

Министерство образования и науки Республики Казахстан
Костанайский государственный университет имени А.Байтурсынова
Кафедра электроэнергетики и физики

Т.И.Глущенко

ПРАКТИКУМ
ПО
ЭЛЕКТРОПРИВОДУ И АВТОМАТИЗАЦИИ
для студентов специальности
5В071800-Электроэнергетика

Учебное пособие

Костанай, 2017

**ББК
Г 55**

Рецензенты:

Курманов Аяп Конлямжаевич, доктор технических наук, доцент кафедры технического сервиса КГУ имени А. Байтурсынова

Хабдуллина Зауреш Кинаятовна, доктор технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и физики КГУ имени А. Байтурсынова

Бедыч Татьяна Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики и машиностроения Костанайского инженерно-экономического университета им. М. Дулатова

Автор:

Глущенко Татьяна Ивановна, кандидат экономических наук

Г55 Глущенко Т.И.

Практикум по электроприводу и автоматизации. Учебное пособие по специальности 5В071800-Электроэнергетика – Костанай, 2017. - 203 с.

ISBN

Учебное пособие содержат теоретические сведения по дисциплине, методический материал по выполнению практических заданий, задания к самостоятельной работе и указания для выполнения лабораторных работ.

Предназначено для студентов специальности 5В071800-Электроэнергетика. Учебное пособие может быть рекомендовано преподавателям высших учебных заведений при проведении учебных занятий по основам электропривода и автоматизированному электроприводу.

ББК 31.2я73

Утверждено и рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, ____2017 г., протокол № __.

ISBN 978-601-7387- 66-2

© Глущенко Т.И., 2017

Содержание

Введение.....	5
1 Основные понятия и определения электропривода	6
2 Механика электропривода.....	9
2.1 Виды передаточных механизмов и кинематические схемы электропривода.....	9
2.2 Расчетные схемы механической части электропривода	16
2.3 Уравнений вращательного движения электропривода.....	22
3 Электромеханические свойства электродвигателей.....	27
3.1 Механические характеристики электродвигателей переменного тока.....	27
3.2 Механические характеристики электродвигателей постоянного тока.....	39
4 Аппаратура и схемы управления электроприводами.....	47
4.1 Основные схемы релейно-контакторного управления.....	52
4.2 Аппаратура и схемы защиты электродвигателей.....	65
4.3 Бесконтактная аппаратура. Датчики.....	69
5 Выбор электродвигателей для производственных механизмов.....	74
6 Методы расчета мощности электродвигателя при переменной нагрузке.....	81
6.1 Расчет номинальной мощности электродвигателя при длительном режиме работы.....	86
6.2 Расчет номинальной мощности электродвигателя при повторно-кратковременном и кратковременном режимах работы.....	88
7 Практикум.....	92
Практическое занятие № 1. Приведение моментов рабочей машины к валу электродвигателя.....	92
Практическое занятие № 2. Расчет активных сопротивлений в цепи статора, для пуска при пониженном напряжении.....	96
Практическое занятие № 3. Определение мощности электродвигателей, работающих в различных режимах	99
Практическое занятие № 4. Расчет пускового реостата для асинхронного двигателя с фазным ротором	103
Практическое занятие № 5. Изучение принципа преобразования энергии ветра в электрическую энергию.....	107
Практическое занятие № 6. Расчет и выбор конденсаторов при конденсаторном торможении асинхронных двигателей	110
Практическое занятие № 7 Изучение устройства и принципа действия аппаратуры управления и защиты.....	112
8 Указания к выполнению самостоятельной работы №1.....	121
9 Указания к выполнению самостоятельной работы №2.....	127
10 Лабораторный практикум.....	131
Лабораторная работа №1. Определение момента инерции и махового момента электропривода методом свободного выбега	131

Лабораторная работа № 2. Исследование нагрева и охлаждения электродвигателя.....	138
Лабораторная работа № 3. Исследование электромагнитного пускателя	145
Лабораторная работа № 4. Исследование средств защиты электродвигателя	156
Лабораторная работа № 5. Исследование блокировочных связей и сигнализации в схемах управления электроприводом.....	166
Лабораторная работа № 6. Исследование схем управления нереверсивным и реверсивным асинхронным электроприводом.....	174
Лабораторная работа № 7. Исследование схем торможения асинхронного двигателя с к.з. ротором.....	178
Лабораторная работа № 8. Исследование схемы управления трёхфазным асинхронным электродвигателем с фазным ротором.....	193
Заключение	199
Список использованных источников.....	200
Приложения.....	201

Введение

Важность изучения дисциплины «Электропривод и автоматизация» имеет определенные предпосылки, связанные с широким использованием электрических двигателей в качестве электроприводов. 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 веке послужило 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.

Курс «Электропривод и автоматизация» является основой для последующего изучения специальных вопросов автоматизации технологических процессов в различных отраслях промышленности.

Настоящий практикум предназначен для проведения лабораторных работ и практических занятий по курсу «Электропривод и автоматизация» для студентов специальности 5В071800 «Электроэнергетика». Практикум содержит теоретический материал, описание экспериментальных установок и методический материал по выполнению работ и обработке результатов измерений, примеры решения задач и задания для самостоятельной работы.

Материал практикума охватывает механику электропривода, механические характеристики двигателей постоянного и переменного тока, правила выбора двигателей для различных режимов работы; рассматривает аппаратуру управления и защиты и принципы построения схем автоматизированного электропривода.

Материал практикума построен таким образом, чтобы им могли пользоваться студенты с различным уровнем начальной подготовки.

1 Основные понятия и определения электропривода

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

Достоинства использования электроэнергии и электродвигателей следующие:

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

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

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

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

Многие исполнительные органы (шпиндели, механизмы подачи, валки прокатных станов, ленты конвейеров и др.) требуют регулирования скорости.

Иногда возникает необходимость изменять и направление движения исполнительного органа (реверсировать его). Во время движения исполнительный орган преодолевает сопротивление движению, обусловливаемое силами трения или притяжения земли, возникающими усилиями при деформации материалов.

Итак, для осуществления исполнительным органом необходимого движения при выполнении технологической операции и преодоления возникающих усилий к нему должна быть подведена определенная механическая энергия от устройства, которое в соответствии со своим назначением получило название *привод*.

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

Электрическим приводом (ЭП) называется электромеханическое устройство, сообщаемое движение 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 электродвигателем) служит для преобразования неизменных параметров электроэнергии питающей сети в переменные в соответствии с управлением регулируемого электропривода, а **управляющее устройство** – для обеспечения оптимального управления по определенным критериям.

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

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

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

Структурная схема АЭП. Структурная схема АЭП представлена на рисунке 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.

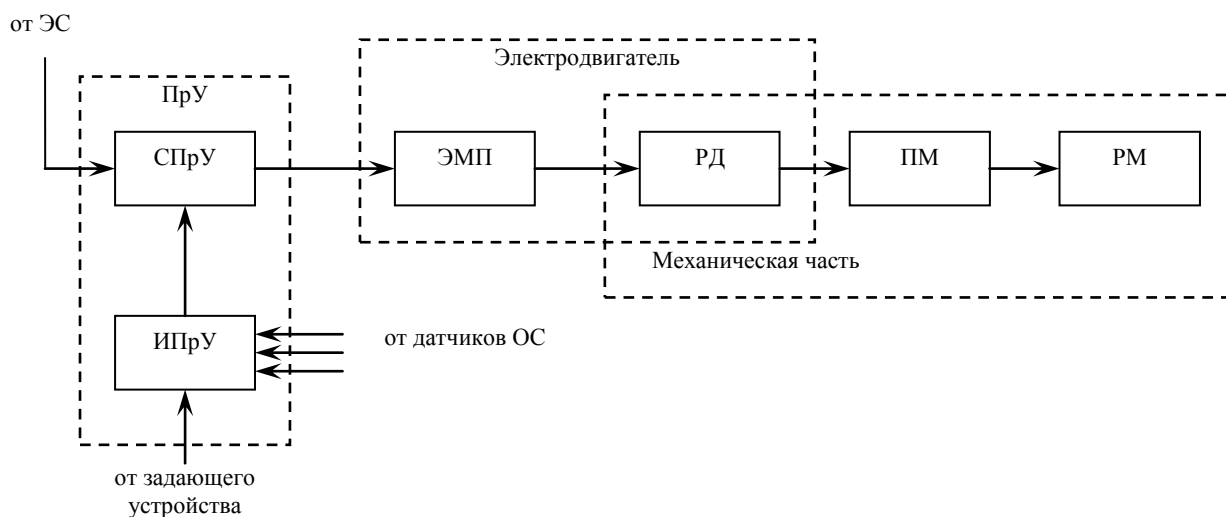


Рисунок 1 - Структурная схема автоматизированного электропривода

Преобразовательное устройство ПрУ состоит из силовой части СПрУ и информационной части (или системы управления) ИПрУ. Информационная часть получает командные сигналы от задающего устройства и информацию о параметрах состояния электропривода и хода технологического процесса от соответствующих датчиков обратных связей. На основании этих данных в

соответствии с заложенным алгоритмом (программой) здесь вырабатываются определенные воздействия на СПрУ, а от него и на ЭМП двигателя, управляющие таким образом движением механической части и ходом технологического процесса РМ.

2 Механика электропривода

2.1 Виды передаточных механизмов и кинематические схемы электропривода

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

$$P_n = M_n \omega_n; \quad M_n = C_k D^2 L, \quad (1)$$

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 (рисунок 2):

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

Дадим краткую характеристику этим ПМ.

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

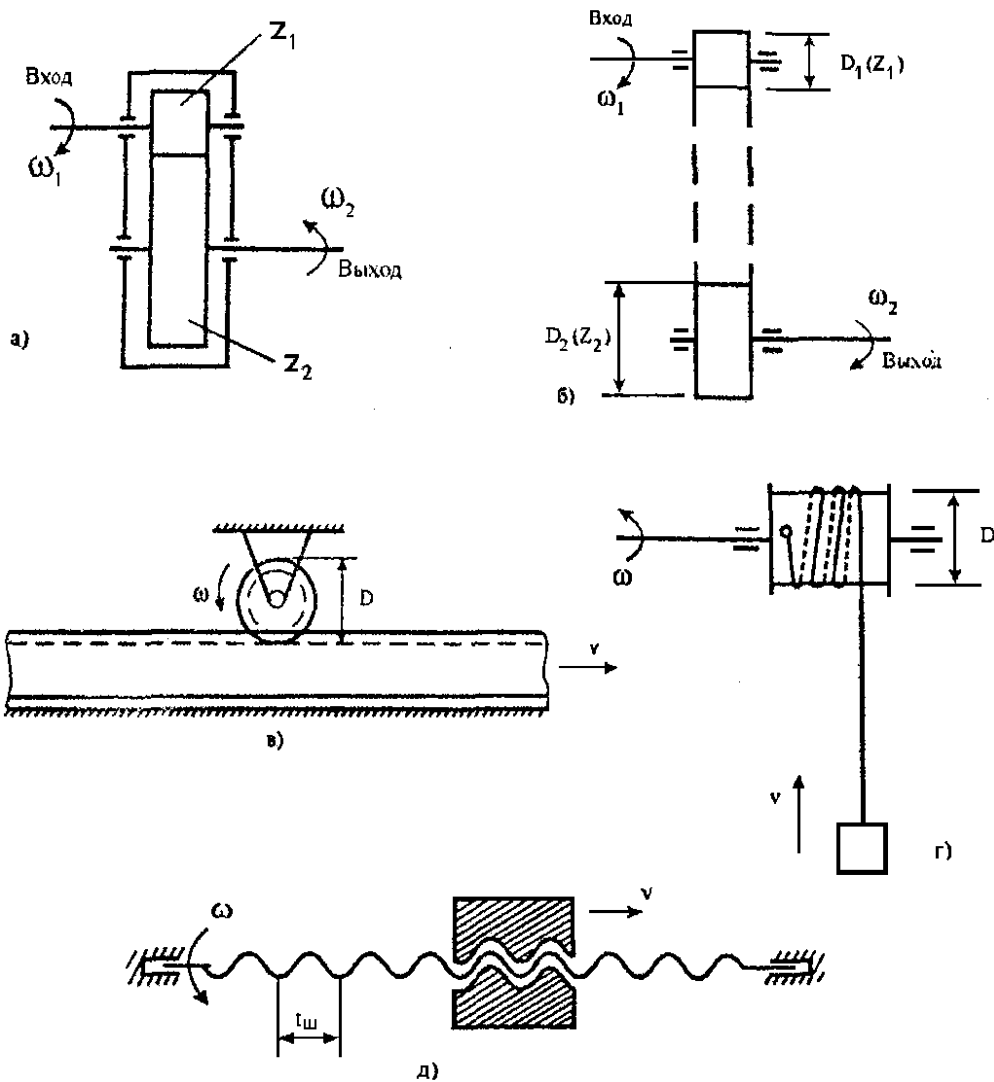


Рисунок 2 - Кинематические звенья:

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

Редуктор характеризуется передаточным числом i :

$$i = \omega_1 / \omega_2, \quad (2)$$

где ω_1 – входная скорость, рад/с;

ω_2 – выходная скорость, рад/с.

Передаточное число n -ступенчатого редуктора

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot \dots \cdot i_n, \quad (3)$$

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

Редуктор характеризуется также входной мощностью (до 560 кВт) и максимальным выходным моментом (до 1200 кН·м). Входная и выходная оси редуктора могут быть расположены коаксиально, параллельно и ортогонально.

