. 6.10. Механические характеристики ДПТ НВ при 4 пусковых ступенях

Лекция 7. ТИРИСТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА

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

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

С помощью фазосдвигающего устройства схемы управления можно изменять фазу (момент) подачи отпирющего импульса (рис. 7.1, *з*) относительно точки естественной коммутации вентиля, т.е. можно изменять угол регулирования α .

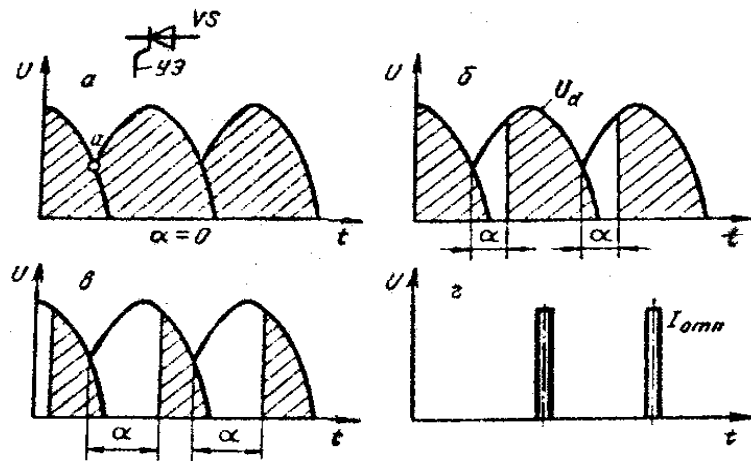


Рис. 7.1. Графики регулирования выходного напряжения тиристорного выпрямителя

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

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

где m – число фаз выпрямления;

U_2 – действующее значение линейного напряжения питающего трансформатора;

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

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

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

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

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

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

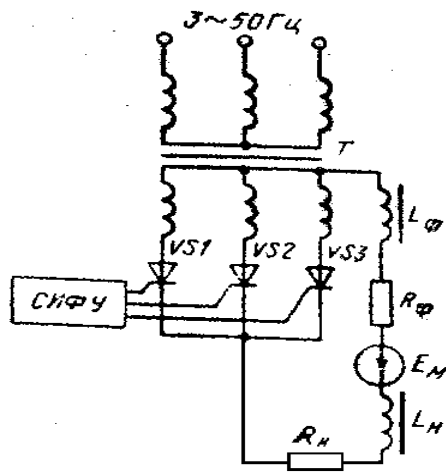


Рис. 7.2. Обобщенная схема тиристорного электропривода: VS1 – VS3 – тиристоры; L_ϕ , R_ϕ – индуктивность и активное сопротивление сглаживающего фильтра; L_H , R_H – то же нагрузки; E_M – ЭДС двигателя

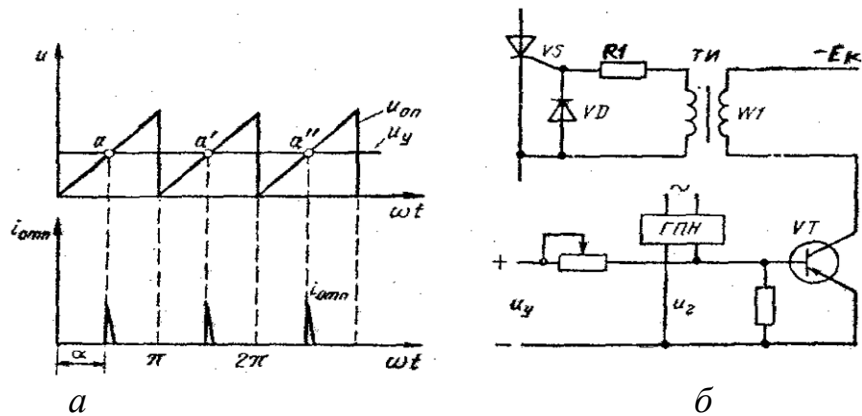


Рис. 7.3. Графики напряжений (а) и схема (б) системы импульсно-фазового управления тиристором

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

тор изменяет момент отпирания тиристора, т.е. изменяет угол регулирования α от 0 до π (см. рис. 7.3, а). При этом изменяется выходное напряжение преобразователя, а следовательно, и скорость подключенного к нему электродвигателя.

Электропривод постоянного тока с системой подчиненного регулирования. В теории электропривода широко используется *инженерный метод* синтеза унифицированных контуров регулирования, называемый *методом последовательной коррекции с подчиненным регулированием координат* (или проще – *метод подчиненного регулирования координат*). Сущность его заключается в том, что объект регулирования представляется в виде последовательно соединенных звеньев $\Pi_1 - \Pi_i$, выходными параметрами (координатами) которых могут быть скорость, ток, момент, положение и т.п. Для управления каждой из этих координат служит отдельный регулятор P_i , образующий с объектом управления замкнутый контур с соответствующей обратной связью $k_{o.c.}$. Регуляторы соединяются последовательно, так что выход одного из них является входом другого. При этом замкнутые контуры регулирования образуют систему, в которой имеется *внешний контур*, состоящий из звена Π_1 объекта управления и соответствующего регулятора P_1 , и *внутренние контуры*. Выходной сигнал внешнего контура является задающим для последующего (внутреннего), заключенного внутри него контура. Таким образом, каждый внутренний контур регулирования подчинен соответствующему внешнему контуру. Каждому регулируемому параметру соответствует свой регулятор с обратной связью. Число контуров равно числу регулируемых параметров (координат) объекта управления и соответственно – числу регуляторов.

Достоинства системы подчиненного регулирования:

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

Структурная схема электропривода постоянного тока (тиристорного, реверсивного) с системой подчиненного регулирования приведена на рис. 7.4. Электродвигатель M получает питание от реверсивного тиристорного преобразователя $UZ1, UZ2$, который питается от трехфазной сети через автоматический выключатель QF и трансформатор T . Выключатель QF защищает блоки тиристоров от коротких замыканий. Пульсации выпрямленного тока сглаживаются реактором L .

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

тактным командоконтроллером SA (ручным или педальным) обычно сельсинного типа с поста управления.

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

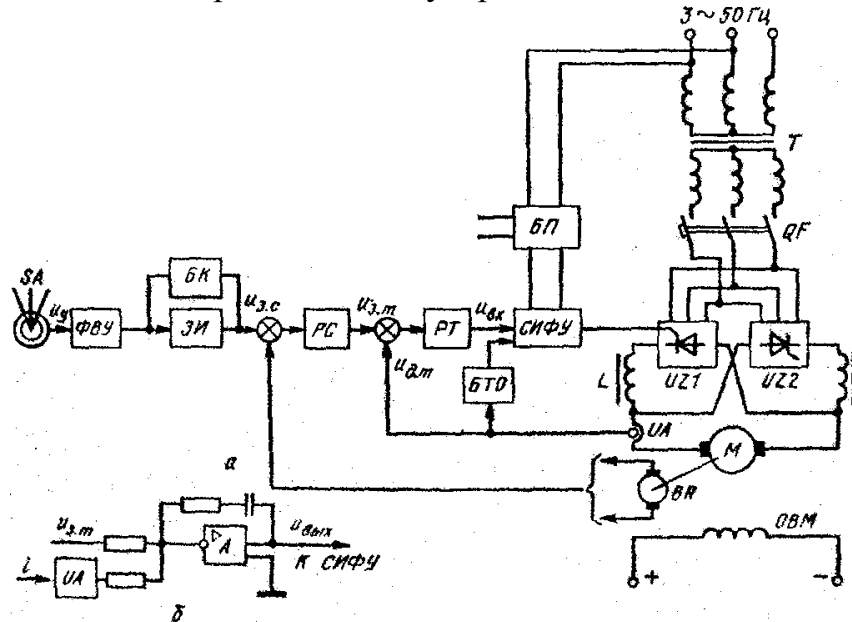


Рис. 7.4. Схема автоматизированного (тиристорного, реверсивного) электропривода постоянного тока с системой подчиненного регулирования

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

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

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

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

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

Схема простейшего регулятора тока представлена на рис. 7.4, б. В составе регулятора имеется усилитель А с ограничением тока. На выходе регулятор тока формирует напряжение управления, поступающее в СИФУ. Блоки питания БП обеспечивают питание СИФУ, регуляторов и других элементов системы управления. Для ограничения тока якоря допустимым значением в схему управления введен блок токовой отсечки (БТО), который защищает электропривод от недопустимых перегрузок и аварийных токов, воздействуя непосредственно на вход СИФУ и ограничивая выпрямленный ток предельно допустимым значением. Принцип токовой отсечки состоит в том, что при достижении током двигателя заданного значения (уставки) фаза отпирающих импульсов изменяется так, что напряжение на выходе силового блока снижается, ограничивая ток заданным значением.

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

Раздел 3. АППАРАТУРА И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

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

Лекция 8. КОНТАКТНАЯ АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ

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

Все большее применение находят контакты из металлокерамики, обладающие повышенной надежностью, долговечностью, износостойкостью. Переключение контактов осуществляется путем воздействия на них различных *рычагов* или *кулачков* вручную или механически – элементом движущейся машины.

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

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

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

Рубильники применяют в качестве вводных выключателей, предназначенных для снятия напряжения со схемы электроустановки и создания видимого разрыва электрической цепи при ремонтах, осмотрах и длительных остановках (в перерывах между сменами и т.п.). Такие рубильники называют *вводными*. Вводный рубильник в нормальных условиях не разрывает рабочего тока электродвигателя: это выполняют обычно другие аппараты. Чтобы ножи отключенного рубильника не находились под напряжением и не представляли опасности при случайном к ним прикосновении, провода от сети присоединяют к контактным стойкам (губкам) рубильника, прикосновение к которым менее вероятно.

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

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

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

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

В станкостроении широко применяют **пакетно-кулачковые выключатели и переключатели**, в которых контакты замыкаются при повороте валика с кулачками. Такие переключатели изготавливают на токи от 10 до 160 А с различным числом секций и углов поворота рукоятки. Путем надлежащего подбора шайб с кулачками осуществляют нужные комбинации замыкания контактов. Их применяют для переключений в схемах при переходе с одного режима работы на другой, для переключения полюсов асинхронных двигателей и других целей. Схемы кулачковых переключателей снабжают таблицами переключений, в которых указывают, какие контакты замкнуты для каждого положения аппарата.

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

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

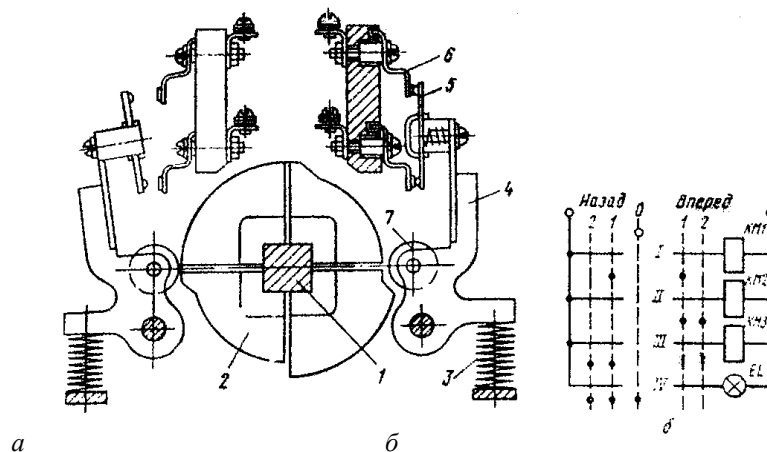


Рис. 8.1. Кулачковый командоконтроллер

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

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

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

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

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

Контакторы различаются по следующим показателям:

- *роду тока*: постоянный и переменный;
- *числу главных полюсов*: одно-, двух-, трех- и пяти-полюсные;
- *номинальному току*: от 4 до 2500 А;
- *номинальному напряжению главной цепи*: 220, 440, 600 В постоянного тока и на 380, 660 В переменного тока;
- *номинальному напряжению катушек*: 24...220 В постоянного тока и 24...660 В переменного напряжения;
- *конструкции электромагнита*: с прямоходным якорем и с якорем клапанного типа;

– способу гашения дуги: с дугогасительной катушкой, с дугогасительной камерой и т.п.

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

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

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

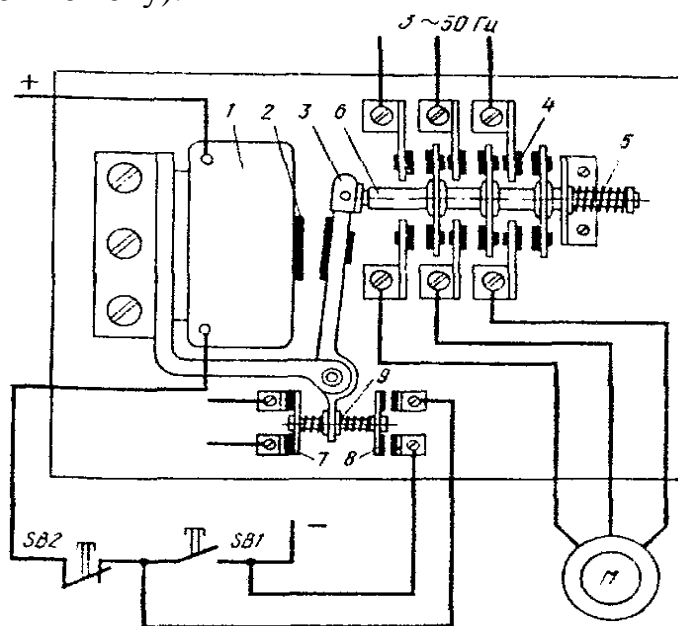


Рис. 8.2. Схема контактора

Реле осуществляют скачкообразное переключение цепей управления под воздействием различных сигналов (электрических, механических, тепловых и

др.). По принципу действия реле делятся на электромагнитные, индукционные, электронные, тепловые и др. Реле могут быть контактными, бесконтактными и реагировать на изменение различных величин (электрических и неэлектрических). В соответствии с этим различают реле тока, напряжения, скорости, времени, температуры, давления и др. Значение параметра (тока, времени и т.п.), при котором реле срабатывает, называется *уставкой реле*. Одной из основных характеристик реле является *коэффициент возврата* K_v , равный отношению значений входной величины при отпуске якоря и срабатывании реле ($K_v = 0,4 \dots 0,95$).

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

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

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

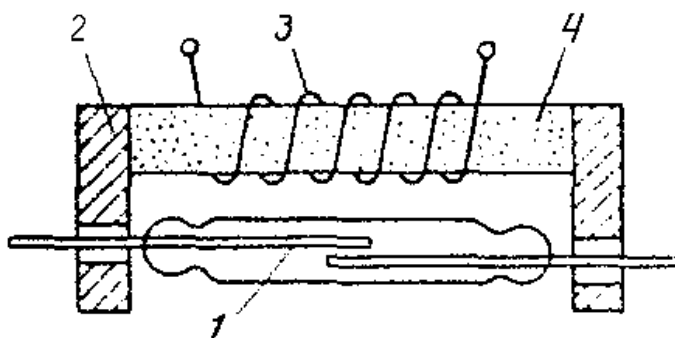


Рис. 8.3. Схема устройства геркона

В электроприводе используются и **реле времени** для отсчета требуемых временных задержек (выдержек). Наибольшее применение находят электромагнитные реле времени постоянного тока. Выдержка времени обеспечивается благодаря замедлению отпадания якоря реле после отключения его катушки. Для замедления отпадания якоря на магнитопровод 2 (рис. 8.4, а) насаживается массивная металлическая гильза 3. После отключения катушки 1 реле действующий в сердечнике магнитный поток Φ_n спадает по кривой 1 (рис. 8.4, б) и наводит в гильзе ЭДС. Появляется ток в гильзе, который создает дополнительный магнитный поток в сердечнике (кривая 3), препятствующий исчезновению основного магнитного потока, т.е. результирующий магнитный поток в сердечнике спадает более замедленно (кривая 2), а выдержка времени при наличии гильзы увеличивается до t_6 , так как отпадание якоря б (после отключения катушки реле) происходит при снижении ее магнитного потока до величины $\Phi_{от}$, при которой электромагнитная сила притяжения якоря станет меньше отрывающего усилия пружины 4.

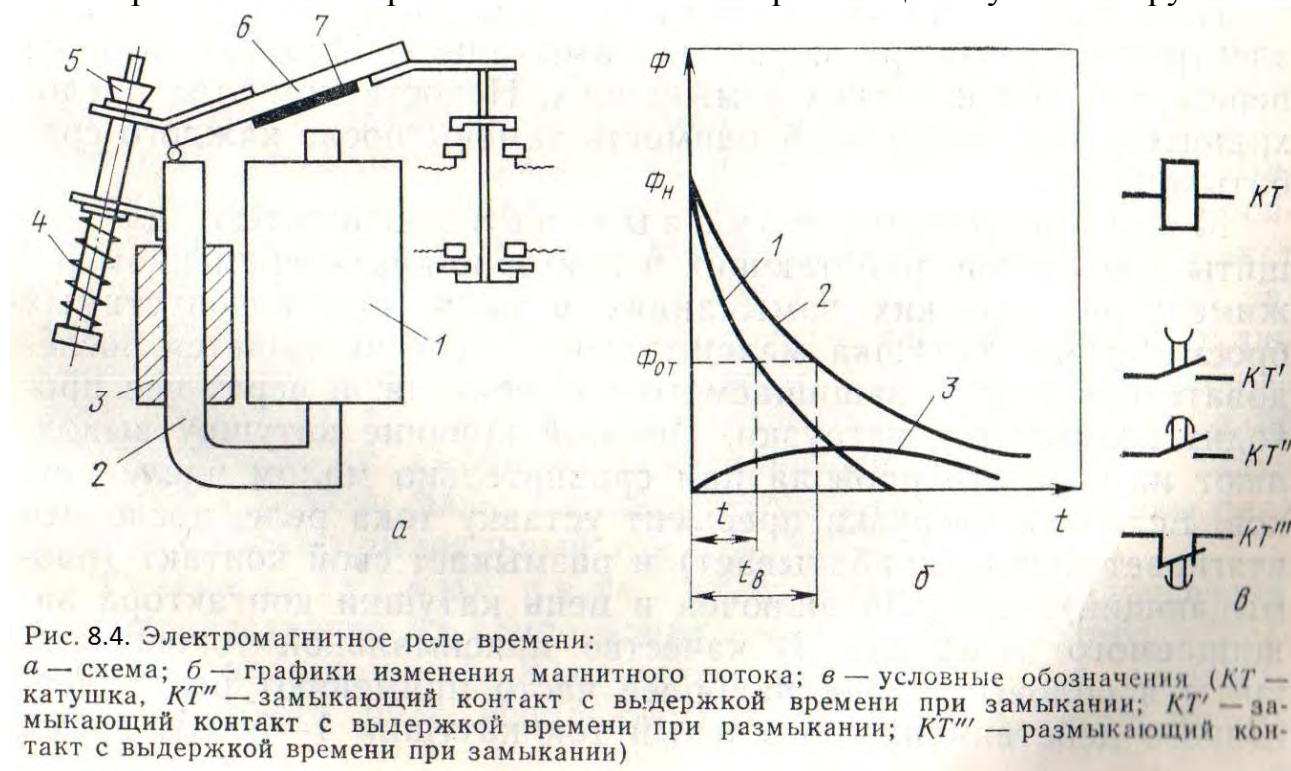


Рис. 8.4. Электромагнитное реле времени:

а — схема; б — графики изменения магнитного потока; в — условные обозначения (KT — катушка, KT'' — замыкающий контакт с выдержкой времени при замыкании; KT' — замыкающий контакт с выдержкой времени при размыкании; KT''' — размыкающий контакт с выдержкой времени при замыкании)

Для грубого регулирования выдержки времени между якорем и сердечником крепят тонкую (0,1...0,5 мм) немагнитную прокладку, с помощью которой изменяется индуктивность магнитной цепи реле, а следовательно, и выдержка времени (она уменьшается). Более тонкое регулирование выдержки времени осуществляется винтом 5, действующим на натяжение пружины 4 (при уменьшении натяжения пружины выдержка времени увеличивается, так как уменьшается величина $\Phi_{от}$).

Двигательные реле времени приводятся в движение маломощным синхронным двигателем. Вал двигателя соединен через редуктор с главным валом, на

котором укреплены упоры, воздействующие на контактную систему. Выдержку времени контакта можно изменить путем перестановки упора. Число контактов достигает 12; выдержка времени – от долей секунды до нескольких часов.

Лекция 9. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

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

Основные правила выполнения схем:

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

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

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

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

А – усилители; В – преобразователи неэлектрических величин в электрические (датчики; например, ВR – тахогенератор); С – конденсаторы; D – интегральные схемы; F – разрядники, предохранители, защитные устройства (FA – дискретные элементы защиты по току; FU – плавкие предохранители); G – генераторы, источники питания; K – реле, контакторы, пускатели (KA – токовое реле, KK – электротепловое реле, KT – реле времени, KU – реле напряжения, KM – контактор, магнитный пускатель); M – двигатель; Q – выключатель в силовых цепях (QF – автоматический выключатель, QS – рубильник); S – коммутационные устройства для слаботоковых цепей (SA – выключатель или переключатель, SB – выключа-

тель кнопочный, SQ – выключатель путевой, SM – командоконтроллер); Т – трансформаторы (ТА – трансформатор тока, ТУ – трансформатор напряжения); U – преобразователи одних электрических величин в другие электрические величины (UZ – преобразователь частоты, выпрямитель, инвертор); V – приборы полупроводниковые (VD – диод, VT – транзистор, VS – тиристор); Y – устройства механические (YA – электромагнит, YB – тормоз, YC – электромагнитная муфта).

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

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

Данная схема обеспечивает так называемую *нулевую защиту* – защиту от самопроизвольного повторного включения асинхронного двигателя при восстановлении напряжения сети после аварийного понижения его до нуля или до недопустимо низких значений. При перебое в электроснабжении контактор КМ1 отпадает, размыкая все свои контакты, включая и блок-контакты, а при появлении напряжения в сети контактор КМ1 не включится сам, пока не будет нажата кнопка SB1. То же самое будет происходить, если напряжение сети уменьшится до 50...60 % номинального при переменном токе и до 15...20 % при постоянном токе. Если электродвигатель включают рубильником, пакетным выключателем и контроллером, то при перебое в электроснабжении и остановке механизма схема электропривода не нарушается, а восстановление напряжения в сети вызывает самопроизвольное включение двигателя. Такой внезапный пуск двигателя и механизма может стать причиной аварии или несчастного случая.

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

На рис. 9.1, б показана схема управления пуском асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с реверсивным магнитным пускателем. Для подачи командных импульсов имеются три кнопки SB1, SB2, SB3. При нажатии кнопки

SB1 включается контактор KM1, который своими силовыми контактами KM1 подключает статор двигателя к сети. Одновременно он своим замыкающим блок-контактом шунтирует кнопку SB1, а размыкающим блок-контактом разрывает цепь катушки контактора KM2, чтобы исключить возможность короткого замыкания в силовой цепи двигателя через главные контакты контакторов KM1 и KM2 при одновременном нажатии обеих кнопок (SB1 и SB2). При нажатии кнопки SB2 включается контактор KM2. Две фазы статора при этом меняются местами, и двигатель изменит направление вращения. В данной схеме для реверса электродвигателя необходимо предварительно нажать на кнопку SB3 («Стоп»), а затем уже на кнопку SB2.

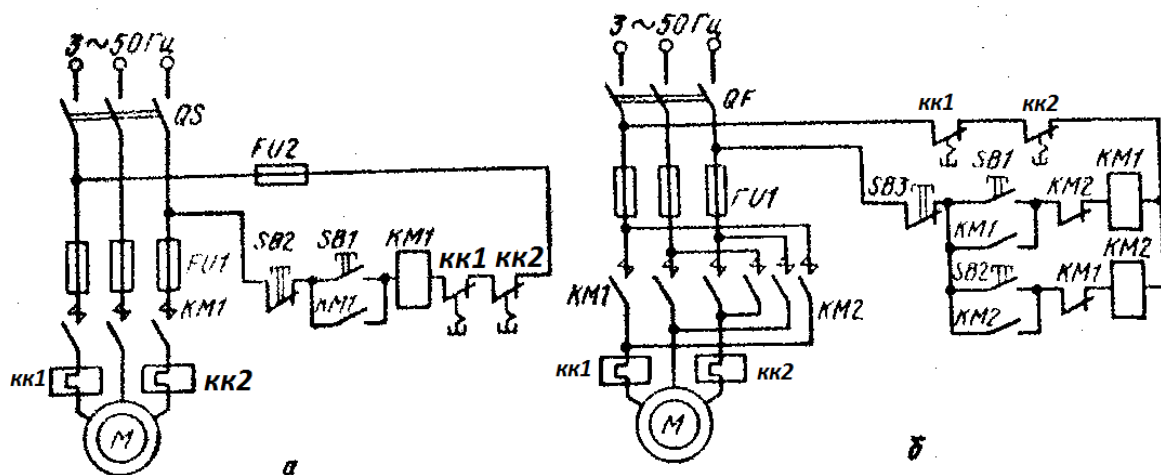


Рис. 9.1. Схемы пуска асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

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

В схеме на рис. 9.1, а защита двигателя М осуществляется тепловыми реле КК1, КК2, включенными в две фазы статора, а также плавкими предохранителями FU1. Размыкающие контакты защитных реле КК1, КК2 включены в цепь катушки контактора KM1. Защита схемы управления двигателем осуществляется плавкими предохранителями FU2. При перегрузке или коротком замыкании срабатывает реле защиты КК1 или КК2. Контакт защитного реле размыкается и отключает ка-

тушку контактора КМ1, который своими главными контактами КМ1 отключит двигатель М от сети.

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

Часто необходимо, чтобы электропривод работал, лишь пока нажата кнопка «Пуск». Такое управление требуется при установочных перемещениях (при наладке), когда при кратковременном нажатии на кнопку должно произойти небольшое перемещение (толчок) узла станка. В данном случае не нужны контакты самопитания для кнопки «Пуск» и сама кнопка «Стоп» (рис. 9.2, а). Нередко возникает необходимость управления одним и тем же электроприводом в обоих режимах: установочном и длительном (рис. 9.2, б). Для *длительного режима* работы электродвигателя нужно кратковременно нажать на кнопку П, что вызовет включение промежуточного режима РП. Один замыкающий контакт этого реле шунтирует кнопку П и дает возможность снять ее нажатие, не вызывая отключения реле; другой – включает катушку контактора 1К. Для осуществления установочных перемещений необходимо нажимать кнопку У.

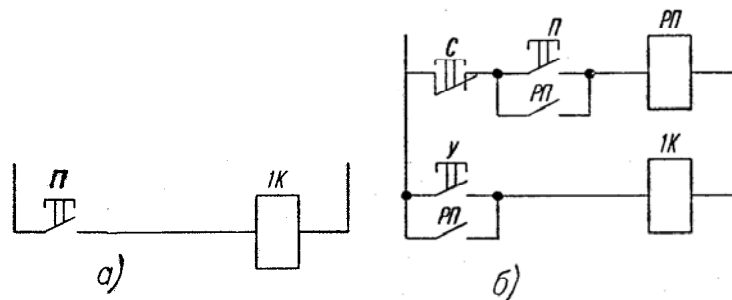


Рис. 9.2. Схемы пуска АД с короткозамкнутым ротором

Блокировки. *Блокировкой* называется часть электротехнического устройства, предназначенная для предотвращения или ограничения выполнения операций одними частями устройства при определенных положениях других частей в целях предупреждения недопустимых состояний устройства или исключения доступа к его частям, находящимся под напряжением. Блокировки *по исполнению* могут быть *механическими* и *электрическими*.

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

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

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

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

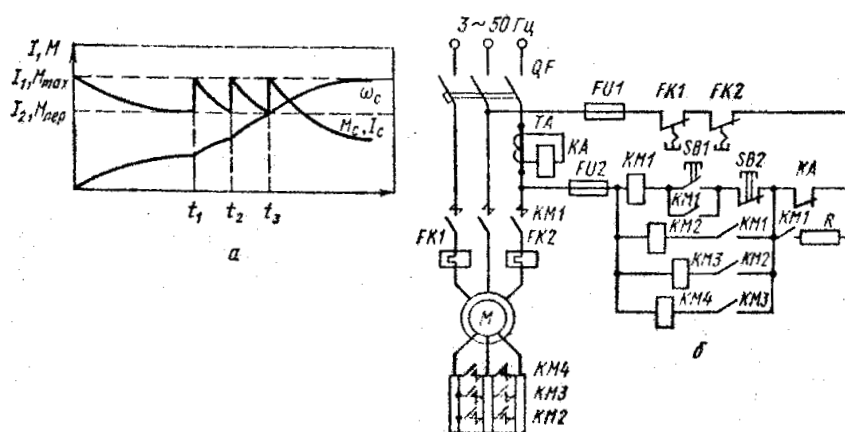


Рис. 9.3. Пусковая диаграмма (а) и схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором в функции тока (б)

Автоматическое управление в функции тока. Величина тока во время пуска двигателя колеблется в заданных пределах (см. рис. 9.3, а) $I_1 - I_2$, где I_1 – наибольший пусковой ток в момент включения электродвигателя. По мере разгона двигателя его ток снижается до величины I_2 , при которой часть пускового реостата шунтируется, что приводит к новому увеличению тока до значения I_1 и т.д. Рассматриваемый метод управления основан на применении токовых реле с катушками, включаемыми в силовую цепь двигателя непосредственно или через трансформатор тока.