Ременные (цепные) передачи характеризуются передаточным числом

$$i = \omega_1 / \omega_2 = D_2/D_1 = z_2/z_1, \quad (4)$$

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

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

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

$$\rho = V/\omega, \text{ м/рад.} \quad (5)$$

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 (рисунок 3). Ротор электродвигателя Д соединяется с рабочим колесом вентилятора с помощью соединительной муфты СМ. Все элементы кинематической схемы движутся с одной и той же угловой скоростью ω . На рабочем колесе вентилятора развивается момент сопротивления движению $M_{\text{мех}}$, зависящий от скорости $\omega_{\text{мех}}$ (рисунок 4):

$$M_{\text{мех}} = \Delta M_{\text{мех}} + M_{\text{в.н.}} (\omega_{\text{мех}} / \omega_{\text{в.н}})^2; \quad (6)$$

$$\omega_{\text{в.н}} = \omega_{\text{н.дв}}, \quad (7)$$

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.

К ротору двигателя приложен электромагнитный момент двигателя M_3 , а также момент механических потерь в двигателе ΔM , обусловленный силами трения в подшипниках, и момент сопротивления движению $M_{\text{в}}$, создаваемый вентилятором.

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

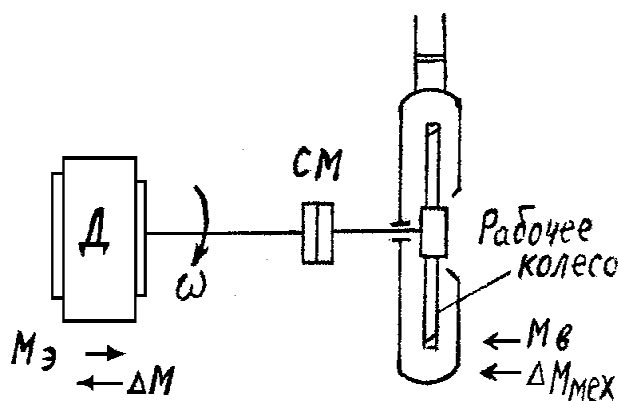


Рисунок 3 - Кинематическая схема ЭП вентилятора

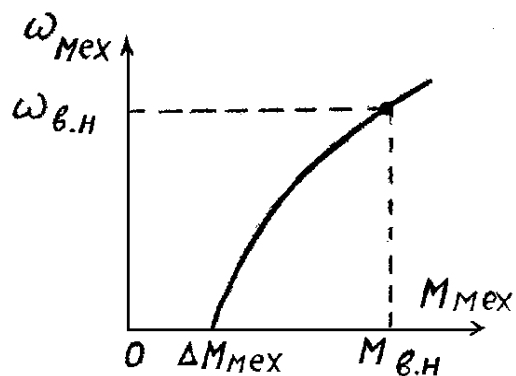


Рисунок 4 - Механическая характеристика вентилятора

В других случаях $\omega_{в.н} \neq \omega_{н.дв}$ и в кинематическую схему вводят различные передачи: зубчатые, цепные, фрикционные, клиноременные и др. (см. рисунок 2). Если требуется механическое регулирование скорости, вводят передачи с переменным передаточным числом i (коробки передач, фрикционные вариаторы).

Кинематическая схема электропривода шпинделя токарного станка (рисунок 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 i может изменяться ступенчато за счет введения в зацепление шестерен с различным числом зубьев. В результате взаимодействия вращающейся детали с неподвижным резцом возникает усилие резания F_z и момент резания

$$M_{мех} = M_z = F_z R_3, \quad (8)$$

где R_3 – радиус заготовки обрабатываемой детали, м.

В процессе обработки детали усилие и момент резания остаются постоянными и не зависят от угловой скорости ω_3 (рисунок 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.

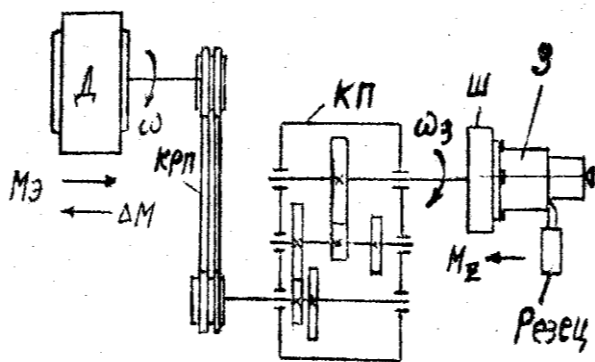


Рисунок 5 - Кинематическая схема
ЭП
шпинделя токарного станка

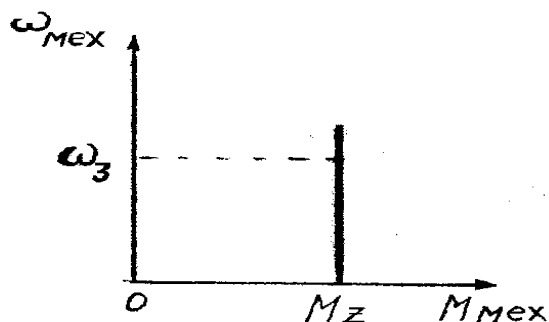


Рисунок 6 - Механическая
характеристика

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 статическим моментом сопротивления и скоростью, т.е.

$$\omega = f(M_c) \text{ или } M_c = f(\omega). \quad (9)$$

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

$$M_c = M_0 + (M_{c.n} - M_0)(\omega / \omega_n)^x, \quad (10)$$

где M_c – момент сопротивления механизма при угловой скорости ω , н·м;

M_0 – момент сопротивления трения в движущихся частях механизма, н·м;

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

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 (рисунок 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 $\Delta\omega$ (рисунок 8):

$$\beta = (M_2 - M_1) / (\omega_2 - \omega_1) = \Delta M / \Delta\omega. \quad (11)$$

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

$$\beta = dM / d\omega. \quad (12)$$

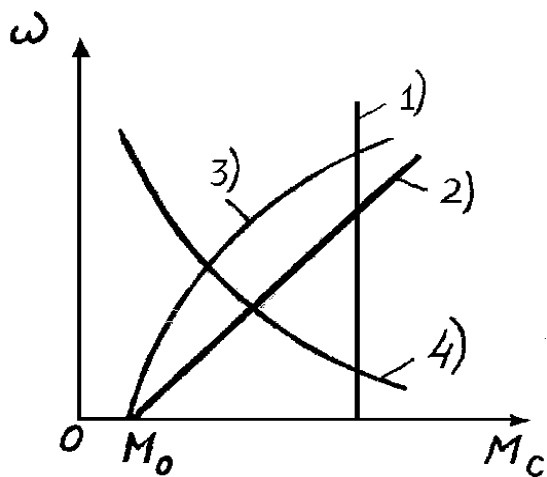


Рисунок 7 - Механические характеристики производственных механизмов

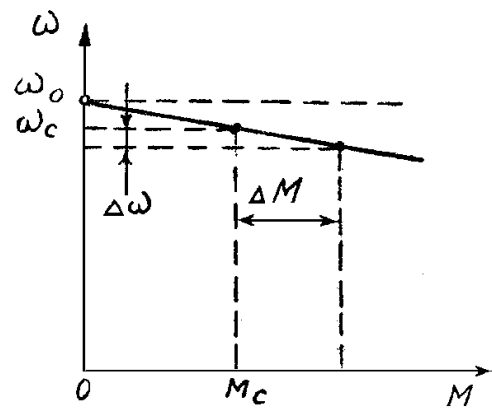


Рисунок 8 - К пояснению жесткости механической характеристики электродвигателя

Естественные механические характеристики электродвигателей по степени жесткости разделяются на следующие группы (рисунок 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.

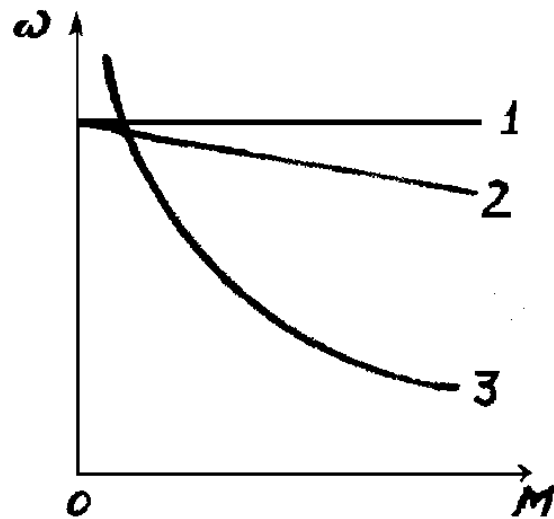


Рисунок 9-Механические характеристики электродвигателей

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.

2.2 Расчетные схемы механической части электропривода

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

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

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

Обычно в качестве такого первоначального элемента принимают вал двигателя. Тогда расчетная схема механизма многомассовой механической части ЭП (рисунки 10, а, 11, а) сводится к одному обобщенному жесткому механическому звену (рисунки 10, б, 11, 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 (рисунок 10, а) идеальный, т.е. не имеет потерь энергии, не обладает массой и осуществляет только количественное преобразование механической энергии от двигателя к производственному механизму. Учет потерь в ПМ рассмотрим несколько позже.

Приведение статических моментов сопротивления к валу осуществляется из условия равенства передаваемой мощности на любом валу (см. рисунок 10, а):

$$M_c \omega = M_M \omega_M. \quad (13)$$

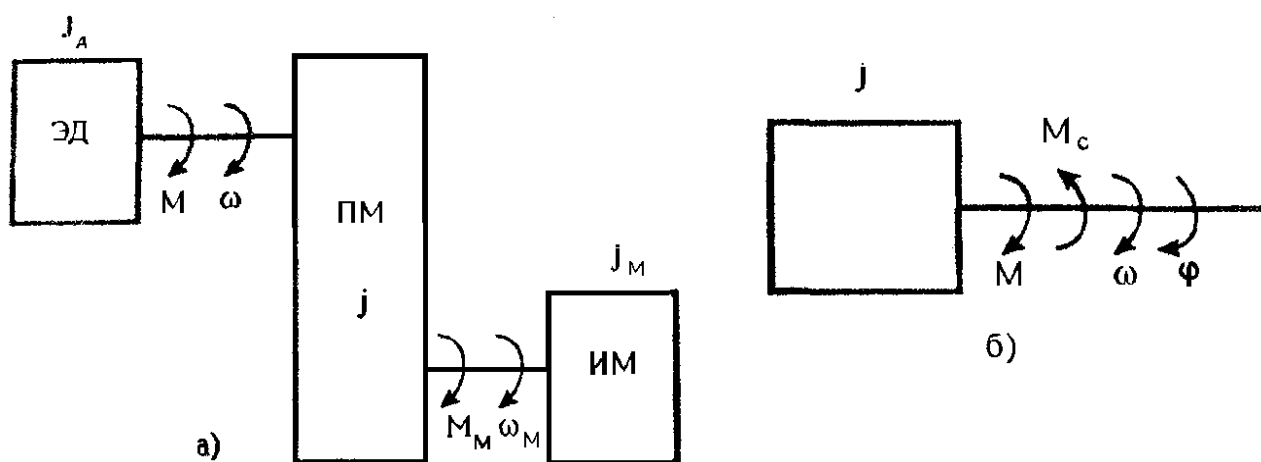


Рисунок 10 - Приведение многомассовой системы к одномассовой при вращательном движении механизма

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

$$M_c = M_M(\omega_M / \omega) = M_M / (\omega / \omega_M) = M_M / i, \quad (14)$$

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

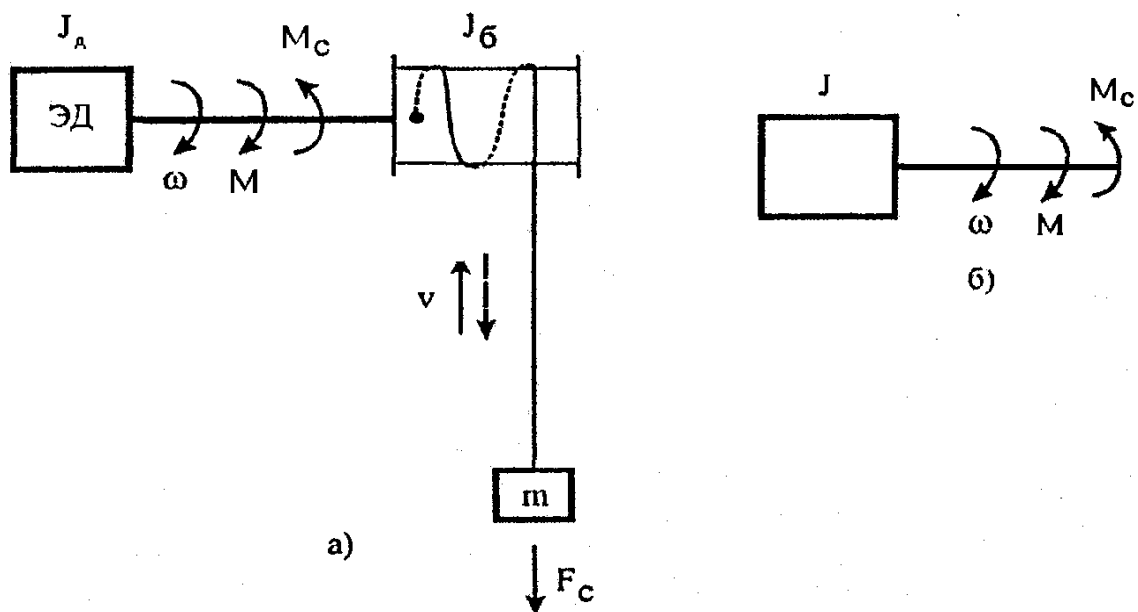


Рисунок 11 - Приведение многомассовой системы к одномассовой при поступательном движении механизма

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

При поступательном движении ИМ (см. рисунок 11, а) и допущении об идеальности передачи из условия равенства передаваемой мощности от электродвигателя ЭД к поднимаемому грузу имеем равенство

$$M_c \omega = F_c V, \quad (15)$$

где M_c – эквивалентный статический момент на валу ЭД одномассовой системы (см. рисунок 11, б), н·м;

F_c – сила сопротивления в установившемся режиме, н;

V – линейная скорость подъема груза, м/с.