Схема пуска асинхронного электродвигателя с фазным ротором в функции тока показана на рис. 9.3. После включения линейного контактора КМ1 двигатель запускается при полностью введенном в ротор реостате. Под действием

пускового броска токовое реле КА включается и размыкает свой контакт. Катушка КМ1 при этом получает питание через блок-контакт КМ1 и резистор R. Замыкание блок-контакта КМ1 в цепи ускоряющего контактора КМ2 не вызывает включения последнего из-за значительной величины сопротивления резистора R.

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

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

Широкое распространение получили *пневматические реле времени*, обеспечивающие выдержку времени от 0,4 до 180 с. В схемах постоянного тока широко используются *электромагнитные реле времени* (рис. 9.6, 9.7). Электромагнитные реле времени обеспечивают выдержки времени от 0,3 до 16 секунд (*в зависимости от исполнения*).

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

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

Схема автоматического пуска асинхронного двигателя с использованием реле времени электромагнитного типа показана на рис. 9.4. Нажатием кнопки SB1 подается питание на катушку контактора КМ1, который, включившись, своими главными контактами подключает электродвигатель М к сети при полностью введенном в цепь ротора реостате. Размыкающий блок-контакт КМ1 отключает реле времени КТ1, которое с выдержкой времени включает первый ускоряющий контактор КМ2. Включившись, он шунтирует первую ступень пускового реостата. Аналогично шунтируются вторая и третья ступени пускового реостата, после чего двигатель выходит на естественную характеристику и пуск на этом заканчивается.

Схема автоматического управления асинхронным двигателем с фазным ротором с динамическим торможением в функции времени представлена на рис. 9.5. Перед пуском двигателя универсальный переключатель SA должен сто-

ять в положении С («Стоп»), в котором замкнуты контакты 2–4, а контакты 1–3 разомкнуты. В этом положении переключателя катушки контакторов КМ1 – КМ4 отключены, двигатель неподвижен. При замыкании рубильника в схеме QS1 практически ничего не изменяется. При замыкании рубильника QS2, хотя двигатель остается неподвижным, через размыкающие контакты КМ1 и КМ2 включатся катушки реле времени КТ1 и КТ2. Размыкающие контакты реле КТ1, КТ2 разомкнутся в цепях контакторов КМ2 и КМ3, а контакт КТ2 в цепи реле напряжения КУ замкнется. Через контакты 2–4 универсального переключателя и контакт КТ2 включается реле КУ и замыкает свой контакт. Таким образом, схема готова к работе, двигатель неподвижен.

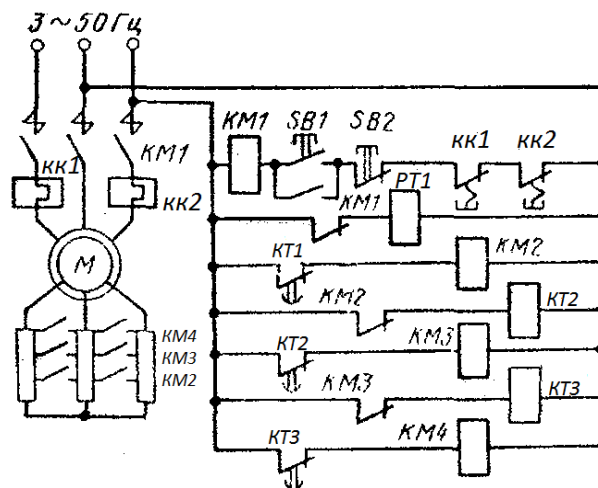


Рис. 9.4. Схема пуска АД с фазным ротором в функции времени

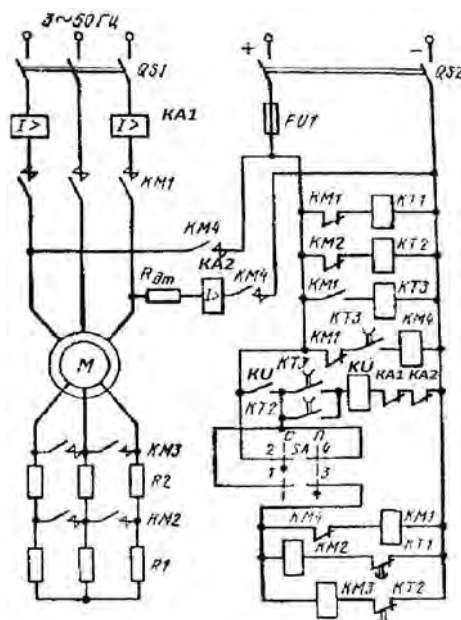


Рис. 9.5. Схема управления АД с фазным ротором с динамическим торможением в функции времени

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

Работа схемы пуска АД происходит следующим образом. Размыкающий контакт включившегося контактора KM1 размыкает цепь катушки реле времени KT1. Реле отключается и с выдержкой времени замыкает свой размыкающий контакт KT1 в цепи контактора KM2. Контактор включается и своими главными контактами KM2 шунтирует первую ступень реостата R1. Двигатель разгоняется по новой реостатной характеристике. Размыкающий блок-контакт KM2 размыкает цепь катушки реле KT2. Последнее отключается и с выдержкой времени замыкает свой размыкающий контакт KT2 в цепи контактора KM3. Контактор KM3 своими главными контактами выводит оставшуюся ступень пускового реостата. При этом двигатель выходит на естественную характеристику и пуск заканчивается.

Остановка двигателя происходит в режиме *динамического торможения*. Для остановки двигателя универсальный переключатель SA переводят в положение С («Стоп»). При этом его контакты 1–3 размыкаются и отключают контакторы KM1 – KM3. Kontakтами KM1 двигатель отключается от сети переменного тока, а в цепи ротора вводится весь пусковой реостат, поскольку контакты KM2, KM3 разомкнутся. Одновременно с перечисленными выше переключениями разомкнется контакт KM1 в цепи реле времени KT3 и замкнется контакт KM1 в цепи контактора KM4. Хотя катушка KT3 обесточивается, контакт реле KT3 в течение времени выдержки останется замкнутым. Через контакты KM1 и KT3 в катушку контактора KM4 будет проходить ток. Замкнувшиеся контакты KM4 через дополнительный резистор $R_{д.т}$ подадут постоянный ток в две фазы статора асинхронного двигателя. Двигатель остановится в режиме интенсивного динамического торможения.

По истечении выдержки времени контакты реле времени KT3 отключат контактор KM4 и последний своими контактами отключит источник постоянного тока от статора двигателя. На этом торможение заканчивается.

Защита схемы управления осуществляется плавкими предохранителями FU1, защита двигателя от перегрузок и коротких замыканий – максимальным двухкатушечным реле KA1, защита цепи постоянного тока в режиме динамического торможения – максимальным реле KA2. Максимальная защита работает следующим образом: при перегрузке или коротком замыкании срабатывает (включается) максимальное реле и размыкает свой контакт KA1 (или KA2) в цепи реле напря-

жения КУ. Реле КУ отключается, своим замыкающим контактом КУ размыкает цепь контактора КМ1, и двигатель отключается от сети.

Схема автоматизации пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением посредством электромагнитных реле времени 1РУ и 2РУ, называемых в таких схемах реле ускорения, приведена на рис. 9.6.

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

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

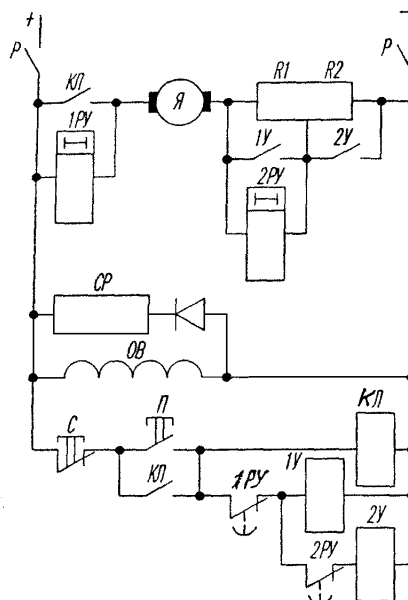


Рис. 9.6. Автоматизация пуска двигателя постоянного тока

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.

На рис. 9.7 представлена схема резисторного пуска двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением с использованием электромагнитных реле времени и командоконтроллера. Такие схемы в реверсивном исполнении используются на транспортных установках. Пуск осуществляется в три ступени. Командоконтроллер SM имеет четыре положения (0, 1, 2, 3). В нулевом положении командоконтроллера SM замкнуты его контакты 0–0, включено реле КУ и замкнут его контакт КУ, подающий питание на нижнюю часть схемы управления. Двигатель отключен от сети. В положении 1 командоконтроллера замкнут его контакт I–I, включается контактор KM1, который подключает двигатель к сети при полном сопротивлении в цепи якоря.

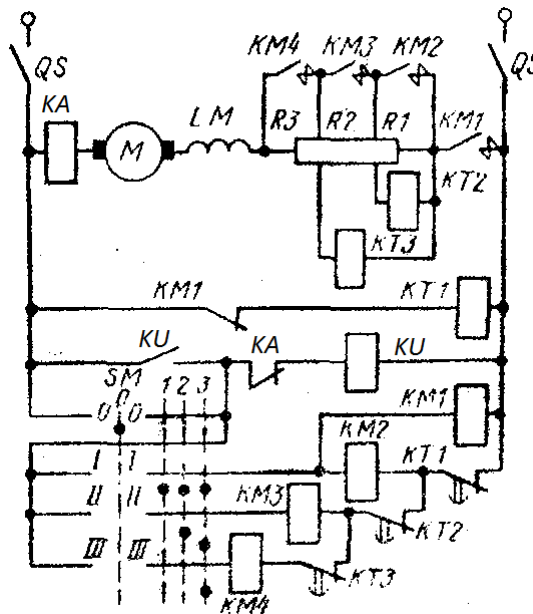


Рис. 9.7. Схема пуска двигателя постоянного тока

Разгон двигателя осуществляется автоматически с помощью реле времени КТ1...КТ3. Ручка командоконтроллера устанавливается в крайнее (3) положение, при котором замыкаются все его контакты I–I; II–II; III–III. Размыкающий блок-контакт включившегося ранее контактора KM1 отключает реле времени КТ1, которое с заданной выдержкой времени замкнет свой контакт в цепи ускоряющего контактора KM2. Последний, включившись, шунтирует секцию R1 пускового реостата; при этом отключается реле времени КТ2. Последнее с выдержкой времени включит контактор KM3, который зашунтирует вторую секцию пускового реостата R2. Третья секция пускового реостата будет зашунтирована аналогично.

Реле напряжения КУ осуществляет нулевую блокировку командоконтроллера. Включение двигателя и его разгон можно осуществлять только из нулевого положения командоконтроллера. Защита двигателя от перегрузки осуществляется максимальным токовым реле КА, размыкающий контакт которого включен в цепь катушки реле напряжения КУ.

Автоматическое управление в функции скорости. Простейшим командным аппаратом в системах автоматического управления в функции скорости является *индукционное реле контроля скорости* (рис. 9.8). Валик 1 реле связывают с валом электродвигателя, скорость которого необходимо контролировать. На этом валике закреплен цилиндрический постоянный магнит 2. На том же валике 1 на отдельных подшипниках установлено кольцо 3 из листовой стали. На внутренней поверхности кольца уложена обмотка 4, аналогичная обмотке ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя.

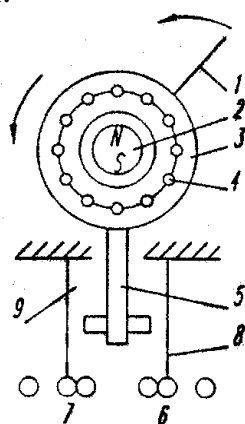


Рис. 9.8. Схема реле контроля скорости

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

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

реле замыкает контакт, включенный параллельно замыкающему блок-контакту КР. Через катушку КТ ток при этом не протекает, так как цепь ее разорвана замыкающим контактом КР. В таком состоянии схема находится во время работы станка.

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

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

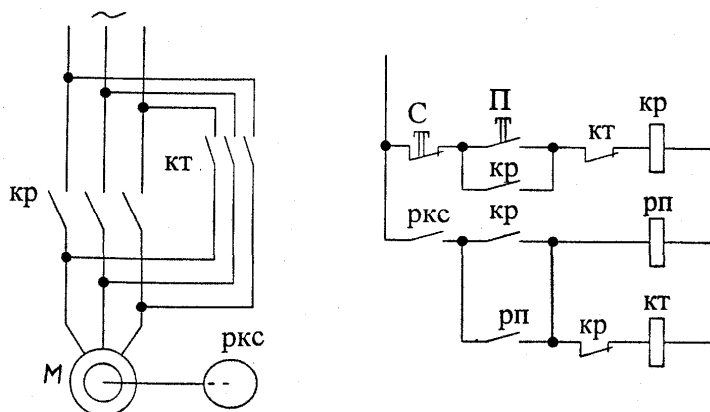


Рис. 9.9. Схема торможения противовключением неререверсивного двигателя

Лекция 10. АППАРАТУРА И СХЕМЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Основными видами защиты электродвигателей и сети от ненормального по значению и длительности повышения тока являются *максимальная токовая, тепловая, минимальная по напряжению и нулевая*.

Максимальная токовая защита (МТЗ). Эта защита предназначена для отключения участка сети, в котором произошло короткое замыкание (к.з.). Простейшим аппаратом МТЗ является *плавкий предохранитель*. В электроустановках

до 1000 В применяют предохранители ПР, состоящие из фибровой трубки, на обоих концах которой запрессованы латунные обоймы с латунными колпачками, навинчиваемыми на обоймы. Плавкая вставка представляет собой цинковую пластинку, имеющую несколько сужений для более быстрого перегорания. Пластинка привернута винтами к медным ножам, которыми предохранитель вставляется в пружинные губки на панели. Возникающая при перегорании плавкой вставки дуга вызывает газогенерацию газов из стенок фибровой трубки. Давление резко возрастает и происходит интенсивное гашение дуги. Время плавления плавкой вставки зависит от кратности тока (*по отношению к номинальному*), проходящего по вставке. Ниже приведена эта зависимость:

Кратность тока	1,25	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	4,5
Время плавления (с) ..	-	360	120	40	8	4,5	2,5

Предохранители изготавливают на 15, 60, 100, 200, 450, 600, 1000 А при напряжении 500 В.

Достоинством плавких предохранителей являются надежная защита сети от токов к.з., простота и низкая стоимость.

Для электродвигателей постоянного тока и асинхронных с фазным ротором, пускаемых посредством реостата, плавкую вставку выбирают по номинальному току электродвигателя. Для короткозамкнутых асинхронных двигателей плавкую вставку выбирают на силу тока, в 2–2,5 раза меньшую пускового. Пуск электродвигателей происходит кратковременно, поэтому плавкая вставка при пуске не успевает перегореть. Однако предохранитель с плавкой вставкой, выбранной таким образом, не защищает электродвигатель при длительных перегрузках (сравнительно небольших по величине).

Тепловая защита. Для защиты электродвигателя от недопустимого перегрева при длительных небольших перегрузках применяют **тепловые реле** (рис. 10.1). Ток защищаемого электродвигателя проходит через нагревательный элемент 1. Вблизи него расположена пластинка, состоящая из двух наложенных одна на другую и сваренных между собой полос 2 из металлов с различными коэффициентами теплового расширения. При нагревании пластинка изгибается вправо, воздействует на рычаг 4, который под действием пружины 5 повернется против часовой стрелки и разомкнет контакт 6. Этот контакт, включенный в цепь управления электродвигателя, отключит электродвигатель от сети. После остывания биметаллической пластинки нажатием кнопки возврата 3 рычаг 4 возвращается в исходное состояние и контакт 6 замыкается.

Правильно выбранное и отрегулированное тепловое реле срабатывает при перегрузках электродвигателя по току на 20 % за время 20 мин и не срабатывает при пуске двигателя или значительных, но кратковременных перегрузках (*из-за тепловой инерции реле*). При больших токах тепловое реле отключает электро-

двигатель значительно позже, чем плавкий предохранитель. Поэтому для надежной защиты электродвигателя в схеме последовательно с тепловым реле устанавливают и плавкие предохранители или максимальное реле.

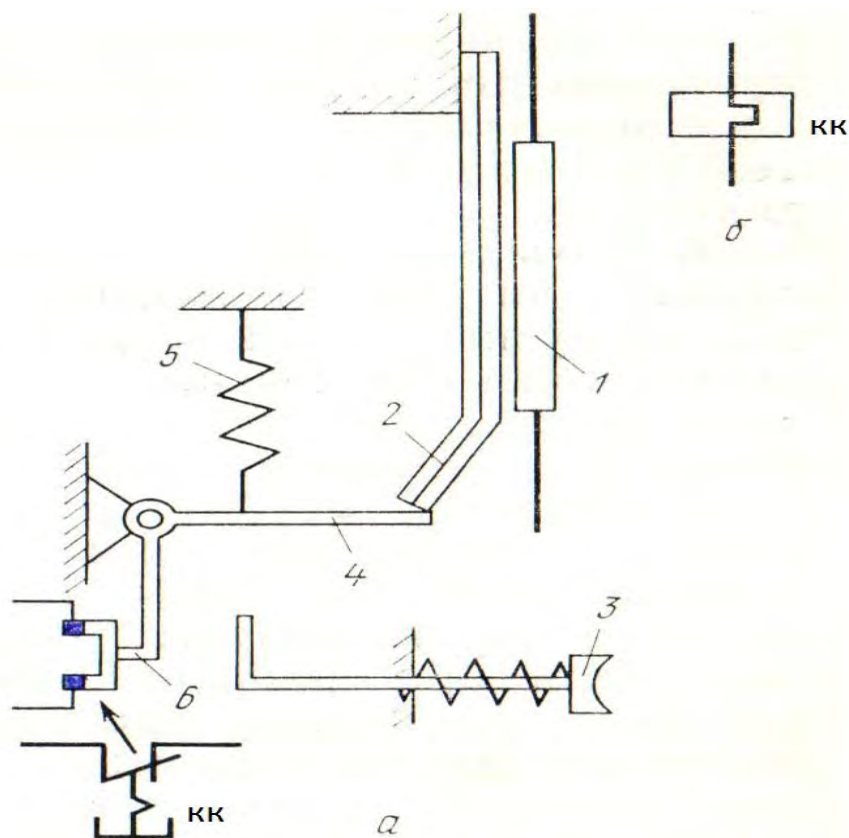


Рис. 10.1. Схема (а) и условное обозначение нагревательного элемента и контакта (б):

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

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

Для защиты от коротких замыканий (и чрезмерных перегрузок по току) кроме плавких предохранителей применяют **максимальные реле** постоянного или переменного тока. Схема устройства *электромагнитного максимального реле* пе-

ременного тока типа ЭТ-520 показана на рис. 10.2. Когда через катушки 2 протекает ток, в магнитопроводе 3 появляется магнитный поток. Стальной якорь 1, укрепленный на оси 5, поворачивается, преодолевая противодействие пружины 8. При достаточном увеличении тока в катушках якорь повернется на такой угол, что контакты 9 будут разомкнуты серебряным мостиком 4.

Уменьшение тока позволит пружине 8 повернуть подвижную систему реле в исходное положение. Изменение тока срабатывания, называемого *уставкой 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.

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

Минимальная защита по напряжению. Эта защита отключает двигатели при снижении напряжения сети до 60—70 % номинального, так как при номинальном статическом моменте и пониженном напряжении по двигателю проходит ток, превышающий номинальный. Минимальная защита осуществляется с помощью минимальных реле по напряжению, включаемых на линейное напряжение сети (при $U < 1000$ В - непосредственно, при $U > 1000$ В — через трансформаторы напряжения) и отрегулированных на отключение при $U < (0,6-0,7) U_{ном}$. Минимальное реле по напряжению при отключении воздействует на механизм свободного расцепления *автоматического выключателя*, который отключает питающую сеть двигателя.

Нулевая защита. Эта защита отключает электрические установки при полном исчезновении напряжения, так как при кратковременном перерыве в подаче электроэнергии возможны несчастные случаи, связанные с внезапным включением двигателей. *Нулевая защита* осуществляется аналогично *минимальной по напряжению*, только нулевое реле по напряжению настраивается на отключение при $U < (0,2+0,3) U_{ном}$. Нулевая защита отдельных электроприемников, например электродвигателей, включаемых с помощью контакторов, осуществляется катушкой контактора (см. рис.9.1).

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

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

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

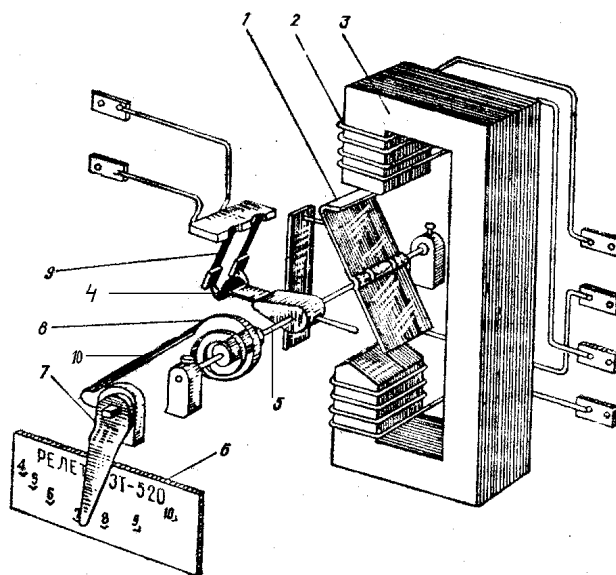


Рис. 10.2. Конструктивная схема максимального электромагнитного реле тока

В схемах с аппаратами ручного управления для обеспечения нулевой защиты применяют промежуточные реле (рис. 10.3). Перед началом работы станка необходимо нажать на кнопку ПП (подготовка пуска). Включится промежуточное реле РП и замкнет свой контакт РП, после чего кнопку ПП можно отпустить, а нижняя часть схемы с контактами контроллера КК-1, переключателя управления ПУ и т.д. и катушками контакторов оказывается под напряжением. При уменьшении напряжения питания до нуля или до недопустимо низких значений реле РП отпадает и его контакт РП отключает питание нижней части схемы. Для нового включения установки необходимо предварительно нажать на кнопку ПП. Наличие напряжения питания сигнализируется лампой ЛС. В данной схеме электрические цепи 1 – 3 замыкаются двумя аппаратами: кнопкой ПП и командоконтроллером КК.

Если все цепи управления схемы замыкаются одним аппаратом (командоконтроллером), можно применить схему, изображенную на рис. 10.3, 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 разомкнется, а другие замкнутся (в соответствующих положениях рукоятки командоконтроллера), при этом реле РП будет питаться через контакт самоблокировки. Если напряжение питания исчезнет, реле РП отключится. Для нового

включения контакторов 1К и др. при появлении напряжения питания необходимо предварительно вернуть командоконтроллер в нулевое положение.

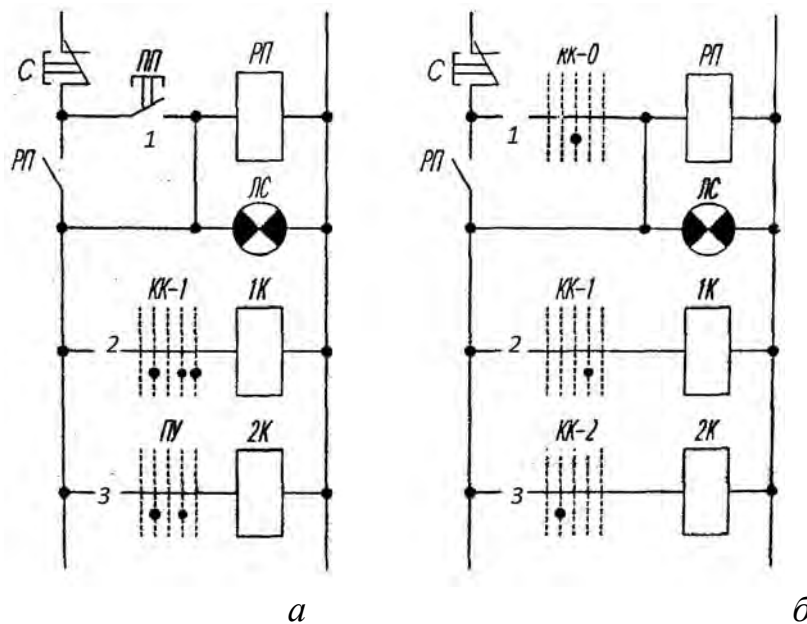


Рис. 10.3. Нулевая защита в схемах с командоконтроллером

Лекция 11. БЕСКОНТАКТНАЯ АППАРАТУРА. ДАТЧИКИ

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

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

На рис. 11.1 представлена схема датчика положения на основе Геркона, управляемого полем постоянного магнита. В немагнитном корпусе 1 расположены геркон 2 и воздействующий на его контакты постоянный магнит 3. При вхождении в щель ферромагнитной полосы 4 магнитный поток Φ постоянного магнита шунтируется, контакты геркона переключаются, переходя в исходное положение.

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

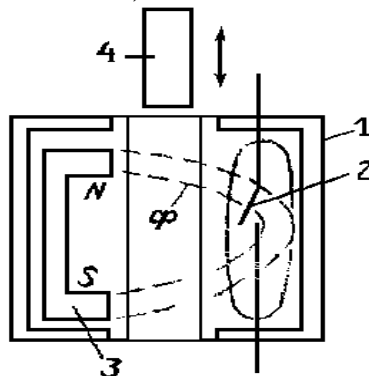


Рис. 11.1. Схема датчика положения на герконе

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

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

где β – угол сдвига фаз вторичной и первичной обмоток;

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

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

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

Датчик скорости используется для контроля угловой скорости двигателей. Наиболее широко в качестве датчиков скорости применяются тахогенераторы постоянного и переменного тока, представляющие собой электрические машины малой мощности, работающие в режиме генератора. Тахогенераторы переменного тока не имеют контактов, что является их достоинством. Различают синхронные и асинхронные тахогенераторы. Синхронные тахогенераторы представляют собой

небольшую синхронную машину с ротором в виде постоянного магнита. Выходной величиной такого тахогенератора наряду с ЭДС является и частота.

В электроприводе применяются также импульсные датчики скорости, основанные на модуляции светового потока, направленного от источника излучения через диск с прорезями на фотоприемник. Частота выходного сигнала пропорциональна угловой скорости.

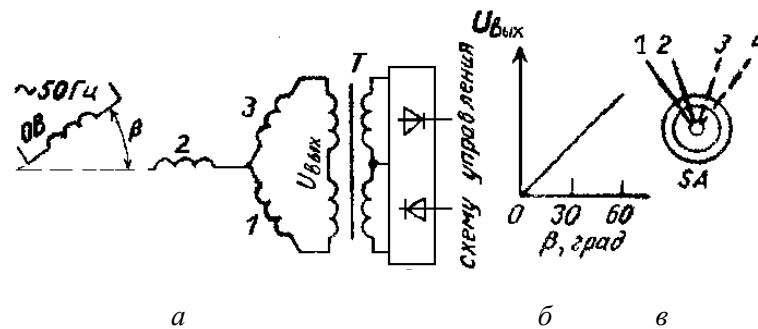


Рис. 11.2. Сельсинный командоаппарат:

a – схема; *б* – статическая характеристика; *в* – условное обозначение

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

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

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

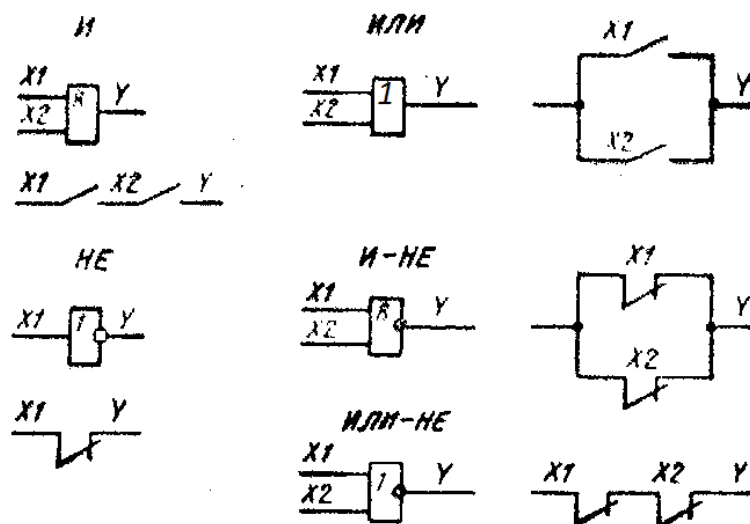


Рис. 11.3. Графическое изображение логических элементов

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

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

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

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

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

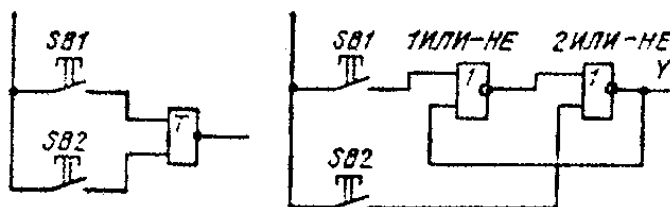


Рис. 11.4. Схема элемента ПАМЯТЬ

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

На рис. 11.5 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 помо-

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

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.