Тогда из этого равенства получаем

$$M_c = F_c V / \omega = F_c \rho, \quad (16)$$

где ρ – радиус приведения поступательного движения к вращательному, м.

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 ($i = \text{const}$, $\rho = \text{const}$).

Приведение моментов инерции ИМ к валу ЭД осуществляется из условия, что величина суммарного запаса кинетической энергии системы, приведенной к валу ЭД, остается неизменной (см. рисунок 10):

$$J \omega^2/2 = J_d \omega^2/2 + J_m \omega_m^2/2. \quad (17)$$

Из этого равенства находим, что суммарный момент инерции приведенной системы

$$J = J_d + J_m (\omega_m / \omega)^2 = J_d + J_m / i^2 = J_d + J_m', \quad (18)$$

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:

$$J_m' = J_m / i^2. \quad (19)$$

Для поступательного движения ИМ (см. рисунок 11) приведение поступательно движущихся масс к вращательному движению вала ЭД осуществляется на основании равенства кинетических энергий приведенной и неприведенной систем:

$$J \omega^2/2 = (J_d + J_6) \omega^2/2 + mV^2/2, \quad (20)$$

из которого получаем, что

$$J = J_d + J_6 + m (V/\omega)^2 = J_d + J_6 + m \rho^2 = J_d + J_6 + J_m', \quad (21)$$

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 (рисунок 12) 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:

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

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

из которых следует, что

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

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

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

Следовательно, для учета потерь в ПМ при приведении статических моментов и сил сопротивления ИМ в формулах (14) и (16) необходимо в двигательном режиме работы ЭП учесть КПД $\eta_{\text{п}}$ в знаменателе, а в тормозном режиме – в числителе, т.е.

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

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

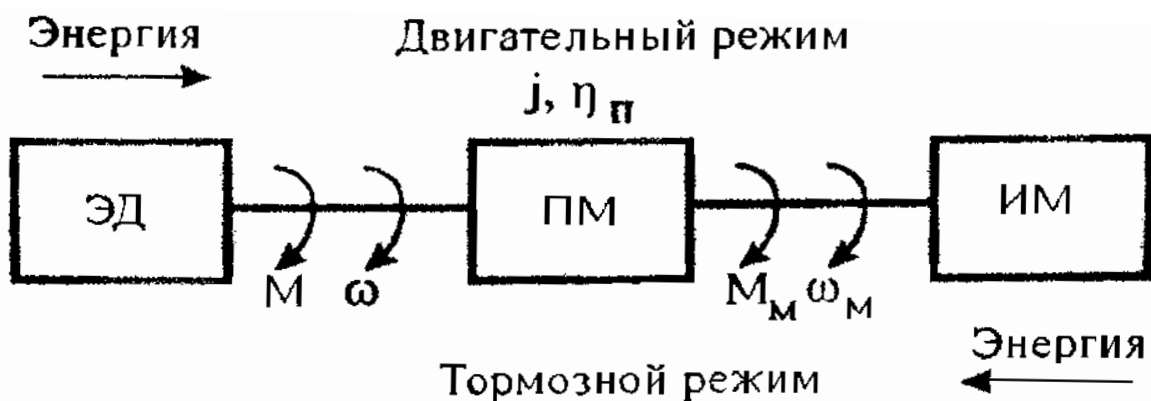


Рисунок 12 - Механическая часть электропривода

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

$$\eta_{\text{п}} = [1 / \eta_{\text{п ном}} + \alpha (1 / K_3 - 1)] - 1, \quad (22)$$

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

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

Пример. Шахтная подъемная лебедка поднимает груз $G = 60\ 000$ Н (рисунок 13). Определить приведенные к валу электродвигателя суммарный момент инерции ЭП подъемной лебедки и статический момент нагрузки, если даны номинальная скорость вращения электродвигателя $n_n = 494$ об/мин, вес каната $G_k = 7\ 800$ Н, передаточное число редуктора $i = 11,5$, КПД редуктора $\eta = 0,94$, момент инерции барабана Б вместе с зубчатым колесом 2 $J_2 = 67,5$ кг·м², момент инерции двигателя вместе с зубчатым колесом 1 $J_1 = 106$ кг·м², диаметр барабана $D_б = 3$ м.

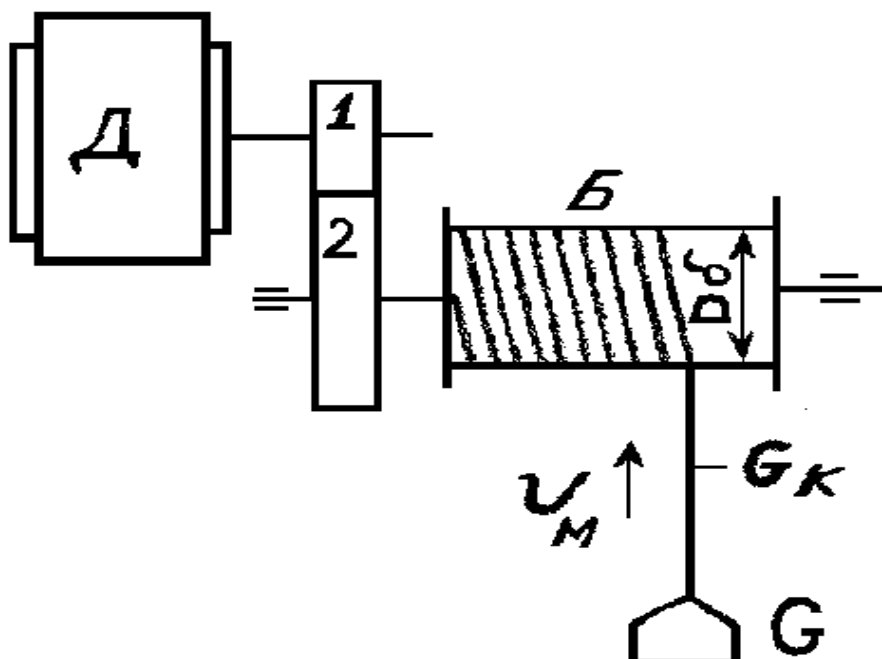


Рисунок 13 - Кинематическая схема подъемной лебедки

Решение

1. Определим скорость подъема груза V_m :

$$V_m = \pi D_б n_n / (i \cdot 60) = 3,14 \cdot 3 \cdot 494 / (11,5 \cdot 60) = 6,75 \text{ м/с.}$$

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

$$J = J_1 + J_2 / i^2 + ((G + G_k) / g^2)(V_m / \omega_n)^2 = 106 + 67,5 / (11,5)^2 +$$

$$+ ((60\,000 + 7\,800) / (9,81)^2 \cdot (6,75 / 51,7)^2) = 118,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

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

3. Приведенный к валу электродвигателя момент сопротивления нагрузки:

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

или

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

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

$$M = M_c. \quad (23)$$

Такой режим работы электропривода называется *установившимся*. При нарушении равенства (23) возникает динамический момент $M_{дин}$, характеризующий переходный режим. При этом уравнение равновесия моментов имеет вид

$$M = M_c + M_{дин}, \quad (24)$$

где M – вращающий момент электродвигателя, Н·м;

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

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

Рассмотрим подробнее отдельные составляющие уравнения (24). *Вращающий* (или *электромагнитный*) момент электродвигателя M создается в результате взаимодействия магнитного потока с током, протекающим по

ротору или якорю электродвигателя. *Момент на валу* электродвигателя $M_{\text{в}}$ отличается от электромагнитного момента M на величину момента потерь холостого хода M_0 , определяемого трением в подшипниках, щеток о коллектор или кольца, вентиляторными потерями и потерями в стали. Момент на валу электродвигателя зависит от режима работы электропривода. В двигательном режиме момент M_0 уменьшает момент на валу, а в тормозном режиме увеличивает его. Поэтому

$$M_{\text{в}} = M \pm M_0. \quad (25)$$

Величина M_0 составляет несколько процентов от номинального момента $M_{\text{н}}$ на валу электродвигателя.

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

Момент статического сопротивления $M_{\text{с}}$ состоит из 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:

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (26)$$

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

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

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

t – время, с.

При постоянном моменте инерции уравнение движения электропривода (24)

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (27)$$

или

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (28)$$

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

В общем виде уравнение движения электропривода (28) с учетом режимов работы электродвигателя и знаков моментов можно записать

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (29)$$

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:

$$dt = J d\omega / (M - M_c), \quad (30)$$

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:

$$M = \alpha M_n = \text{const}, \quad (31)$$

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

$$t_p = J \int_0^{\omega_c} d\omega / (\alpha M_n - M_c) = J \omega_c / (\alpha M_n - M_c). \quad (32)$$

При электрическом *торможении электропривода* уравнение движения будет иметь вид

$$-M - M_c = J (d\omega/dt). \quad (33)$$

Из этого уравнения следует, что время торможения электропривода

$$t_T = - \int_{\omega_c}^0 J d\omega / (M + M_c). \quad (34)$$

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

$$t_T = J \int_0^{\omega_c} d\omega / (\alpha M_H + M_c) = J \omega_c / (\alpha M_H + M_c). \quad (35)$$

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

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

Для электроприводов с частыми пусками наиболее существенным критерием является сокращение общего времени переходного процесса $t_p + t_T$ до минимума. Рассмотрим определение $i_{\text{опт}}$, исходя из минимума времени переходного процесса $t_{\text{п.п}}$. Представим время переходного процесса, используя выражения (34) и (35), в таком виде:

$$t_{\text{п.п}} = t_p + t_T = (J_d \delta + J_M / i^2) \omega_c / (\alpha M_H - M_c) + \\ + (J_d \delta + J_M / i^2) \omega_c / (\alpha M_H + M_c). \quad (36)$$

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

$$J = J_{\text{д}}\delta + J_{\text{м}} / i^2,$$

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

Принимая $\omega_{\text{с}} = \omega_{\text{н}}$, умножим и разделим оба слагаемых выражения (36) на $\omega_{\text{н}}$ и учтем, что

$$M_{\text{н}} \omega_{\text{н}} = P_{\text{н}}; \quad M_{\text{с}} \omega_{\text{н}} = P_{\text{с}}; \quad J_{\text{д}}\delta \omega_{\text{н}}^2 = 2W_{\text{к.д}};$$

$$J_{\text{м}} (\omega_{\text{н}} / i)^2 = J_{\text{м}} \omega_{\text{м}}^2 = 2W_{\text{к.м}}.$$

Здесь $\omega_{\text{н}}$ – номинальная угловая скорость вращения. Тогда

$$t_{\text{п.п}} = 2 (W_{\text{к.д}} + W_{\text{к.м}}) / (\alpha P_{\text{н}} - P_{\text{с}}) + \\ + 2(W_{\text{к.д}} + W_{\text{к.м}}) / (\alpha P_{\text{н}} + P_{\text{с}}), \quad (37)$$

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

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

$P_{\text{н}}$ – номинальная мощность электродвигателя;

$P_{\text{с}}$ – 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 (37), является кинетическая энергия $W_{\text{к.д}}$. При минимуме $W_{\text{к.д}}$ будем иметь минимум времени переходного процесса $t_{\text{п.п}}$. Отсюда следует простое правило определения оптимального передаточного числа редуктора: для заданной номинальной мощности $P_{\text{н}}$ из каталога выбирают несколько электродвигателей на разные номинальные скорости и вычисляют произведение $J_{\text{д}i} \omega_{\text{н}i}^2$ (или $J_{\text{д}i} i_i^2$, так как $i_i = \omega_{\text{н}i} / \omega_{\text{м}} = \text{const}$), из которых выбирают наименьшее.

Тогда

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

3 Электромеханические свойства электродвигателей

3.1 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 быстрее 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 (электродублирующие 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.

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 рисунке 14, а, с фазным ротором – на рисунке 14, в, а соответствующие им механические характеристики в двигательном режиме на рисунке – 14, б и г.