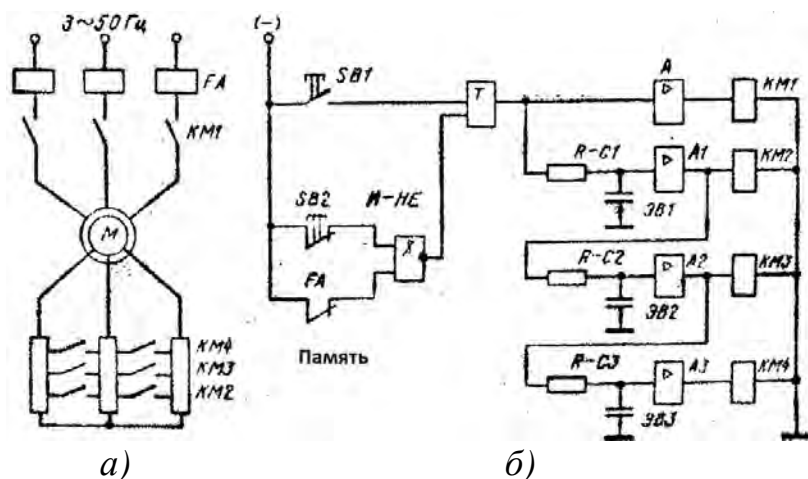


Рис. 11.5. Схема автоматического пуска АД с использованием логических элементов

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

Раздел 4. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

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

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

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

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

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

Мощность электродвигателя должна соответствовать нагрузке на его валу, так как *недостаточная* мощность может привести к нарушению нормальной работы механизма, снижению его производительности, перегреву электродвигателя (из-за возможных перегрузок) и сокращению его срока службы и даже к возникновению аварийной ситуации, а *излишняя мощность* увеличивает капитальные затраты и эксплуатационные расходы вследствие недогрузки электродвигателя и снижения его КПД (у АД коэффициента мощности). Поэтому определение номинальной мощности электродвигателя 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, двигателя и др.

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

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

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

Наиболее простыми по устройству и управлению, надежными и экономичными в эксплуатации, имеющими наименьший вес, габариты и стоимость при определенной мощности, являются АД с короткозамкнутым ротором. Их вес на единицу мощности в 1,5...2,0 раза ниже, чем у ДПТ.

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

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

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

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

Для механизмов с высокими требованиями в отношении регулирования скорости, качества работы в динамических режимах, с частыми пусками и остановами

применяются электродвигатели постоянного тока, при этом в зависимости от характера статического момента на валу и диапазона регулирования используются ДПТ независимого (параллельного), последовательного или смешанного возбуждения. Их использование в этих случаях связано с необходимостью применения преобразователей переменного тока в постоянный.

В регулируемых электроприводах применяют системы, которые при выполнении технологических требований оказываются более выгодными экономически. Поэтому чаще всего экономическое 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, -45 и +10 °С – для умеренного климата, +45, -10 и +27 °С – для тропического, +40, -40 и +10 °С – для морского климата.

По способу защиты электродвигателя от воздействия окружающей среды различают:

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

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

По способу вентиляции двигатели выполняются с естественной, с самовентиляцией и независимой вентиляцией. При *естественной* вентиляции двигатели не имеют каких-либо специальных устройств для охлаждения. У двигателей с *самовентиляцией* охлаждение осуществляется вентилятором, смонтированным на валу двигателя. При *закрытом исполнении* вентилятор устанавливается снаружи под колпаком. Он обдувает ребристую поверхность двигателя (такие двигатели называются *обдуваемыми*).

Интенсивность охлаждения электродвигателей с естественной вентиляцией и самовентиляцией зависит от угловой скорости вала двигателя и ухудшается при

ее снижении. Охлаждение двигателей при независимой вентиляции осуществляется с помощью специального вентилятора, приводимого в движение дополнительным двигателем, что позволяет несколько повысить нагрузку главного двигателя, особенно при снижении его скорости.

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

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

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

Для обозначения конструктивного исполнения по способу монтажа применяют латинские буквы ИМ (от англ. International Mounting) и следующие за ними четыре цифры. Первая цифра показывает группу конструктивного исполнения (на лапах, без лап, с фланцем и т.д.), вторая и третья – способы монтажа, а четвертая – исполнение конца вала (цилиндрический, конический и др.). Например: ИМ1001 – электродвигатель с двумя подшипниковыми щитами, на лапах, вал горизонтальный; ИМ1011 – то же, но с вертикальным валом.

Нагрев и охлаждение электродвигателей. Процесс преобразования электрической энергии в механическую в электродвигателе сопровождается потерями мощности ΔP , которые превращаются в тепло. В результате отдельные части электродвигателя нагреваются. Особенно чувствительна к повышению температуры изоляция обмоток, срок службы которой в значительной мере определяет срок службы электродвигателя. Поэтому наибольшая допустимая температура

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

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

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

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

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

Номинальная мощность электродвигателя относится к температуре окружающей среды $+40^{\circ}\text{C}$. При меньшей температуре, чем $+40^{\circ}\text{C}$, допустимая длительная нагрузка электродвигателя может быть больше номинальной, а при температуре окружающей среды более $+40^{\circ}\text{C}$ допустимая длительная нагрузка должна быть меньше номинальной.

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

При постоянной нагрузке нагрев электродвигателя описывается уравнением

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

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

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

A – количество тепла, отдаваемое электродвигателем в окружающую среду в единицу времени при разности температур в 1°C (теплоотдача), Дж / (с · $^{\circ}\text{C}$);

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

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

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

Зависимость $\tau = f(t)$ представлена на рис. 12.1 кривой 1. Величина τ_y является асимптотой этой кривой. Нагрев двигателя происходит по экспоненциальному закону и характеризуется *постоянной времени нагрева T_n* . Время достижения перегревом своего установившегося значения τ_y при экспоненциальном законе его изменения теоретически бесконечно большое. Практически процесс нагревания считается законченным, когда перегрев τ достигает $(0,95 \dots 0,98) \tau_y$ за время $t_{\text{уст}} = (3 \dots 4) T_n$. Например, при $t = 4T_n$ $\tau = 0,982 \tau_y$, т.е. разница между τ и τ_y меньше двух процентов.

Таким образом, время достижения перегревом своего установившегося значения зависит от постоянной времени нагрева двигателя. Так как теплоемкость двигателя пропорциональна его объему, а теплоотдача – площади его поверхности, то двигатели большей мощности, имеющие большие габариты, характеризуются и большей постоянной времени нагрева. У защищенных электродвигателей малой мощности T_n составляет 20...30 мин, а у закрытых двигателей большой мощности 2–3 ч.

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

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

Остывание неподвижного электродвигателя происходит медленнее (его *постоянная времени охлаждения* T_0 T_n), чем нагревание, что объясняется отсутствием его вентиляции при $\omega = 0$.

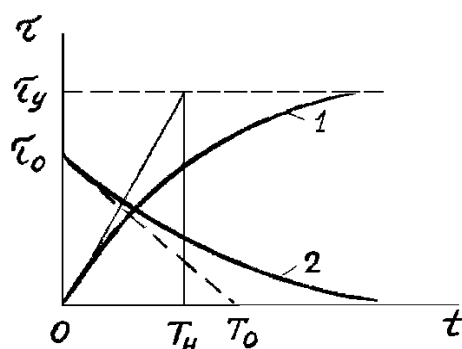


Рис. 12.1. Кривые нагрева (1) и охлаждения (2) двигателя

Из приведенных уравнений следует, что процессы нагревания и охлаждения электродвигателя зависят практически от величин τ_y , T_n и T_0 . 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 . Установившийся тепловой режим наступает тогда, когда все выделяемое в двигателе тепло отдается в окружающую среду, т.е. когда температура двигателя становится неизменной ($\tau = \tau_y = \text{const}$).

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

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

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

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

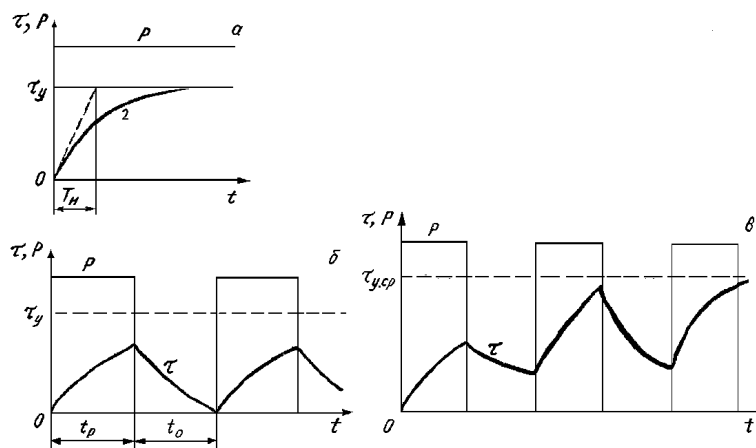


Рис. 12.2. Графики номинальных режимов электроприводов

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

$$ПВ = t_p / (t_p + t_0) 100 \% = (t_p / t_{ц}) 100 \%$$

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

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

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

Принято различать *нагрузочные диаграммы механизма и электропривода*. Под *нагрузочной диаграммой механизма* понимают *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 прежде всего относятся: включение двигателя в сеть и его отключение, изменение параметров подводимого напряжения, главных цепей и цепей возбуждения и т.п. В таких случаях $d\omega/dt \neq 0$. Поэтому при построении нагрузочной диаграммы электропривода $M(t)$ следует пользоваться уравнением движения.

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

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

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

Режим работы электропривода лифтов (как пассажирских, так и грузовых) характеризуется частыми включениями и отключениями: 100 – 240 включений в час для пассажирских лифтов и 70 – 100 включений в час для грузовых лифтов.

В зависимости от назначения применяются пассажирские лифты со следующими номинальными скоростями:

- в административных зданиях и гостиницах: до 9 этажей – от 0,7 м/с до 1 м/с; от 9 до 16 этажей – от 1 до 1,4 м/с;

- в административных зданиях от 16 этажей – 2 и 4 м/с.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к электроприводу лифтов, является необходимость ограничения ускорений и замедлений кабины $a=dv/dt$ и их производных (рывков) $\rho=d^2v/dt^2$.

Максимальная величина ускорения (замедления) движения кабины при нормальных режимах работы не должна превышать: для всех лифтов, кроме больничных, 2 м/с^2 , для больничных лифтов – 1 м/с^2 .

Рывок правилами не регламентируется. Однако необходимость его ограничения, как и ограничение ускорения, определяется необходимостью ограничения динамических нагрузок в механической передаче во время переходных процессов и задачей обеспечения требуемого комфорта для пассажиров. Ограничение величин ускорения и рывка должно обеспечивать высокую плавность переходных процессов и тем самым исключить отрицательное влияние на самочувствие пассажиров. Для скоростных лифтов максимальное значение рывка составляет $3 - 10 \text{ м/с}^3$.

Для обеспечения максимальной производительности лифта во время переходных процессов электропривод должен обеспечивать разгон и замедление кабины с максимальными допустимыми значениями ускорения и рывка. Соответствующий выполнению этого условия график движения кабины, который обычно считается оптимальным (так как он обеспечивает минимальную длительность режимов разгона - торможения кабины), приведен на рис. 13.1. В соответствии с этим графиком, значения рывка ρ и ускорения a на определенных интервалах переходного процесса поддерживаются постоянными и равными предельно допустимым значениям.

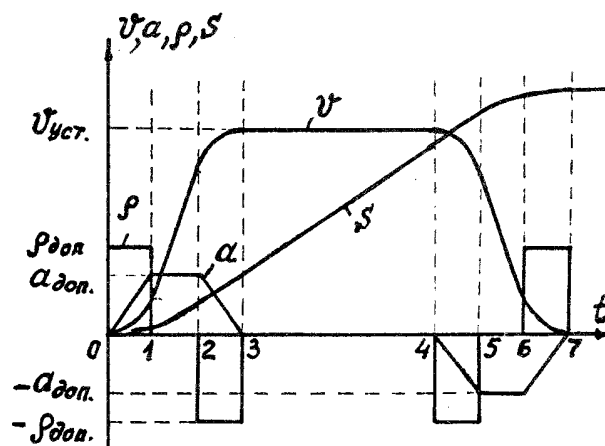


Рис. 13.1. Оптимальная диаграмма движения кабины лифта

На первом этапе разгона 0 – 1 поддерживается постоянным рывок, при этом ускорение изменяется по линейному закону

$a_1(t) = \int_0^t \rho_{\text{доп}} dt = \rho_{\text{доп}} t$, а изменение скорости характеризуется квадратичной параболой:

$$v_1(t) = \int_0^t a_1(t) dt = \int_0^t \rho_{\text{доп}} t dt = \rho_{\text{доп}} t^2/2. \quad (1)$$

Путь s , проходимый кабиной на этом этапе, определяется кубической параболой:

$$s_1(t) = \int_0^t v_1(t) dt = \int_0^t \rho_{\text{доп}} t^2/2 dt = \rho_{\text{доп}} t^3/6. \quad (2)$$

Длительность первого интервала движения определяется из условия: $t_1 = a_{\text{доп}}/\rho_{\text{доп}}$.

В конце первого интервала движения ускорение достигает допустимого значения $a_1 = a_{\text{доп}}$, а скорость и пройденный путь могут быть определены при условии $t = t_1$ подстановкой в (1) и (2):

$$v_1 = a_{\text{доп}}^2/(2\rho_{\text{доп}}); \quad s_1 = a_{\text{доп}}^3/(6\rho_{\text{доп}}^2).$$

На третьем этапе движения 2 – 3, которым завершается режим разгона электропривода до установившейся скорости $v_{\text{уст}}$, рывок имеет ту же величину, что и на первом этапе, но с противоположным знаком: $\rho = -\rho_{\text{доп}} = \text{const}$, а изменения ускорения и скорости характеризуются зависимостями:

$$\Delta a_3(t) = a_{\text{доп}} + \int_0^t (-\rho_{\text{доп}}) dt = a_{\text{доп}} - \rho_{\text{доп}} t;$$

$$\Delta v_3(t) = \int_0^t a_3(t) dt = \int_0^t (a_{\text{доп}} - \rho_{\text{доп}} t) dt = (a_{\text{доп}} - \rho_{\text{доп}} t/2).$$

Длительность третьего этапа движения равна длительности первого этапа:

$$\Delta t_3 = t_1 = a_{\text{доп}}/\rho_{\text{доп}}.$$

В конце третьего этапа ускорение $a_3=0$, а изменение скорости на этом этапе $\Delta v_3 = a_{\text{доп}}^2/(2\rho_{\text{доп}})$.

На втором этапе разгона 1 – 2 скорость изменяется на величину:

$$\Delta v_2 = v_{\text{уст}} - v_1 - \Delta v_3 = v_{\text{уст}} - a_{\text{доп}}^2/(2\rho_{\text{доп}}) - a_{\text{доп}}^2/(2\rho_{\text{доп}}) = v_{\text{уст}} - a_{\text{доп}}^2/\rho_{\text{доп}}.$$

Изменение этой скорости во времени на втором этапе характеризуется линейной зависимостью:

$$\Delta v_2(t) = \int_0^t a_{\text{доп}} dt = a_{\text{доп}} t.$$

Длительность второго этапа $\Delta t_2 = t_1 = v_{\text{уст}}/a_{\text{доп}} - a_{\text{доп}}/\rho_{\text{доп}}$.

Полная длительность разгона представляет собой сумму длительностей первых трех этапов:

$$t_{\text{раз}} = t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = v_{\text{уст}}/a_{\text{доп}} + a_{\text{доп}}/\rho_{\text{доп}}.$$

Это выражение характеризует минимальное время разгона при наличии ограничений на ускорение и рывок. Так, например, если $v_{\text{уст}} = 4$ м/с, $a_{\text{доп}} = 2$ м/с², $\rho_{\text{доп}} = 5$ м/с³, то минимальное время разгона будет: $t_{\text{раз}} = 4/2 + 2/5 = 2,4$ с.

Аналогично могут быть получены выражения, характеризующие движение кабины в процессе торможения на 5-ом, 6 и 7-ом этапах диаграммы рис. 13.1. Например, для 5-го этапа (4 – 5):

$$\rho_5 = -\rho_{\text{доп}}; a_5(t) = -\rho_{\text{доп}} t; \Delta v_5(t) = -\rho_{\text{доп}} t^2/2; \Delta t_5 = a_{\text{доп}}/\rho_{\text{доп}};$$

$$\Delta v_5 = -a_{\text{доп}}^2/(2\rho_{\text{доп}}).$$

Приведенные выше формулы позволяют строить оптимальный график движения кабины лифта и определять скорости, пути и длительности всех этапов движения при заданных значениях установившейся скорости и допустимых величинах ускорения и рывка.

По соответствующим формулам можно рассчитать статическую нагрузку лифта $M_c(t)$.

Заданными для кабины лифта являются угловая скорость движения кабины ω (или линейная скорость v), а также максимальные значения величин $d\omega/dt$ и $d^2\omega/dt^2$, которые можно представить в виде графиков (рис. 13.2), состоящих из семи участков. Первым строится участок 4 графиков, на котором $\omega = \text{const}$. Затем можно построить участки 2 и 6, на которых постоянными являются ускорение и замедление, а скорость увеличивается и уменьшается по линейному закону. Участки 1, 3, 5, 7 характеризуются линейным изменением ускорения (замедления), когда рывок остается постоянным, а скорость изменяется по параболическому закону.

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

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

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

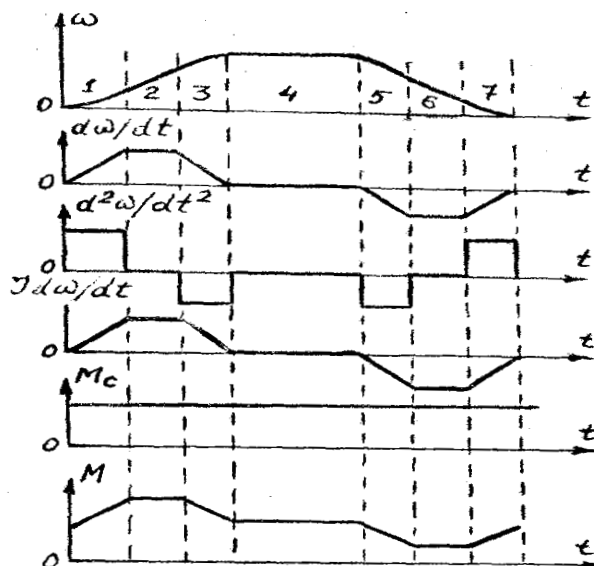


Рис. 13.2. К построению нагрузочной диаграммы ЭП пассажирского лифта

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

Методы расчета мощности электродвигателя при переменной нагрузке. В электроприводах, у которых мощность на валу электродвигателя изменяется по определенному нагрузочному графику (рис. 13.3), электродвигатель сначала *выбирают по наибольшей мощности* этого графика с учетом его перегрузки, а затем выбранный электродвигатель *проверяют по нагреву*. Примерами электропривода с переменной нагрузкой на валу электродвигателя являются электроприводы многооперационных станков, кулачковых автоматов и др. Форма нагрузочного графика зависит от обрабатываемой детали, мощности и продолжительности отдельных переходов цикла обработки детали. При этом электродвигатель вращается непрерывно почти с постоянной скоростью, так как его механическая характеристика имеет большую жесткость.

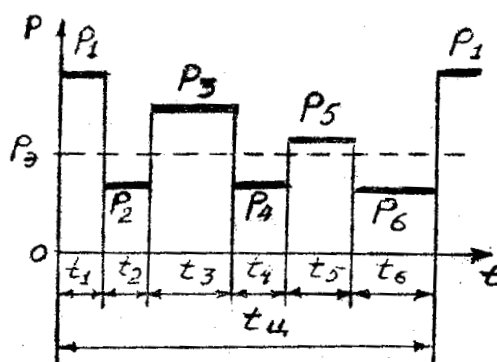


Рис. 13.3. Нагрузочный график при переменной нагрузке

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

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

Рассмотрим эти методы.

Метод средних (эквивалентных) потерь. При переменной нагрузке (в станкостроении и других областях) наиболее часто используют обычные электродвигатели, предназначенные для длительного режима работы с постоянной нагрузкой. Поэтому электродвигатель выбирают на такую постоянную мощность P_3 длительного режима работы, при которой в электродвигателе выделяется столько

же тепла за время цикла работы $t_{ц}$, сколько и при работе при переменной нагрузке:

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

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

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:

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

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

1. Используя нагрузочный график, определяют:

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

где 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 $P_{н}$. 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 формулу

$$\eta_i \approx \eta_{н} \sqrt[3]{P_i / P_{н}}.$$

2. Вычисляют ΔP_3 по формуле (13.1) и проверяют выполнение условия

$$\Delta P_3 \leq \Delta P_{н}.$$

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

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

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

где b – величина, постоянная для конкретного двигателя.

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

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

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

$$I_{1\Delta} = I_1 / \sqrt{3}; \quad I_{5\Delta} = \sqrt{(I_4^2 + I_4 \cdot I_5 + I_5^2) / 3}.$$

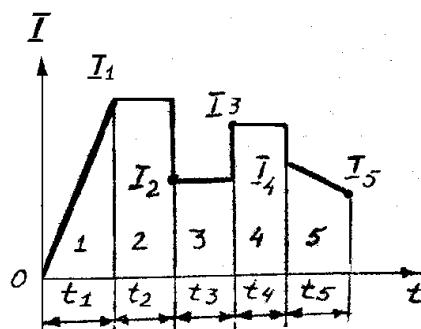


Рис. 13.4. Нагрузочный график $I = f(t)$

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

1. Рассчитывают I_3 по (13.3), используя нагрузочный график $I = f(t)$.
2. По каталогу (зная предварительно род тока, напряжение, скорость вращения и другие данные) выбирают электродвигатель с номинальным током $I_n \geq I_3$.

Данный метод применим к электродвигателю любого типа.

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

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

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

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

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

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

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

Лекция 14. РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

А. Нагрузка постоянная. Если электродвигатель должен работать с постоянной или мало изменяющейся нагрузкой (электроприводы насосов, вентилято-

ров, конвейеров, крупных металлорежущих станков), его мощность рассчитывается по эмпирическим формулам с учетом поправочных коэффициентов.

Примеры таких формул:

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

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

2. Для электропривода насоса

$$P = k_3 \cdot Q \cdot H \cdot \gamma \cdot 10^{-3} / (\eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{пер}}), \text{ кВт},$$

где Q – производительность, м³/с;

H – высота напора, м;

γ – плотность жидкости, Н/м³;

$k_3 = 1,1 \div 1,3$ – коэффициент запаса;

$\eta_{\text{нас}} = 0,45 \div 0,75$ – КПД насоса.

По каталогу выбирается электродвигатель с номинальной мощностью $P_n \geq P$. Тип двигателя выбирается с учетом окружающей среды, сопряжения с механизмом, рода тока, напряжения, скорости вращения и других технических требований (по пусковому моменту, например). Так как двигатель выбирается по условию $P_n \geq P$, то выполняются и условия $\Delta P_n \geq \Delta P$ и $\tau_y \leq \tau_{\text{доп}}$. Поэтому *при постоянной продолжительной нагрузке дополнительных расчетов по определению нагрева двигателя не требуется.*

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

Мощность по перегрузке определяется как

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

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

λ – коэффициент допустимой перегрузки:

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

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

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

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

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

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

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

где M_1 – момент на первом участке нагрузочного графика.

Пример 1. Выбрать электродвигатель для механизма, работающего по нагрузочному графику, представленному на рис. 14.1. Угловая скорость вращения вала $\omega_n = 146$ рад/с ($n_n \approx 1460$ об/мин).

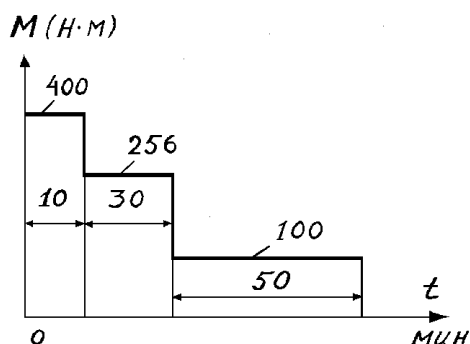


Рис. 14.1. Нагрузочный график $M = f(t)$

Решение

Эквивалентный момент (из графика)

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

Расчетная мощность электродвигателя

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

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

Номинальный момент АД

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

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

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

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

Сопоставление полученных данных с данными нагрузочного графика показывает, что принятый электродвигатель удовлетворяет требованиям перегрузки ($444 > 400$ Н·м), но не проходит по пусковым условиям ($244 < 400$ Н·м).

Следующим большим по мощности будет электродвигатель типа А02-82-4 с $P_n = 55$ кВт; $n_n = 1460$ об/мин; $\lambda_k = 2,0$; $\lambda_n = 1,1$. Данный электродвигатель, как показывают расчеты, также не проходит по пусковым условиям.

В подобных случаях, когда момент сопротивления при пуске значительно превышает момент при установившемся режиме, целесообразно принимать электродвигатель с повышенным пусковым моментом. Поэтому примем АД типа АОП – 81 – 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:

$$0,9^2 \cdot 1,8 \cdot 40 \cdot 10^3 / 1470 \approx 400 \text{ Н·м.}$$

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

Пример 2. Рассмотрим вопрос определения расчетной мощности электродвигателя для электропривода (ЭП), работающего в режиме S1 с частыми пусками, т.е. когда в его нагрузочной диаграмме необходимо учитывать и динамические моменты при разгоне $M_{дин1}$ и торможении $M_{дин2}$ (см. рис. 14.2).

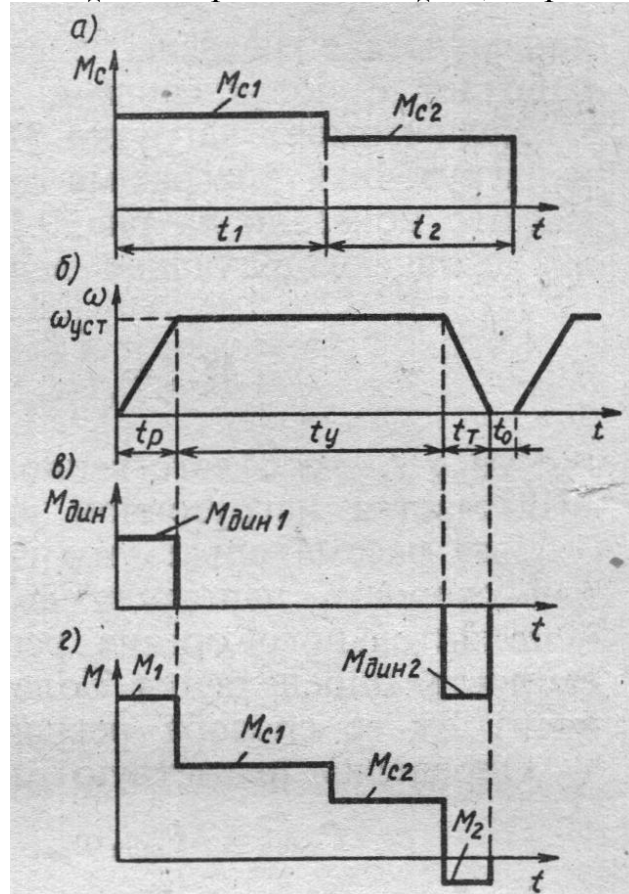


Рис. 14.2. Нагрузочная диаграмма ИО (а), тахограмма скорости (б), график динамического момента (в) и нагрузочная диаграмма электропривода (г)

Работа ЭП характеризуется приведенными к валу двигателя нагрузочной диаграммой исполнительного органа (ИО) механизма рис. 14.2, а и скоростной диаграммой рис. 14.2, б. При этом: приведенные моменты сопротивления $M_{c1} = 40$ Н·м и $M_{c2} = 16$ Н·м; $t_1 = 20$ с; $t_2 = 62$ с; $t_p = 2$ с; $t_T = 1$ с; $t_y = 77$ с; $t_0 = 2$ с; $\omega_{уст} = 146$ рад/с ($n_n \approx 1460$ об/мин); приведенный момент инерции ЭП $J = 0,8$ кг·м².