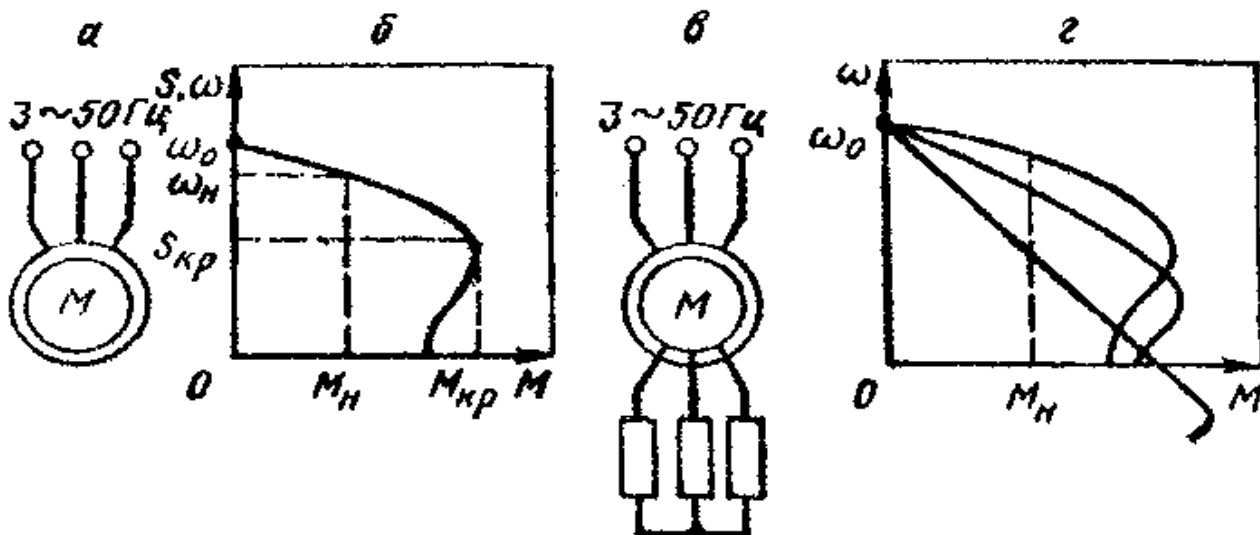


Рисунок 14 - Схемы и механические характеристики асинхронных двигателей

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

$$P = M \omega; \quad \omega = \pi n / 30. \quad (38)$$

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

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p; \quad (39)$$

$$n_0 = 60 f_1 / p, \quad (40)$$

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. ЭДС ротора создает в замкнутых проводниках ротора ток, который взаимодействует с полем статора и приводит к созданию электромагнитного момента M_s , действующего по направлению вращения поля и приводящего во вращение ротор (если M_s больше M_c).

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

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad \text{или} \quad s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot 100 \% . \quad (41)$$

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)

$$M = C_k \Phi I_2 \cos \varphi_2, \quad (42)$$

где C_k – конструктивный коэффициент.

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

$$s_k \approx R_2' / X_k, \quad (43)$$

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 :

$$M_k = 3U_1^2 / (2\omega_0 X_k). \quad (44)$$

В сетях промышленных предприятий напряжение может изменяться, например, при пуске мощных двигателей, при ударных нагрузках, характерных для прокатных станков. 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 (упрощенная формула Клосса)

$$M = 2M_k / (s/s_k + s_k/s). \quad (45)$$

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

В каталогах обычно приводят следующие технические данные асинхронного двигателя: P_n (кВт), n и n_0 (об/мин), λ_k и $\lambda_n = M_n / M_k$ (M_n – пусковой момент). По этим данным можно определить значения всех величин, необходимых для расчета и определения механических характеристик по (45), из выражений $\omega_n = \pi n_n / 30$, $\omega_0 = \pi n_0 / 30$, $M_n = P_n / \omega_n$; $M_k = \lambda_k M_n$; $s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0}$; $s_k = s_n (\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1})$.

Из рисунка 14 видно, что верхний (рабочий) участок естественной механической характеристики обладает большой жесткостью β ($\beta = dM/ds$). Увеличение сопротивления в цепи ротора (рисунбок 14, z) 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

$$R_2 = \frac{E_{2n} s_n}{\sqrt{3} I_{2n}}, \quad (46)$$

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

Пример. Рассчитать естественную механическую характеристику асинхронного короткозамкнутого двигателя типа А2-72-4 с $P_n = 30$ кВт; $U_n = 380$ В; $n_n = 1460$ об/мин; $\lambda_k = 2$.

Решение

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

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

6. Задавая значения s для двигательного режима от 0 до 1, рассчитываем соответствующие им значения момента M (таблица 1) и строим характеристику (рисунок 15).

Таблица 1 – Расчет механической характеристики

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

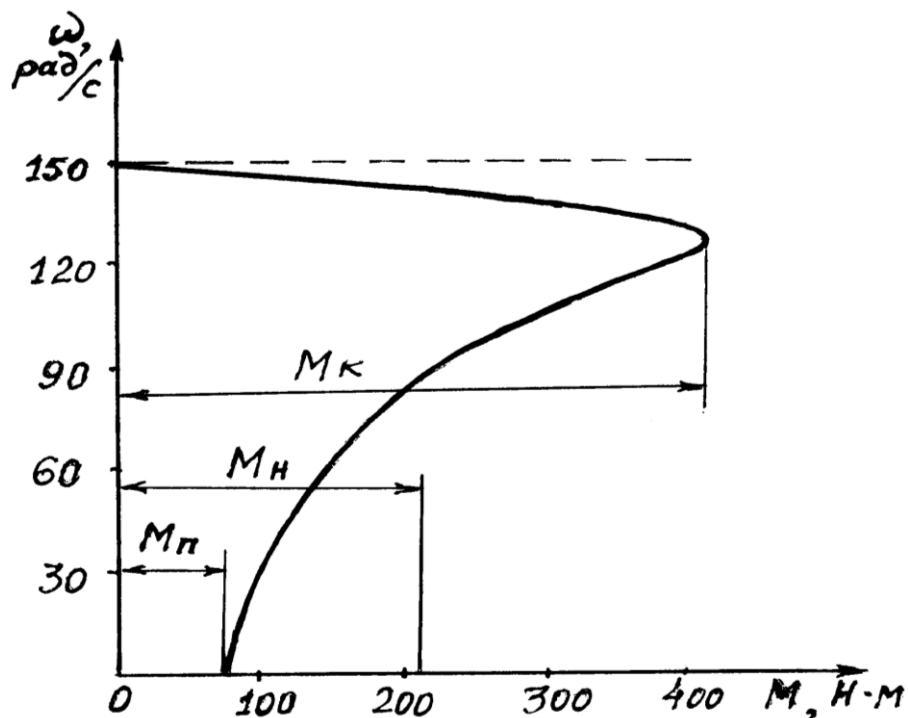


Рисунок 15 - Естественная механическая характеристика АД

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

Рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть можно получить, если к валу асинхронного двигателя, подключенного к сети, приложить добавочный момент по направлению вращения такой величины, чтобы ротор стал вращаться со скоростью выше синхронной ($\omega > \omega_0$).

При этом скольжение будет отрицательным $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0 < 0$. В данном случае относительное движение проводников ротора в поле статора по сравнению с двигательным режимом изменится на обратное. Следовательно, изменится направление ЭДС в проводниках ротора и соответственно ток ротора, который, взаимодействуя с полем статора, создает электромагнитный момент и будет выполнять роль тормоза. Вырабатываемая при этом активная электрическая энергия в обмотке статора поступает в сеть. Такой режим торможения можно получить, например, в подъемных установках при опускании тяжелых грузов, в эскалаторах метро при спуске с большим количеством пассажиров и других установках с активным статическим моментом на валу электродвигателя. Активная мощность к тому же изменяет знак, т.е. электрическая машина работает генератором, преобразуя кинетическую энергию от активного момента (опускающегося груза и др.) в электрическую и отдавая ее в сеть. Переход работы из двигательного режима в генераторный происходит автоматически, поэтому механические характеристики являются продолжением характеристик двигательного режима и располагаются во втором и четвертом квадрантах (рисунок 16, линии с двумя засечками).

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

$$S = [\omega_0 - (-\omega)]/\omega_0 = 1 + \omega/\omega_0 \quad (47)$$

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 втором и четвертом квадрантах (рисунок 16, 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 рисунке 16, 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 рисунке 16 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 рисунке 16 показаны механические характеристики в этом режиме при различных значениях сопротивления цепи ротора (линии с тремя засечками).

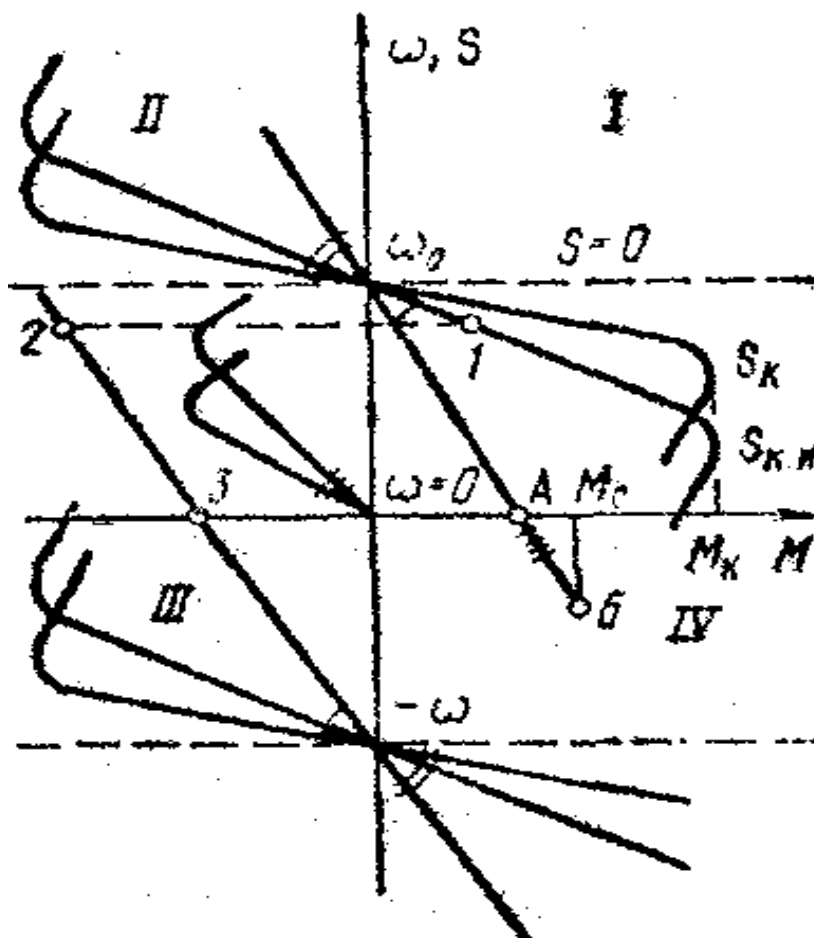


Рисунок 16 - Совмещенные механические характеристики асинхронной машины

На рисунке 17 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 (рисунок 17, 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 $\omega_{гр}$ (рисунок 17, 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.

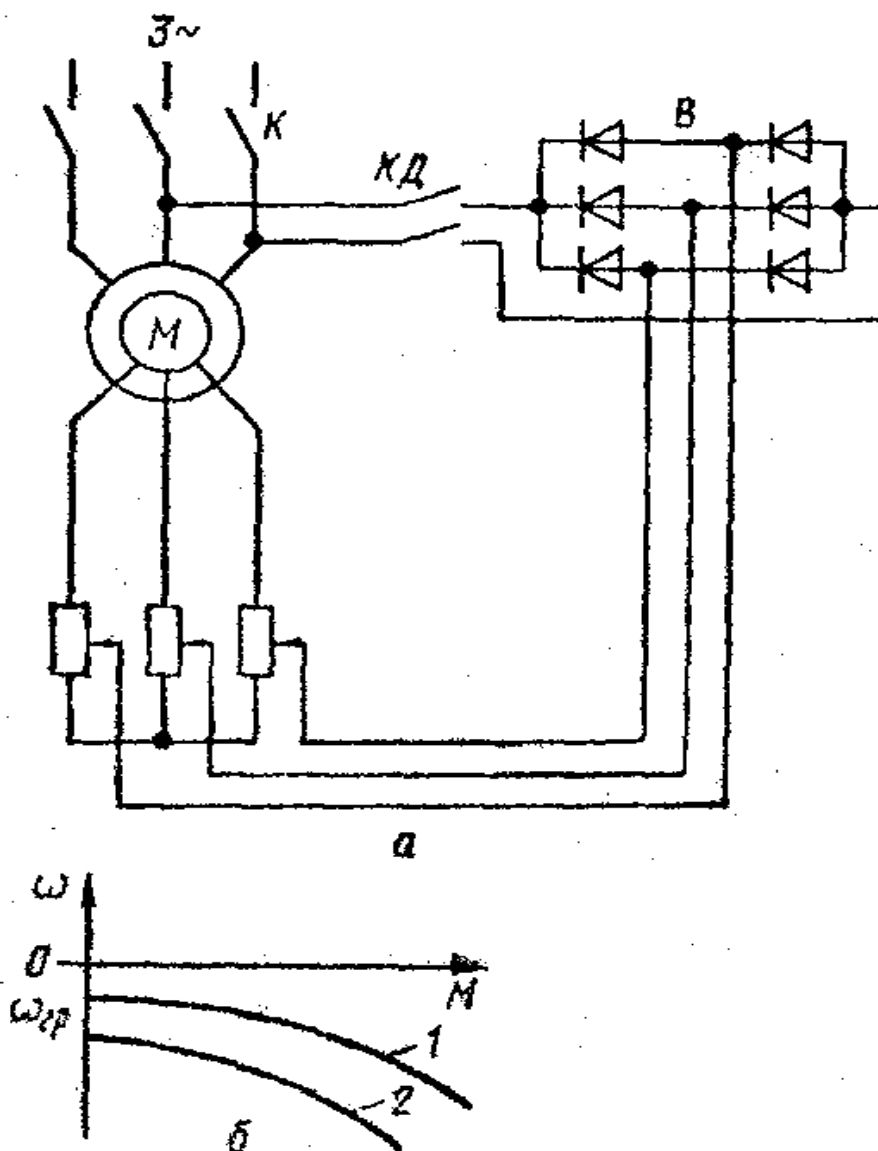


Рисунок 17 Схема (а) и механические характеристики (б) асинхронного двигателя при динамическом торможении с самовозбуждением

Пуск асинхронных электродвигателей. Для ограничения бросков тока и повышения пускового момента пуск электродвигателей, особенно средней и большой мощности, осуществляется через специальное пусковое устройство.

Простейшее из них – пусковой реостат, секции которого изготовлены из стали, чугуна, хрома, фехраля и других сплавов с повышенным сопротивлением. По мере разгона двигателя реостат выводится ступенями.

В случае если питающая сеть недостаточно мощная, применяется пуск асинхронных двигателей при пониженном напряжении с помощью реактора L или автотрансформатора (рисунок 18). При реакторном пуске сначала замыкается линейный контактор $KM1$, а после разгона двигателя – контактор $KM2$, а $KM1$ отключается. При автотрансформаторном пуске сначала включаются контакторы $KM1$ и $KM3$, а после разгона двигателя $KM1$ и $KM3$ отключаются, а контактор $KM2$ включает двигатель на полное напряжение сети.

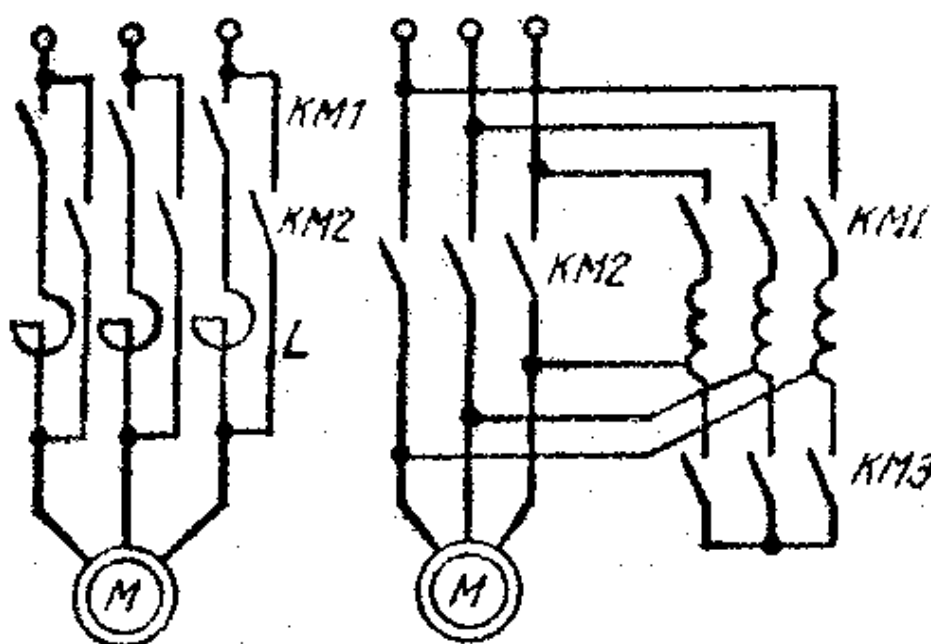


Рисунок 18 - Схемы пуска при пониженном напряжении

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

$$M = 3(U_{\phi})^2 R_{2\Sigma} / [\omega_0 s (R_1 + R_{2\Sigma}/s)^2 + X_{\kappa}^2] \quad (48)$$

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

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

Регулирование скорости асинхронного привода *изменением питающего напряжения* осуществляется путем включения по встречно-параллельной схеме в каждую фазу статора двух тиристоров (рисунок 19, 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 (рисунок 19, 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 рисунке 20. На роторе расположены две обмотки: короткозамкнутая (пусковая) ОП и возбуждения постоянного тока ОВ. Обмотка возбуждения двигателя при пуске замыкается на разрядный резистор R_p , который предохраняет ее от пробоя. При скорости, близкой к синхронной ($\omega \geq 0,95\omega_0$), обмотка возбуждения автоматически подключается к источнику постоянного тока на полное напряжение (контакты КМ замыкаются). При этом двигатель входит в синхронизм. Для нормального вхождения в синхронизм необходимо, чтобы входной момент был больше статического момента на валу: $M_{вх} > M_c$.

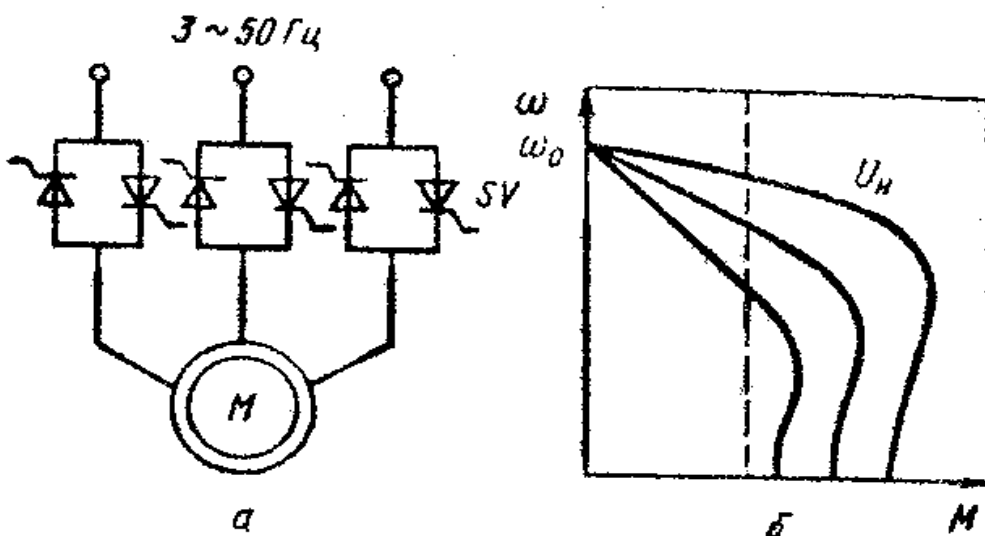


Рисунок 19-Бесконтактное регулирование напряжения асинхронного двигателя

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

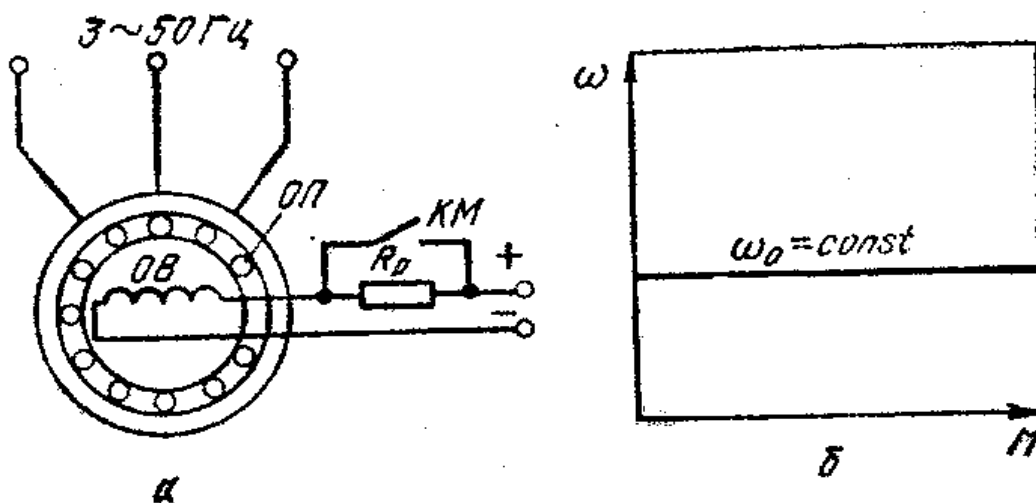


Рисунок 20 - Схема синхронного двигателя

При холостом ходе оси полюсов ротора и поля статора совпадают ($\theta = 0$ и $M = 0$). При увеличении нагрузки угол возрастает, соответственно возрастает и момент электродвигателя M . При дальнейшем увеличении нагрузки ($\theta > 90^\circ$) момент M начнет уменьшаться, что соответствует выпадению электродвигателя из синхронизма и его остановке. Номинальной нагрузке на валу соответствует угол $\theta = 20 \dots 30^\circ$. 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.

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

3.2 Механические характеристики электродвигателей постоянного тока

Электродвигатели постоянного тока могут иметь независимое, параллельное, последовательное или смешанное возбуждение (рисунок 21).

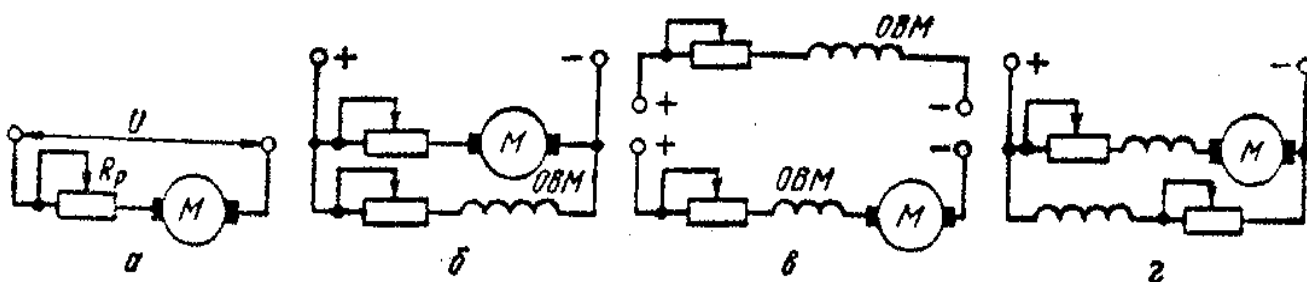


Рисунок 21 - Схемы электродвигателей постоянного тока независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения (верхняя часть схемы «в» принадлежит схеме «а»)

В электродвигателе параллельного возбуждения обмотка возбуждения присоединяется параллельно к зажимам якоря. Но ток, протекающий по этой обмотке, в отличие от тока якоря не зависит от нагрузки и определяется приложенным к якорю напряжением и общим сопротивлением цепи

возбуждения. По этой причине электродвигатель параллельного возбуждения называют также электродвигателем с независимым возбуждением.

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

$$M = k \Phi I_{\text{я}}; \quad E = k\Phi\omega, \quad (49)$$

где k – конструктивный коэффициент двигателя;

Φ – магнитный поток, Вб;

$I_{\text{я}}$ – ток якоря, А.

ω – угловая скорость, рад/с.

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

$$\omega = U/(k\Phi) - (R_{\text{я}} + R_{\text{р}}) / (k \Phi) I_{\text{я}}; \quad (50)$$

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

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

$$\omega_0 = U/(k\Phi). \quad (51)$$

На рисунке 22 представлены механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) во всех режимах работы. Характерными точками характеристик в двигательном режиме являются: точка идеального холостого хода ($\omega_0, M = 0$); точка номинального режима ($\omega_{\text{н}}, M_{\text{н}}$); точка короткого замыкания ($\omega = 0, M = M_{\text{к}}$).

Жесткость механической характеристики определяется потоком возбуждения и сопротивлением якорной цепи:

$$\beta = dM/d\omega = - k^2 \Phi^2 / (R_{\text{я}} + R_{\text{р}}) = - M_{\text{к}} / \omega. \quad (52)$$

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

$$\omega_{\text{н.р}} = \omega_0 (1 - I_{\text{н}} (R_{\text{я}} + R_{\text{р}}) / U_{\text{н}}). \quad (53)$$

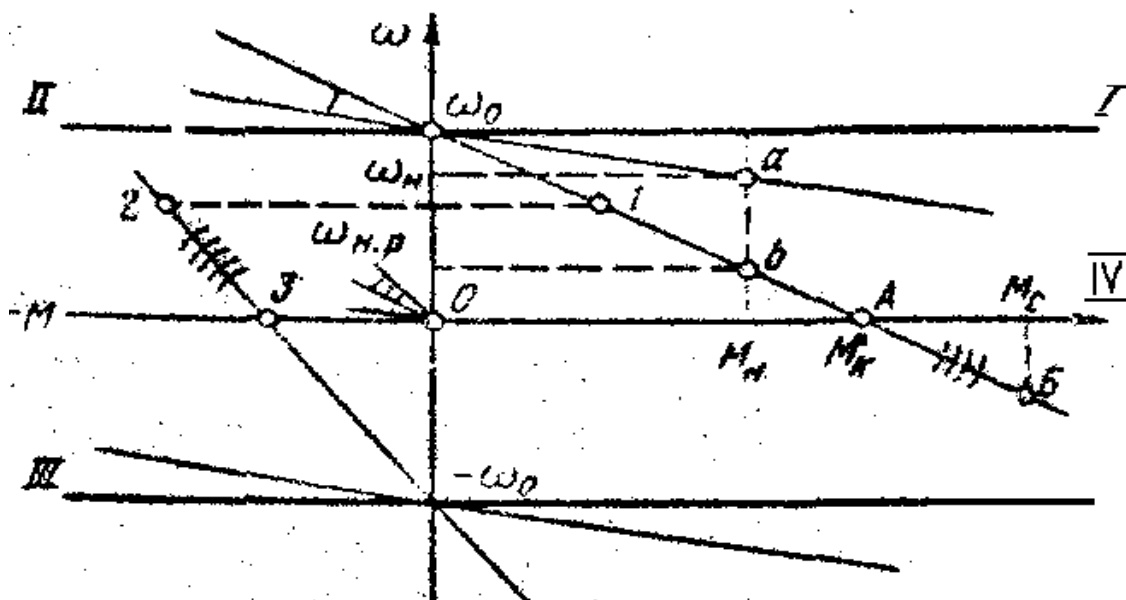


Рисунок 22 - Совмещенные механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Для расчета механических характеристик необходимо знать сопротивление якоря двигателя $R_{я}$, которое задается в каталогах. При отсутствии заводских данных величину $R_{я}$ находят ориентировочно по формуле

$$R_{я} = 0,5 (1 - \eta_n) (U_n / I_n). \quad (54)$$

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 рисунке 22 – линии с тремя засечками).