Решение. 1. Определим вначале динамические моменты на участках разгона $M_{дин1}$ и торможения $M_{дин2}$ (рис. 14.2, в):

$$M_{дин1} = J \frac{d\omega}{dt} = J \omega_{уст} / t_p = 0,8 \cdot 146 / 2 = 58,4 \text{ Н·м};$$

$$M_{дин2} = - J \omega_{уст} / t_T = - 0,8 \cdot 146 / 1 = -116,8 \text{ Н·м}.$$

2. Рассчитаем моменты двигателя на участках разгона M_1 и торможения M_2 (рис. 14.2, з):

$$M_1 = M_{c1} + M_{дин1} = 40 + 58,4 = 98,4 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_2 = M_{c2} + M_{дин1} = 16 - 116,8 = - 100,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

3. Моменты двигателя на участках установившегося движения ($t_1 - t_p$) и ($t_2 - t_T - t_0$) равны моментам нагрузки M_{c1} и M_{c2} соответственно.

4. Определим среднеквадратичный момент ЭП за цикл работы $t_{ц}$:

$$M_{с.э} = \sqrt{\sum(M_i^2 \cdot t_i) / t_{ц}} = \sqrt{((58,4^2 \cdot 2 + 40^2 \cdot 18 + 16^2 \cdot 59 + (-100,8)^2 \cdot 1) / 82)} = 27,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

5. Рассчитаем расчетную мощность электродвигателя:

$$P_{расч} = M_{с.э} \omega_{расч} = M_{с.э} \omega_{уст} = 27,5 \cdot 146 = 4015 \text{ Вт} \approx 4 \text{ кВт}.$$

Для рассматриваемой тахограммы движения $\omega_{расч} = \omega_{уст}$, так как скорость ИО не регулируется.

Далее по каталогу выбирается двигатель ближайшей большей мощности и скорости с учетом и других критериев выбора электродвигателей. Выбранный двигатель затем проверяется по перегрузочной способности.

При выборе АД с к.з. ротором двигатель должен быть проверен также по пусковым условиям, для чего сопоставляется его пусковой момент $M_{п}$ с моментом нагрузки при пуске M_1 .

Если выбранный двигатель удовлетворяет всем условиям проверки, то он принимается к применению в данном ЭП, а иначе выбирается другой двигатель (как правило, большей мощности) и проверка повторяется.

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

Для повторно-кратковременного режима работы выпускаются специальные серии электродвигателей. В каталогах на них указывается номинальная мощность P_n при нормативной (стандартной) продолжительности включения $ПВ_n = 15, 25, 40, 60$ и 100% . Длительность рабочего цикла $t_{ц}$ для них не должна превышать $1\text{ё}0$ мин, а иначе двигатель считается работающем в длительном режиме.

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

1) по заданной нагрузочной диаграмме рассчитывают $ПВ_ф$ и эквивалентную мощность $P_э$ (по одному из методов эквивалентных величин);

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

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

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

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

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

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

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

$$\Delta P_3 = \sum \Delta A_i / t_{ц}, \quad (15.1)$$

где ΔA_i – потери энергии на каждом значении нагрузки, включая процессы пуска и торможения.

Когда электродвигатель не работает (t_0 на рис. 15.1), условия его охлаждения значительно ухудшаются. Это обстоятельство учитывают введением экспериментальных коэффициентов ($\beta_0 < 1$) ухудшения охлаждения, умножая время t_0 на β_0 .

Тогда в (15.1) знаменатель уменьшается, а эквивалентные потери и номинальная мощность электродвигателя увеличиваются.

У АД защищенного исполнения с $n_0 = 1500$ об/мин и $P_n = 1 \dots 100$ кВт коэффициент $\beta_0 = 0,5 \dots 0,2$ (с увеличением P_n коэффициент β_0 убывает), у АД с обдувом $\beta_0 = 0,45 \dots 0,3$, у закрытых АД $\beta_0 = 0,98 \dots 0,93$.

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

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

Пример. АД краново-металлургической серии типа МТКВ 511-8 имеет каталожные данные: мощность $P_n = 28$ кВт при ПВ_н = 25 % и скорость $n_n = 700$ об/мин. Оценить нагрев двигателя, если он будет периодически включаться на 3 мин и преодолевать при этом момент нагрузки $M_c = 350$ Н·м, после чего будет отключаться на 5 мин. Данный цикл работы относится к повторно-кратковременному режиму работы двигателя.

Решение. 1. Определим номинальную угловую скорость и номинальный момент при ПВ_н двигателя:

$$\omega_n = \pi n_n / 30 = 3,14 \cdot 700 / 30 = 73,3 \text{ рад/с}$$

$$M_n = P_n / \omega_n = 28 \cdot 1000 / 73,3 = 382 \text{ Н·м.}$$

2. Найдем продолжительность включения двигателя в цикле ПВ₁:

$$ПВ_1 = t_p / (t_p + t_0) \cdot 100 \% = 37,5 \%$$

3. Вычислим момент нагрузки при стандартном ПВ_н = 25 % :

$$M_3 = M_c \sqrt{(ПВ_1 / ПВ_n)} = 350 \cdot \sqrt{(37,5 / 25)} = 429 \text{ Н·м.}$$

4. Сопоставим приведенные к одной стандартной ПВ_н = 25 % моменты M_3 и M_n . Так как $M_3 = 429 \text{ Н·м} > 382 \text{ Н·м} = M_n$, то двигатель при работе в таком цикле будет *перегреваться* сверх допустимого уровня.

Задача. Для условий рассмотренного *примера* при тех же значениях паузы и момента нагрузки определить: 1) продолжительность включения двигателя в цикле ПВ₁ и время работы двигателя t_p , при которых перегрев двигателя не будет превосходить допустимого уровня.

Расчет номинальной мощности электродвигателя при кратковременном режиме работы. Вспомогательные электроприводы станков (установочные перемещения суппортов, бабок, поперечин и др.) обычно работают в кратковременном режиме нагрузки. Продолжительность работы вспомогательных приводов обычно не превышает 5...15 с (1...1,5 мин у крупных станков). За это время при перегрузке в допустимых пределах электродвигатель не успевает нагреться даже до нормального перегрева. Номинальную мощность электродвигателя в кратковременном режиме работы определяют только по *условиям перегрузки*, а затем проверяют по

пусковому моменту. Мощность, расходуемая на преодоление сил трения при перемещении горизонтально движущегося узла:

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

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения, Н;

v – скорость, м/с;

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

μ – коэффициент трения движения.

Мощность на валу электродвигателя

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

где λ – коэффициент допустимой перегрузки; P_I – потребляемая мощность.

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

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

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

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

Момент АД при перегрузке

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

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

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

где μ_0 – коэффициент покоя.

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

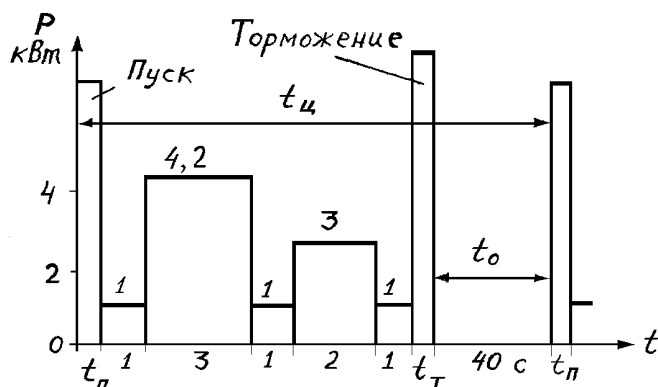


Рис. 15.1. Нагрузочный график $P = f(t)$

Раздел 5. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

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

Лекция 16. ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЧЕЛОВЕКА

Техникой безопасности называется система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих воздействие на работающих опасных производственных факторов. Опасными производственными факторами являются такие факторы, которые приводят людей к травмам или внезапному резкому ухудшению здоровья. Таким образом, техника безопасности обеспечивает безопасность, сохранение здоровья и работоспособности людей в процессе их трудовой деятельности.

Электробезопасность (или защита от поражения электрическим током) – это система организационных и технических мероприятий, технических способов и средств, обеспечивающих безопасные условия труда людей, работающих с технологическим оборудованием и ручным электроинструментом. В электроустановках опасным производственным фактором является электрический ток.

Электрический ток в электроустановках представляет большую опасность для жизни и здоровья людей, так как его (в отличие от других опасностей) нельзя обнаружить дистанционно без соответствующих приборов. **Электроустановкой** называется совокупность аппаратов, машин, линий, вспомогательного оборудования и помещений, предназначенных для производства, преобразования, распределения, накопления и передачи электрической энергии (ЭЭ).

Поражение человека электрическим током возможно при замыкании электрической цепи через его тело, что бывает при касании человека в электрической сети в двух точках: при касании непосредственно к двум фазам; при касании к одной фазе, стоя на земле или касаясь еще каких-либо заземленных конструкций; при контакте с нетоковедущими частями оборудования, случайно оказавшимися под напряжением из-за нарушения изоляции проводов электрооборудования. Поражение человека электрическим током происходит главным образом из-за несоблюдения правил техники безопасности (ПТБ), правил устройства и эксплуатации электроустановок (ПУЭ), прикосновения человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением.

Электрический ток, проходя через тело человека, может вызывать:

- **термическое действие** – ожоги отдельных участков тела, нагрев кровеносных сосудов и нервных волокон;
- **электролитическое действие** – разложение крови и других органических жидкостей, нарушая их физико-химический состав;
- **биологическое действие** – раздражение и возбуждение живых тканей организма, что может сопровождаться непровольным судорожным сокращением мышц сердца и легких; в результате могут возникать различные нарушения в организме и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и сердца.

Указанные действия электрического тока приводят к двум видам поражения организма человека: электрическим травмам и электрическим ударам.

Электрические травмы (или **электротравмы**) – это явные или скрытые повреждения в человеке при попадании его под воздействие электрического тока (напряжения). К электротравмам относятся электрические знаки и ожоги.

Электрический знак – это омертвленная кожа в виде мозоли, которая возникает на входе электрического тока в тело человека и на выходе из него. С течением времени (иногда через годы) электрические знаки исчезают.

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

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

Причинами смерти от воздействия электрического тока могут быть прекращение дыхания, а также остановка сердца или его **фибрилляция** – быстрые хаотические и разновременные сокращения волокон (фибрилл) сердечной мышцы, при которых сердце перестает работать как насос, в результате чего в организме прекращается кровообращение.

Прекращение дыхания вызывается воздействием электрического тока на мышцы грудной клетки, участвующим в процессе дыхания (возникает удушье по причине недостатка кислорода и избытка углекислоты в организме).

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

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

Электрическое сопротивление тела человека состоит из сопротивления кожи и сопротивления внутренних тканей. Наибольшее сопротивление имеет верхний слой кожи (доли миллиметра). Сопротивление тела человека – величина нелиней-

ная, с увеличением прикладываемого напряжения от 10 до 140 В оно резко уменьшается – от 10 кОм до 800 Ом, соответственно увеличивается опасность поражения человека. Сопротивление тела человека уменьшается и с увеличением продолжительности воздействия на него тока, площади и плотности контакта с токоведущей частью, а также при неудовлетворительном физическом и психическом состоянии человека. Особенно значительно сопротивление тела человека снижает наличие в нем алкоголя. В расчетах по электробезопасности за наименьшее сопротивление тела человека принимают величину, равную 1000 Ом.

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

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

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

Конкретные организационные и технические меры защиты зависят от класса помещения, напряжения и назначения электроустановки.

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

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

- сырость (относительная влажность более 75 %);
- токопроводящая пыль;
- токопроводящие полы (металлические, кирпичные, земляные и т.д.);
- высокая температура (выше +35 °С);
- возможность одновременного прикосновения человека к металлическим частям, имеющим соединение с землей, и к металлическим корпусам электрооборудования, которые могут оказаться под напряжением при повреждении изоляции;

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

- большая сырость (относительная влажность близка к 100 %);
- химически активная или органическая среда;
- два или более условий повышенной опасности (например, сырость и токопроводящий пол);

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

Системы электропитания потребителей. Питание трехфазных электроприемников может осуществляться по двум системам (рис.16.1): 1) с заземленной нейтралью и 2) с изолированной нейтралью.

Чрезвычайно опасно для жизни человека прохождение тока 0,1 А в течение 0,2 с. Ток зависит от приложенного напряжения – *напряжения прикосновения* и *сопротивления тела человека*, определяемого в основном состоянием его кожи. Сухая кожа имеет большое сопротивление, а влажная очень низкое. При определении безопасного напряжения для человека, выполняющего тяжелую работу и находящегося в условиях влажной атмосферы, сопротивление его тела принимают равным 1000 Ом ($R_{ч} = 1000 \text{ Ом}$). При допустимом токе 30 мА допустимое напряжение прикосновения $U_{пр.доп} = 0,03 \cdot 1000 = 30 \text{ В}$.

Поражение электрическим током происходит в основном в случае прикосновения человека к одной фазе сети или к корпусу электрооборудования, соединившегося с фазой в результате повреждения изоляции.

Если нейтраль системы питания заземлена (рис. 16.1, а), то прикоснувшийся к фазе человек оказывается под фазным напряжением, т.е. под напряжением 220 В (в сети с линейным напряжением 380 В). Это напряжение является очень опасным, так как по человеку проходит ток 0,22 А.