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

1) *введением большого сопротивления в цепь якоря*. При этом вращающий момент двигателя становится меньше, чем статический момент нагрузки M_c . Двигатель останавливается (в точке А), а затем под действием момента M_c начинает вращаться в другом направлении, развивая тормозной момент; в точке Б наступает установившийся режим. Механические характеристики являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима (на рисунке 22 – линии с четырьмя засечками);

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

В двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением ток якоря одновременно является и током возбуждения. Магнитный поток возбуждения растет с увеличением нагрузки, вследствие чего угловая скорость снижается согласно уравнению (50) и механическая характеристика двигателя будет мягкой (рисунок 23). Благодаря этому ДПТ НВ сравнительно легко и плавно преодолевает перегрузки и имеет высокий пусковой момент. Данные свойства двигателя позволяют широко применять его в приводе транспортных механизмов. Механические характеристики двигателя значительно смягчаются при введении в цепь якоря реостата (рисунок 23, линии с одной засечкой).

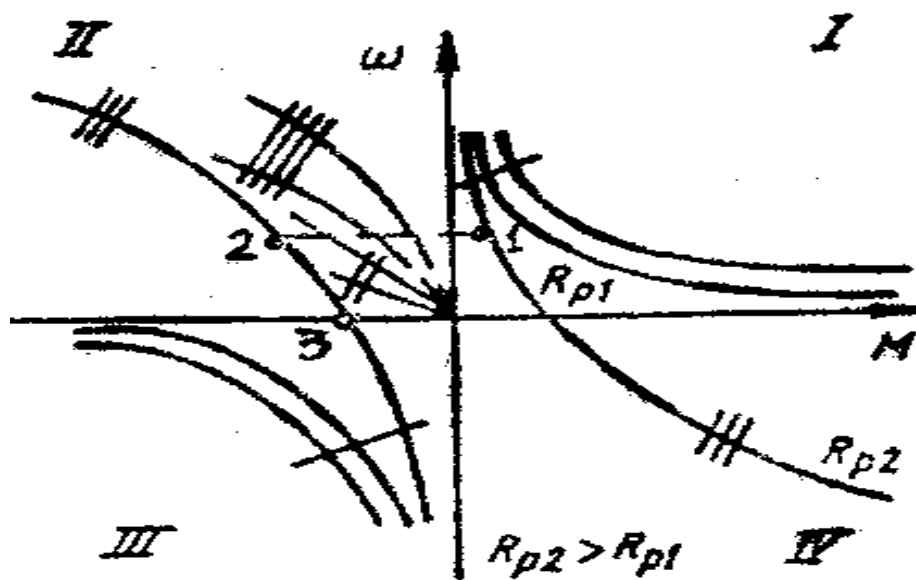


Рисунок 23 - Механические характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

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

Динамическое торможение может осуществляться по схеме с самовозбуждением и с независимым возбуждением. В первом случае якорь и обмотка возбуждения отключаются от сети и замыкаются на реостат. Чтобы избежать размагничивания машины, необходимо переключить обмотку возбуждения (или якорь) таким образом, чтобы направление тока в обмотке возбуждения не изменилось. В этом случае машина самовозбуждается при данном сопротивлении цепи якоря лишь при определенном значении угловой скорости; возбуждись, она создает тормозной момент. Механические характеристики нелинейные (на рисунке 23 – кривые с четырьмя засечками).

Механические характеристики двигателя в режиме динамического торможения с независимым возбуждением аналогичны соответствующим характеристикам двигателя с независимым возбуждением (на рисунке 23 – 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 рисунке 23 – линия с тремя засечками). При втором способе торможение осуществляется по линии 1–2–3.

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

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

Регулирование *по первому способу* имеет существенно недостатки:

- уменьшается жесткость механических характеристик при снижении угловой скорости, а потери мощности в главной цепи 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 якорю напряжения, которое осуществляется с помощью специального регулируемого преобразователя. В качестве индивидуальных источников питания используют в основном тиристорные преобразователи. Жесткость механических характеристик привода по системе «преобразователь – ДПТ НВ» практически постоянна. Механические характеристики представляют собой семейство параллельных друг другу прямых. Диапазон, плавность, точность регулирования здесь выше, чем при других способах регулирования. Поэтому данная система привода применяется для механизмов, требующих глубокого и плавного регулирования скорости.

Расчет добавочных резисторов в цепи якоря ДПТ НВ. Если известна естественная электромеханическая или механическая характеристика I двигателя (рисунок 24) 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 ω_n, I_n или ω_n, M_n , можно выполнить следующими наиболее распространенными методами.

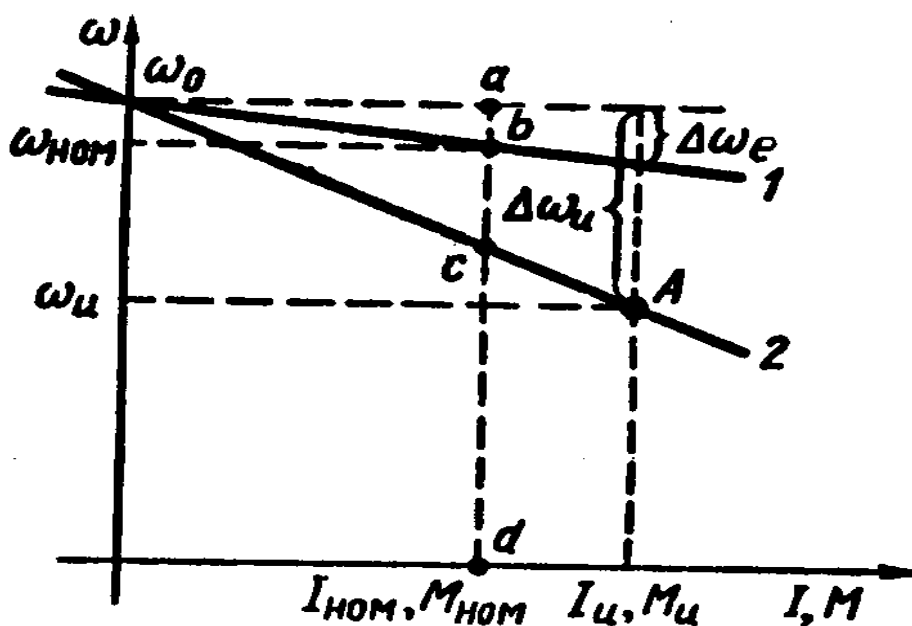


Рисунок 24 - Характеристики ДПТ НВ для расчета величины регулировочных резисторов

Метод пропорций. Запишем отношение перепадов скорости при токе I_n или моменте M_n на естественной $\Delta\omega_e$ и желаемой искусственной $\Delta\omega_n$ характеристиках:

$$\Delta\omega_e / \Delta\omega_n = I_n R_{\text{я}} / (I_n (R_{\text{я}} + R_d)) = R_{\text{я}} / (R_{\text{я}} + R_d). \quad (55)$$

Тогда искомая величина

$$R_d = R_y (\Delta\omega_n / \Delta\omega_e - 1). \quad (56)$$

Метод отрезков не требует знания значения собственного сопротивления двигателя R_y (более того, его значение можно определить по известной естественной характеристике).

Запишем выражение для скорости двигателя на заданной искусственной характеристике (см. рисунок 24) при номинальных токе I_n , моменте M_n , магнитном потоке Φ_n и напряжении U_n :

$$\omega_n = U_n / (k\Phi_n) (1 - I_n R / U_n), \quad (57)$$

где $U_n / (k\Phi_n) = \omega_0$.

Тогда

$$\omega_n = \omega_0 (1 - R / R_n). \quad (58)$$

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

Соотношение

$$R / U_n = (\omega_0 - \omega_n) / \omega_0 = \delta \quad (59)$$

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

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

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

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

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

$$R_{д1} = (U / I_{доп}) - R_y. \quad (60)$$

Сопротивление резистора $R_{д2}$ при динамическом торможении

$$R_{д2} = (E / I_{доп}) - R_y \approx (U / I_{доп}) - R_y. \quad (61)$$

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

$$R_{д3} = ((U + E) / I_{доп}) - R_{я} \approx (2U / I_{доп}) - R_{я}. \quad (62)$$

Пример. 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 $\omega_{и} = 90$ рад/с, $M_{н} = 25$ Н·м;

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

Решение

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

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

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

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

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

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

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

Тогда искомое сопротивление резистора

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

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:

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

4 Аппаратура и схемы управления электроприводами

К контактной аппаратуре управления относятся следующие электрические аппараты: рубильники, пакетные выключатели, контроллеры, универсальные переключатели, командоконтроллеры, путевые переключатели, кнопки. Основными элементами этих аппаратов являются *контакты*, для изготовления которых применяют медь, бронзу, латунь, в особо ответственных случаях – серебро. Все большее применение находят контакты из металлокерамики, обладающие повышенной надежностью, долговечностью, износостойкостью. Переключение контактов осуществляется путем воздействия на них различных *рычагов* или *кулачков* вручную или механически – элементом движущейся машины.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Командоконтроллеры служат для ручного дистанционного управления механизмами (кранов и др.). На рисунке 25, 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.

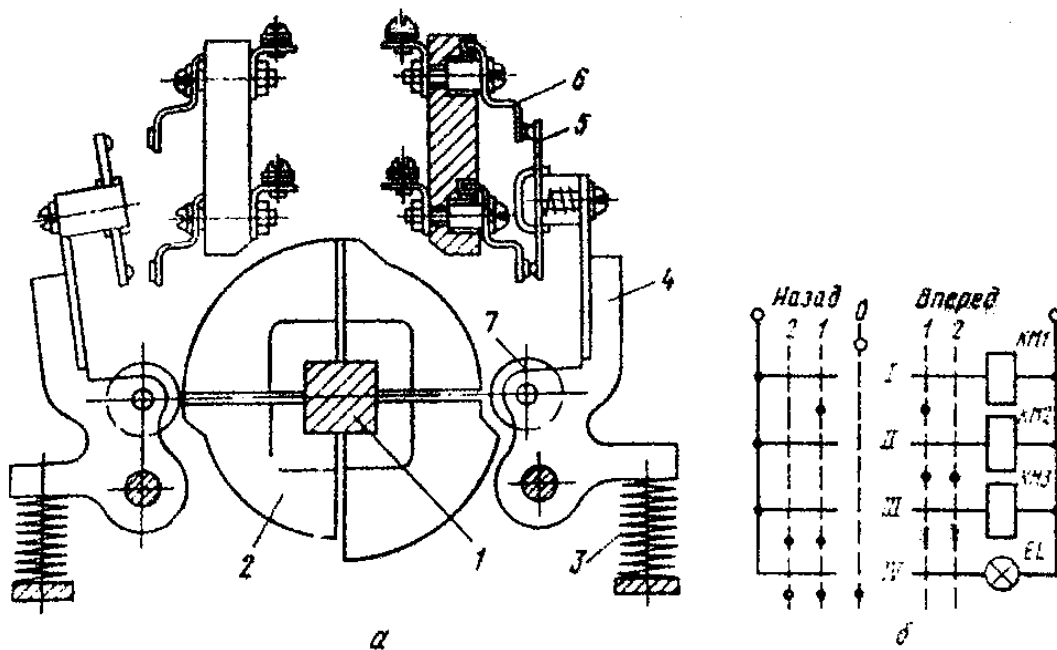


Рисунок 25 - Кулачковый командоконтроллер

На рисунке 25, 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 четыре (IV) и включена лампочка EL. В положении 1 «Вперед» замкнуты контакты один (I), два (II) и включены катушки KM1, KM2. В положении 2 «Вперед» замкнут контакт два (II) и включена катушка KM2.

В цепях электрического освещения станков и других потребителей малой мощности применяются малогабаритные одно- или двухполюсные 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, РС цепочки и т.п.

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

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

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

Контакторы различаются по следующим показателям:

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

Основными элементами контактора (рисунок 26) 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).

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 $K_{\text{в}}$* , равный отношению значений входной величины при отпуске якоря и срабатывании реле ($K_{\text{в}} = 0,4...0,95$).

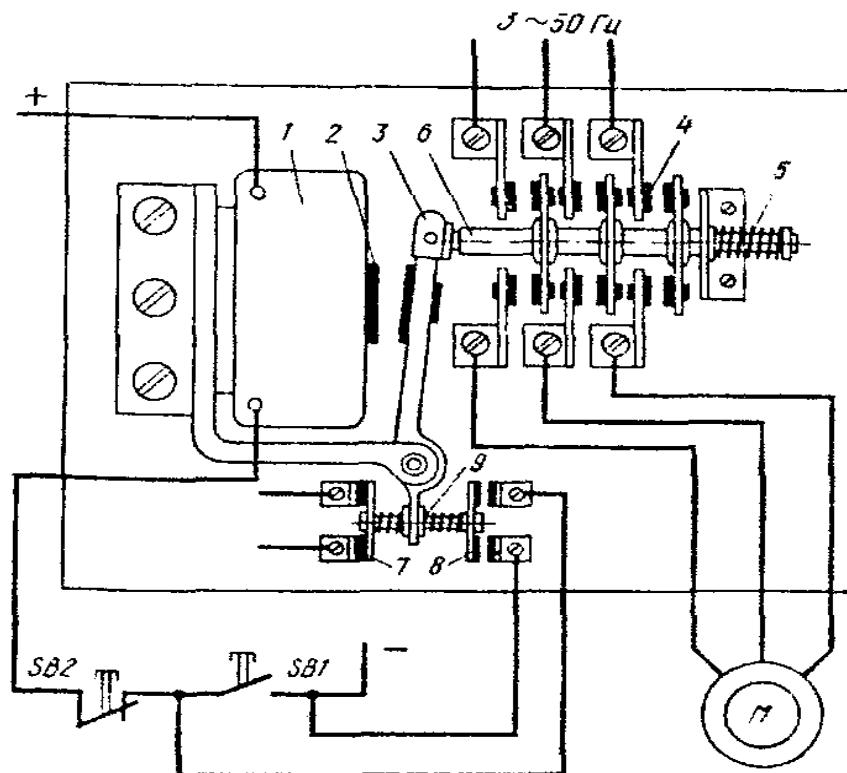


Рисунок 26 - Схема контактора

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 отпускания 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...10 А. Катушки их рассчитаны на номинальные напряжения 24...660 В.

Все более широкое применение находят герконовые реле с электромагнитной памятью (рисунок 27). Геркон 1 помещен в магнитное поле магнитотвердого феррита 4 с наконечниками 2. Импульс тока в катушке 3 приводит к срабатыванию реле – контакты 1 замыкаются, оставаясь замкнутыми и после окончания импульса тока за счет намагничивания ферритового сердечника. Для отпускания реле необходимо подать импульс тока обратного направления. Число контактов 1 : 10; потребляемая мощность катушки 0,1...2 Вт. Достоинства герконов: высокое быстродействие, износостойчивость (до 10^9 срабатываний), малые габариты, невысокая стоимость.

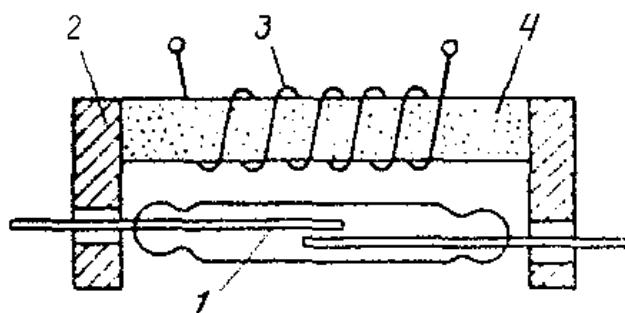


Рисунок 27 - Схема устройства геркона

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

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

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

4.1 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; К – реле, контакторы, пускатели (КА – токовое реле, КК – электротепловое реле, КТ – реле времени, КУ – реле напряжения, КМ – контактор, магнитный пускатель); М – двигатель; Q – выключатель в силовых цепях (QF – автоматический выключатель, QS – рубильник); S – коммутационные устройства для слаботочных цепей (SA – выключатель или переключатель, SB – выключатель кнопочный, SQ – выключатель путевой, SM – командоконтроллер); Т – трансформаторы (ТА – трансформатор тока, ТU – 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 рисунке 28, 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 размыкающий контакт кнопки SB2 и кнопку SB1 образуется замкнутая цепь для катушки контактора КМ1) и

своими главными контактами (с дугогашением) КМ1 подключает статор двигателя к сети. Замыкающий блок-контакт контактора КМ1 шунтирует кнопку SB1 (это позволяет отпустить кнопку SB1, не отключая катушки контактора КМ1). Блок-контакт КМ1 называют контактом самопитания или контактом самоблокировки. Отключение электродвигателя от сети осуществляется нажатием кнопки SB2 (по катушке КМ1 протекание тока прерывается, контактор отключится, разомкнув три силовых контакта КМ1 в цепи двигателя М), после чего схема приходит в исходное состояние.

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

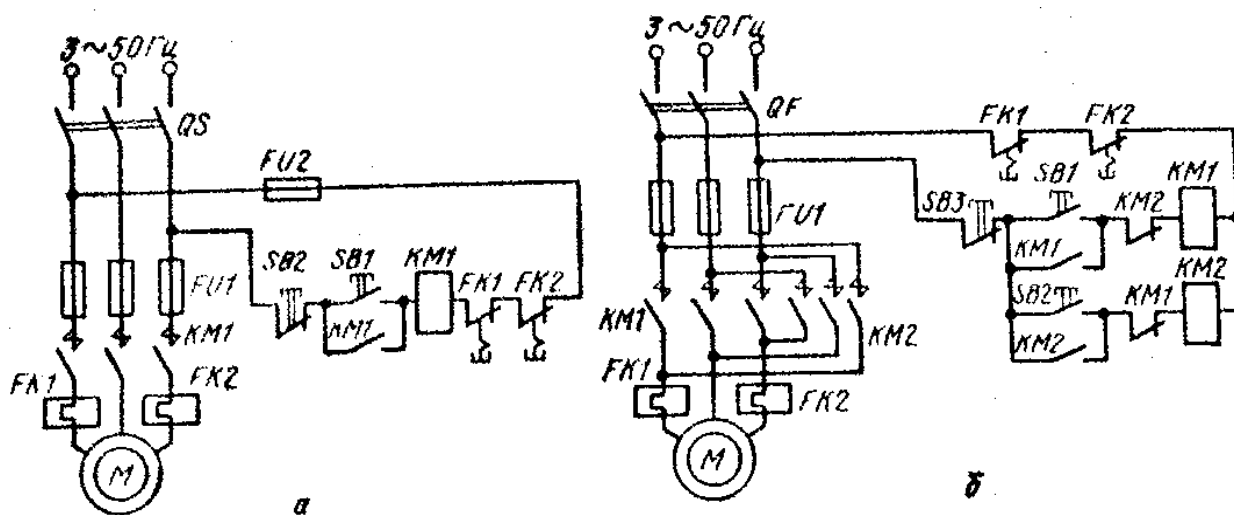


Рисунок 28 - Схемы пуска асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

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

На рисунке 28, б показана схема управления пуском асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с реверсивным магнитным пускателем.

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

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

В схеме на рисунке 29, а защита двигателя М осуществляется тепловыми реле FK1, FK2, включенными в две фазы статора, а также плавкими предохранителями FU1. Размыкающие контакты защитных реле FK1, FK2 включены в цепь катушки контактора KM1. Защита схемы управления двигателем осуществляется плавкими предохранителями FU2. При перегрузке или коротком замыкании срабатывает реле защиты FK1 или FK2. Контакт защитного реле размыкается и отключает катушку контактора KM1, который своими главными контактами KM1 отключит двигатель М от сети.

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

Часто необходимо, чтобы электропривод работал, лишь пока нажата кнопка «Пуск». Такое управление требуется при установочных перемещениях (при наладке), когда при кратковременном нажатии на кнопку должно произойти небольшое перемещение (толчок) узла станка. В данном случае не нужны контакты самопитания для кнопки «Пуск» и сама кнопка «Стоп» (рисунок 29, а). Нередко возникает необходимость управления одним и тем же электроприводом в обоих режимах: установочном и длительном (рисунок 29, 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.

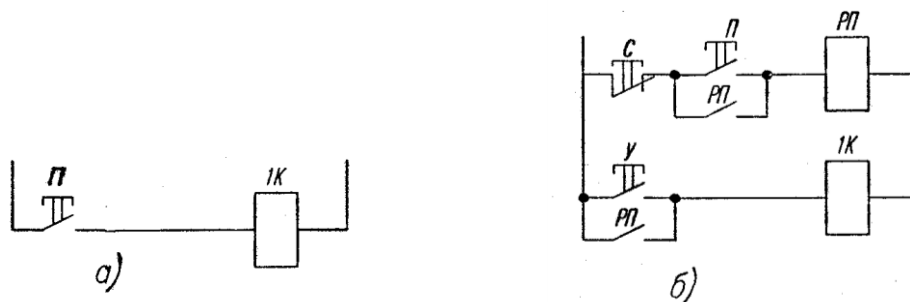


Рисунок 29 - Схемы пуска АД с короткозамкнутым ротором

Блокировки в электрических схемах обеспечивают правильный порядок работы схемы, исключают холостые и аварийные включения аппаратов, предупреждают несчастные случаи, возможные завалы перегрузочных пунктов, поломки машин и др. По назначению блокировки разделяют на технологические и защитные. *Технологические* блокировки используются для осуществления заданной последовательности работы схемы. *Защитные* блокировки предотвращают ошибочные переключения в схеме и защищают электрооборудование, механизмы, а иногда и оператора от последствий неправильных действий. К защитным относятся блокировки реверсивных пускателей, предупреждающие их одновременное включение (см. рисунок 29, 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 (рисунок 30), 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 рисунке 30, 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 .

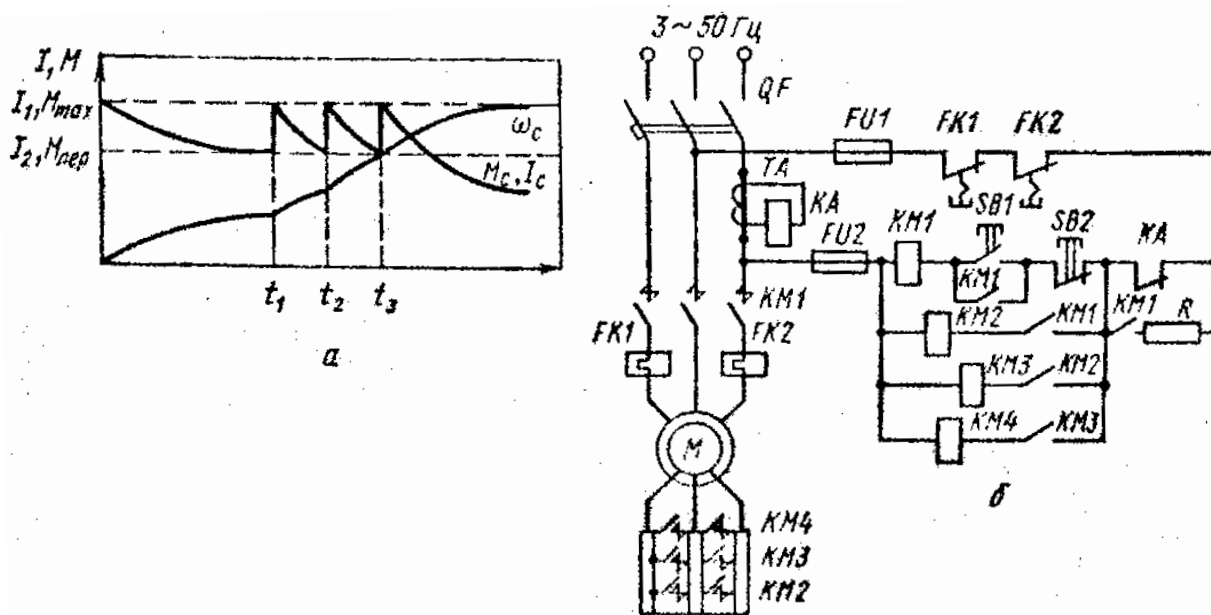


Рисунок 30 - Пусковая диаграмма (а) и схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором в функции тока

Автоматическое управление в функции тока. Величина тока во время пуска двигателя колеблется в заданных пределах (см. рисунок 30, а) $I_1 - I_2$, где I_1 – наибольший пусковой ток в момент включения электродвигателя. По мере разгона двигателя его ток снижается до величины I_2 , при которой часть пускового реостата шунтируется, что приводит к новому увеличению тока до значения I_1 и т.д. Рассматриваемый метод управления основан на применении токовых реле с катушками, включаемыми в силовую цепь двигателя непосредственно или через трансформатор тока.

Схема пуска асинхронного электродвигателя в функции тока показана на рисунке 30. После включения линейного контактора $KM1$ двигатель запускается при полностью введенном в ротор реостате. Под действием пускового броска токовое реле KA включается и размыкает свой контакт. Катушка $KM1$ при этом получает питание через блок-контакт $KM1$ и резистор R . Замыкание блок-контакта $KM1$ в цепи ускоряющего контактора $KM2$ не вызывает включения последнего из-за значительной величины сопротивления резистора R .

Только после уменьшения тока двигателя до величины I_1 реле KA , отрегулированное на соответствующую силу тока, отпустит свой якорь и замкнет размыкающий контакт KA . При этом контактор $KM2$ своими силовыми контактами шунтирует первую секцию пускового реостата. Соответствующий этому бросок тока снова вызовет включение реле KA , которое своим блок-контактом препятствует мгновенному включению второго ускоряющего контактора $KM3$. Контактор же $KM2$ остается включенным через блок-контакт $KM1$ и резистор R , так как его ток при этом достаточен для удержания якоря в притянутом положении. Аналогично происходит шунтирование остальных ступеней реостата. Достоинством данного способа

пуска является автоматическое изменение выдержки времени при изменении нагрузки.