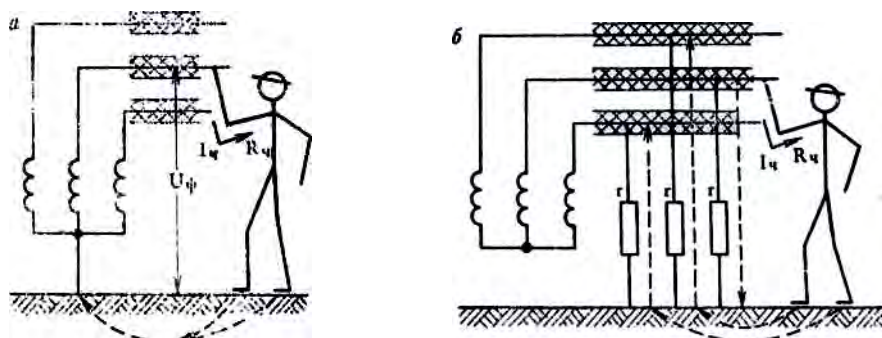


Рис. 16.1. Цепь тока через человека при касании одной фазы: а – в сети с заземленной нейтралью; б – в сети с изолированной нейтралью

В системе с изолированной нейтралью (рис. 16.1, б) ток через человека будет зависеть не только от напряжения сети и сопротивления человека, но и от сопротивления изоляции двух других фаз относительно земли. В предельном случае, когда сопротивление изоляции одной из фаз равно нулю (короткое замыкание фазы на землю), человек будет находиться под линейным напряжением сети. Но при достаточно высоком сопротивлении изоляции и малой емкости сети в случае касания одной фазы через человека будет проходить безопасный для него ток. Таким образом, если контролировать сопротивление изоляции фаз и автоматически отключать сеть

при снижении сопротивления изоляции ниже установленного допустимого значения, система с изолированной нейтралью получается более безопасной в отношении поражения электрическим током, чем система с заземленной нейтралью.

В отношении пожаров и взрывов система с изолированной нейтралью при контроле сопротивления изоляции фаз также более безопасна, поскольку в системе с заземленной нейтралью замыкание на землю представляет собой однофазное короткое замыкание, которое всегда сопровождается появлением открытого искрения. Поэтому, например в шахтах (по правилам ТБ), запрещено применять сети с глухозаземленной нейтралью трансформатора.

Лекция 17. ОСНОВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Способы и средства обеспечения электробезопасности. Электробезопасность людей обеспечивается конструкцией электроустановок, организационными и техническими мероприятиями, а также техническими способами, средствами и приспособлениями.

Требования электробезопасности к конструкции электроустановок устанавливаются нормативными документами (стандартами, правилами, нормами).

Организационные мероприятия включают в себя: требования к персоналу (возраст, медицинское освидетельствование, обучение, проверка знаний); назначение лиц, ответственных за организацию и производство работ; оформление наряда (распоряжения) на производство работ; организацию надзора во время производства работ и др.).

Технические мероприятия (со снятием напряжения) – это отключение установки (или части ее) от источника; запирающие приводы отключающих коммутационных аппаратов; снятие предохранителей; отсоединение концов питающих линий; установка знаков безопасности и ограждений) наложение заземления и др. Технические мероприятия при проведении работ под напряжением включают в себя применение изолирующих, ограждающих и вспомогательных защитных средств.

Для электрозащиты при эксплуатации различного оборудования применяются ряд технических методов (способов), основными из которых являются: использование малых напряжений; электрическое разделение сетей; защитное заземление и зануление; устройства защитного отключения (УЗО) и др.

Для электропитания переносных установок и электроинструмента (электродрели, гайковерты, электрические паяльники и др.) допускаются следующие максимальные значения напряжения в зависимости от места работы:

- 220 В (50 Гц) в помещениях без признаков повышенной и особой опасности поражения электрическим током;

- 42 В – в помещениях с повышенной опасностью поражения током и при работе в наружных условиях (допускается использовать инструмент до 220 В, но с обязательным применением основных и дополнительных защитных средств);

- 42 В – в помещениях особо опасных с обязательным применением основных и дополнительных защитных изолирующих средств.

Для питания переносных светильников допускается использовать 42 В - в помещениях с повышенной опасностью и 12 В – в особо опасных и неблагоприятных условиях.

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

Основная задача защитного заземления – снизить до безопасной величины (не более 30 - 40 В) напряжение, возникающее на нетоковедущих металлических частях электроустановок при пробое изоляции.

В системе с глухозаземленной нейтралью (рис. 17.1) все металлические нетоковедущие части электроустановок соединяют электрически с заземленной нейтралью трансформатора через нулевой провод сети или через специальный заземляющий проводник. Такая система называется **защитным занулением**. Здесь при пробое изоляции на корпус электроприемника возникает ток короткого замыкания $I_{кз}$, что приводит к срабатыванию защитного аппарата и отключению поврежденного участка.

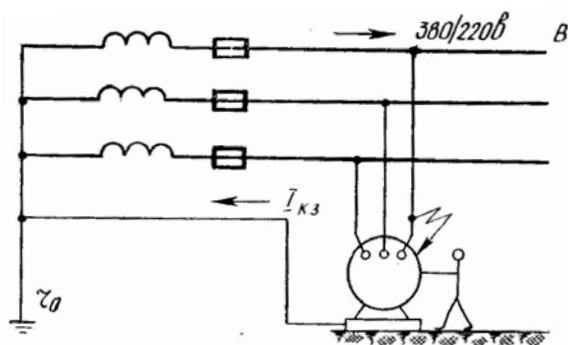


Рис. 17.1. Зануление корпуса электроприемника в сети с глухозаземленной нейтралью

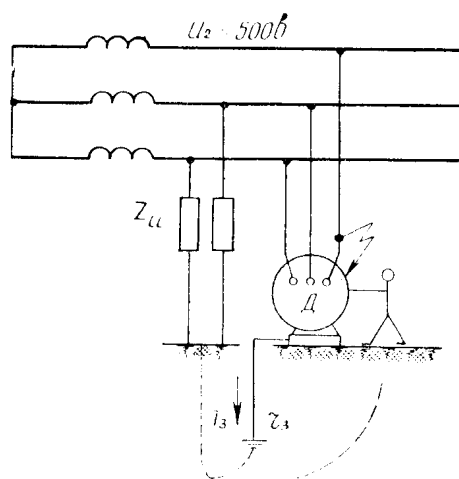


Рис. 17.2. Заземление корпуса электроприемника в сети с изолированной нейтралью

В установках с изолированной нейтралью (рис. 17.2) при пробое изоляции на корпус электродвигателя Д он окажется под напряжением, величина которого равна падению напряжения на сопротивлении заземления r_3 от протекающего через него тока I_3 . Этот ток определяется напряжением U_2 и полным сопротивлением изоляции проводов $Z_{\text{н}}$. При нормальном сопротивлении изоляции ток I_3 небольшой, напряжение на корпусе электродвигателя при пробое изоляции мало и прикосновение к нему человека малоопасно. Но допускать длительное замыкание на землю нельзя, так как напряжение исправных фаз по отношению к земле возрастают до линейных, что способствует возникновению второго замыкания на землю в другой фазе. А двойное замыкание на землю создает большую опасность для человека.

Простое заземление корпуса электроприемника без соединения с нейтралью правилами запрещается, так как такое защитное заземление не обеспечивает надежной защиты (при пробое изоляции ток $I_{\text{к.з}}$ ограничивается сопротивлениями двух заземлителей – электроприемника r_3 и нейтрали r_0 – и может оказаться недостаточным для срабатывания защиты, а на корпусе поврежденного электроприемника может быть опасное напряжение).

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

Более совершенной мерой защиты является *защитное отключение*, так как защитные заземление и зануление иногда не защищают человека от поражения электрическим током: в сетях с изолированной нейтралью однофазные замыкания

не отключаются при системе заземления, а в сетях с глухозаземленной нейтралью хотя и отключаются, но время их отключения может быть велико (десятки секунд) при малых токах короткого замыкания и завышенных токах плавной вставки предохранителей.

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

Области применения защитного отключения:

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

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

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

Для непрерывного контроля состояния изоляции в сетях до 1000 В можно использовать простые схемы, приведенные на рис. 17.3. В качестве индикаторов КИ можно применять **высокоомные вольтметры**, а лучше – **электронные или газоразрядные лампы**. Когда изоляция сети исправна, токи, протекающие через индикаторы КИ или через конденсатор *К асимметра*, равны друг другу, а их сумма в нулевой точке равна нулю. Поэтому индикаторы дают одинаковые показания (или лампы светятся одинаково ярко), а в схеме 17.3, *б* ток по обмотке реле *Р* будет равен нулю. При пробое изоляции на землю соединенная с поврежденной фазой лампа гаснет (или вольтметр показывает нуль), а в схеме асимметра по обмотке реле *Р* потечет ток, реле сработает и своим размыкающим контактом подаст сигнал дежурному или команду на отключение поврежденного участка. Если со-

противление изоляции одной из фаз резко уменьшилось и ей угрожает пробой, то вольтметры в схеме рис. 17.3, а будут давать различные показания.

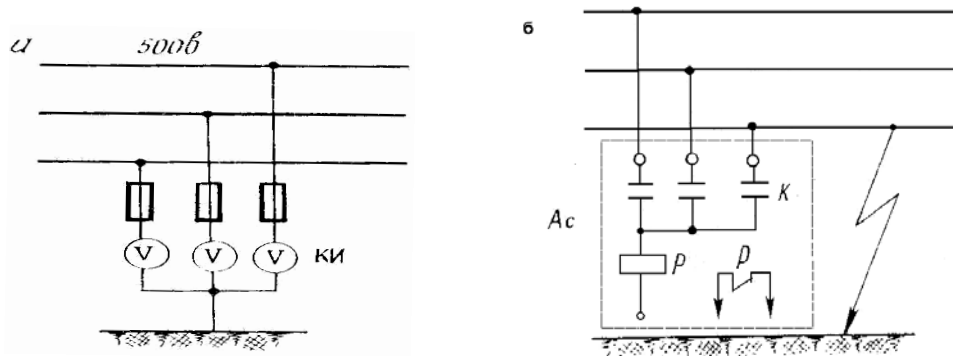


Рис. 17.3. Схемы включения приборов контроля изоляции:

а – схема включения ламп или вольтметров; б – схема включения асимметра

Асимметры типа РА-74/2 (см. рис. 17.3, б) предназначены для защитного отключения в электроустановках напряжением 500 В при однофазных замыканиях на землю. В последние годы появились более совершенные приборы контроля изоляции и защитного отключения на основе вентильных схем.

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

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

В нормальных условиях через нулевую цепь протекает небольшой ток небаланса постоянного напряжения, недостаточный для срабатывания реле. При снижении сопротивления изоляции в фазах сети через обмотку реле будет протекать дополнительный выпрямленный ток, величина которого зависит от сопротивлений изоляции фаз и величины сопротивления r_5 . При определенной величине тока реле Р сработает и замкнет цепь отключения 1Р. Реле срабатывает и при прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением, так как происходит снижение изоляции фазы, к которой прикоснулся человек.

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

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

Реле может также служить для контроля изоляции сети.

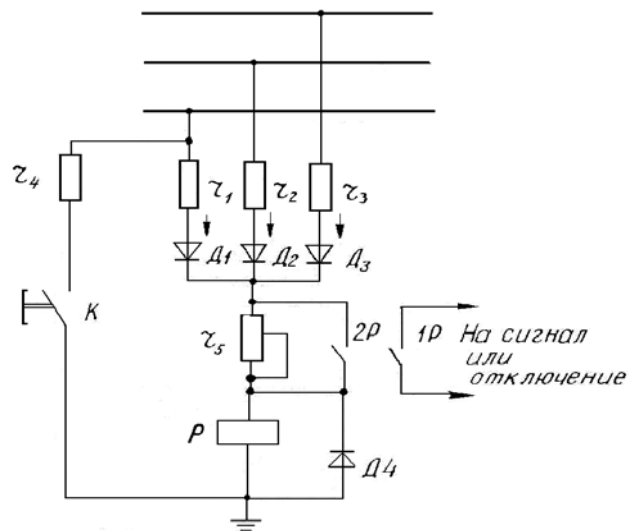


Рис. 17.4. Схема аппарата защитного отключения и контроля изоляции для сетей с изолированной нейтралью

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

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

- изолирующие штанги (оперативные, для наложения заземления, измерительные), изолирующие клещи, электроизмерительные указатели напряжения для фазировки;
- изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ под напряжением свыше 1000 В и слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками для работы в электроустановках напряжением до 1000 В;
- диэлектрические перчатки, боты, галоши, коврики, изолирующие накладки и подставки;
- индивидуальные изолирующие комплекты;
- переносные заземления;
- оградительные устройства и диэлектрические колпаки;
- плакаты и знаки безопасности.

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

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

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

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

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

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

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

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

Электрозащитные средства разделяют на основные и дополнительные.

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

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

Классификация электрозащитных средств приведена в следующей таблице:

Электрозащитные средства

Вид электрозащитных средств	Электрозащитные средства, используемые при напряжении электроустановки до 1000 В	Электрозащитные средства, используемые при напряжении электроустановки свыше 1000 В
Основные	Изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, диэлектрические перчатки, слесарно-монтажные инструмент с изолирующими рукоятками, указатели напряжения	Изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения и приспособления для ремонтных работ: изолирующие лестницы, площадки, тяги, канаты, корзины телескопических вышек и др.
Дополнительные	Диэлектрические галоши, диэлектрические ковры	Диэлектрические перчатки, боты, коврики, инди-

	ки, изолирующие подставки и накладки, переносные заземления	визуальные экранирующие комплекты, изолирующие подставки и накладки, диэлектрические колпаки, переносные заземления, оградительные устройства, плакаты и знаки безопасности
--	-------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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

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

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

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

- бесконтактный индикатор напряжения типа БИН-10 (ОАО «Белэнергоремналадка»), используется оперативным и оперативно-ремонтным персоналом;
- универсальный контактный указатель напряжения типа УНУ-12-400 (Витебский опытно-экспериментальный завод концерна «Белэнерго»), применяет-

ся для проверки напряжения от 12 до 400 В переменного тока и в цепях постоянного тока с определением полярности;

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

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

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

Л и т е р а т у р а

1. Фираго, Б.И. Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию по теории электропривода. – Минск: БНТУ, 2005.

2. Фираго, Б.И. Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов. – Минск: Техноперспектива, 2012.

3. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981.

4. Харизоменов, И.В. Электрооборудование и электроавтоматика металлорежущих станков / И.В. Харизоменов. – М.: Машиностроение, 1975.

5. Сандлер, А.С. Электропривод и автоматизация металлорежущих станков / А.С. Сандлер. – М.: Высшая школа, 1972.

6. Москаленко, В.В. Электрический привод. – М.: Высш. школа, 1991.

7. Фотиев, М.М. Электропривод и электрооборудование металлургических цехов. – М.: Металлургия, 1990.