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

Широкое распространение получили *пневматические реле времени*, обеспечивающие выдержку времени от 0,4 до 180 с. В схемах постоянного тока широко используется *электромагнитные реле времени* (рисунок 31). Электромагнитные реле времени обеспечивают выдержки времени от 0,3 до 16 с (в зависимости от исполнения).

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

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

Схема автоматизации пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением посредством электромагнитных реле времени 1РУ и 2РУ, называемых в таких схемах реле ускорения, приведена на рисунке 31.

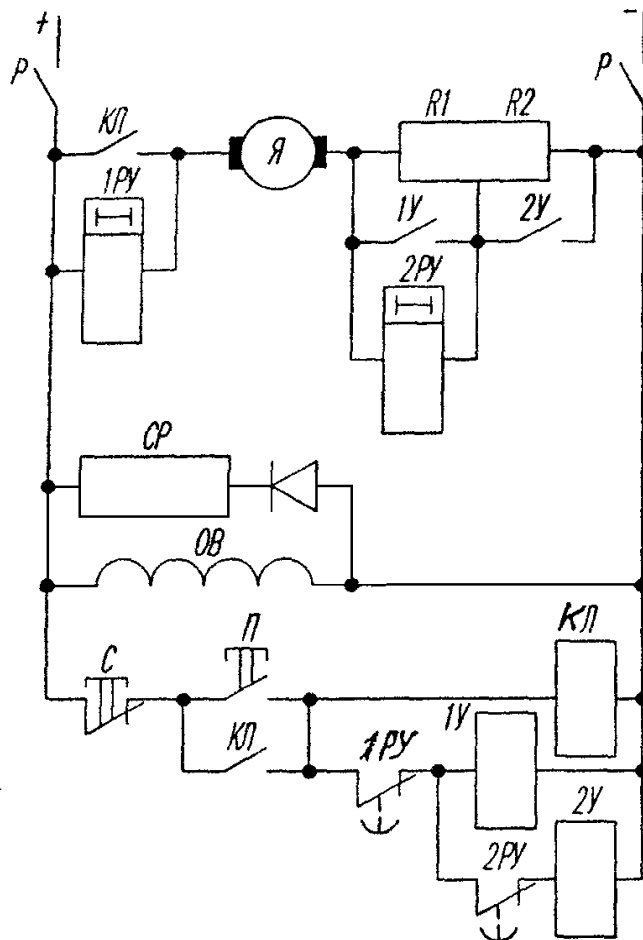


Рисунок 31 - Автоматизация пуска двигателя постоянного тока

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

При нажатии кнопки П включается линейный контактор КЛ и становится на самопитание. Рабочий контакт КЛ замыкает цепь якоря электродвигателя, по которой проходит пусковой ток, ограниченный двумя ступенями реостата. Часть пускового тока ответвляется в катушку реле 2РУ, которое теперь включается и мгновенно 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.

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

Схема автоматического пуска асинхронного двигателя с использованием реле времени электромагнитного типа показана на рисунке 32. Нажатием кнопки SB1 подается питание на катушку контактора КМ1, который, включившись, своими главными контактами подключает электродвигатель М к сети при полностью введенном в цепь ротора реостате. Размыкающий блок-контакт КМ1 отключает реле времени КТ1, и последнее с выдержкой времени включает первый ускоряющий контактор КМ2, включившись, он шунтирует первую ступень пускового реостата. Аналогично шунтируются вторая и третья ступени пускового реостата, после чего двигатель выходит на естественную характеристику и пуск на этом заканчивается.

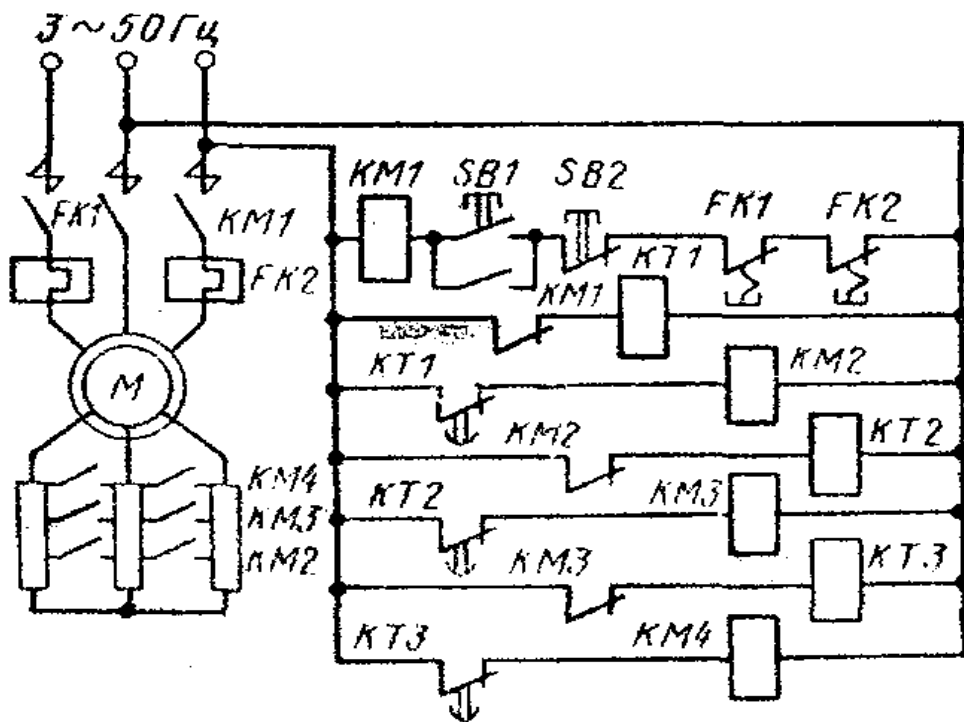


Рисунок 32 - Схема пуска АД с фазным ротором в функции времени

На рисунке 33 представлена схема резисторного пуска двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением с использованием реле времени и командоконтроллера. Такие схемы в реверсивном исполнении используются на транспортных установках. Пуск осуществляется в три ступени. Командоконтроллер SM имеет четыре положения (0, 1, 2, 3). В нулевом положении командоконтроллера SM замкнуты его контакты 0–0, включено реле FV и замкнут его контакт FV, подающий питание на нижнюю часть схемы управления. Двигатель отключен от сети. В положении 1 командоконтроллера замкнут его контакт I–I, включается контактор KM1, который подключает двигатель к сети при полном сопротивлении в цепи якоря.

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

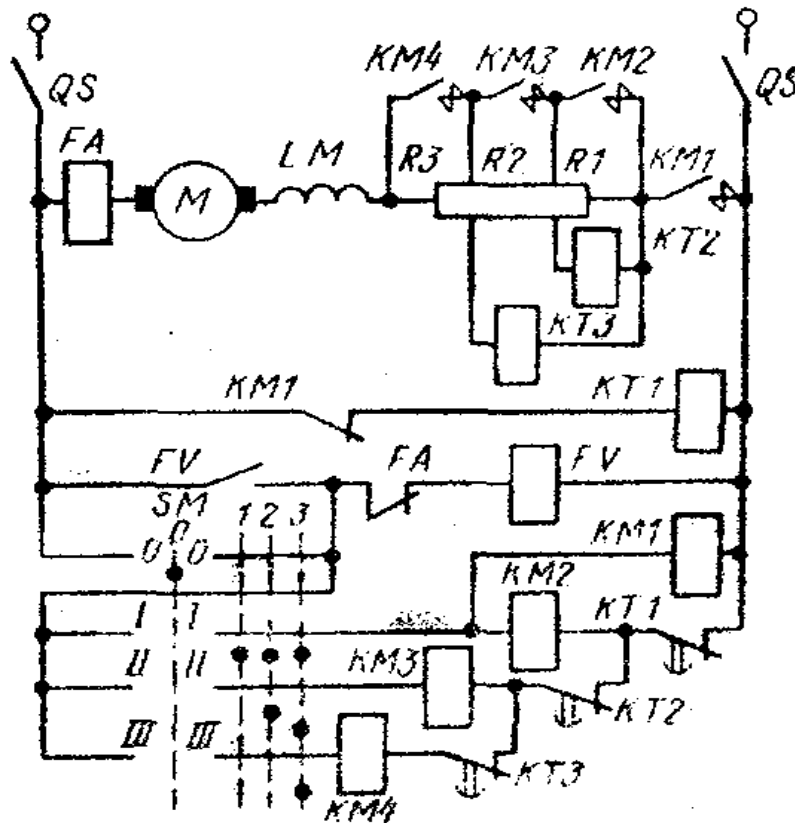


Рисунок 33 - Схема пуска двигателя постоянного тока

Схема автоматического управления асинхронным двигателем с фазным ротором с динамическим торможением в функции времени представлена на рисунке 34. Перед пуском двигателя универсальный переключатель SA должен стоять в положении С («Стоп»), в котором замкнуты контакты 2–4, а контакты 1–3 разомкнуты. В этом положении переключателя катушки контакторов 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 КV замкнется. Через контакты 2–4 универсального переключателя и контакт КТ2 включается реле КV и замыкает свой контакт. Таким образом, схема готова к работе, двигатель неподвижен.

Для пуска двигателя переводим ручку SA в положение II («Пуск»). При этом замкнутся контакты 1–3 (контакты 2–4 разомкнутся). В катушку контактора КМ1 будет подан ток по цепи: «плюс» источника постоянного тока, плавкий предохранитель FU1, контакт КV, контакты 1–3 переключателя SA, размыкающий контакт КМ4, катушка контактора КМ1, «минус» источника тока. Контакты контактора КМ1 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 КТ1, КТ2.

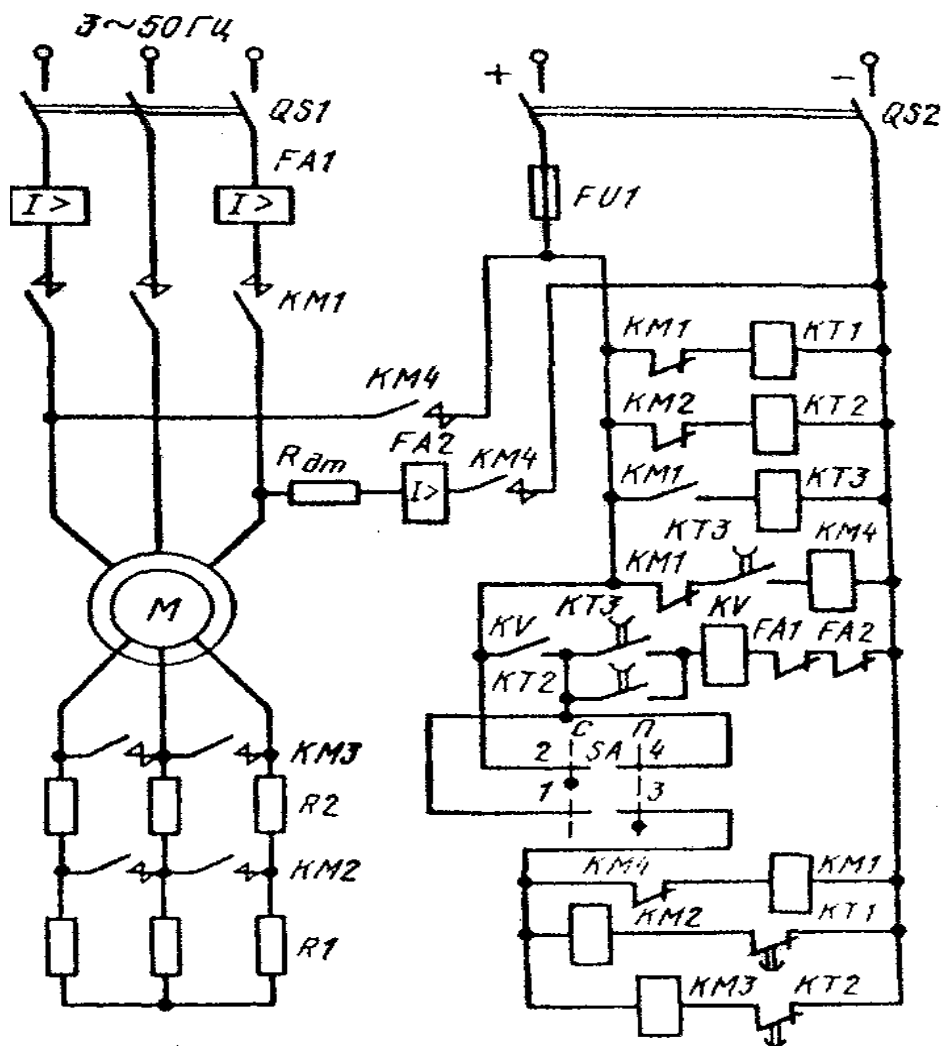


Рисунок 34 - Схема управления АД с фазным ротором с динамическим торможением

Работа схемы происходит следующим образом. Размыкающий контакт включившегося контактора $KM1$ размыкает цепь катушки реле времени $KT1$. Реле отключается и с выдержкой времени замыкает свой размыкающий контакт $KT1$ в цепи контактора $KM2$. Контактор включается и своими главными контактами $KM2$ шунтирует первую ступень реостата $R1$. Двигатель разгоняется по новой реостатной характеристике. Размыкающий блок-контакт $KM2$ размыкает цепь катушки реле $KT2$. Последнее отключается и с выдержкой времени замыкает свой размыкающий контакт $KT2$ в цепи контактора $KM3$. Контактор $KM3$ своими главными 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 C («Стоп»). При этом его контакты 1–3 размыкаются и отключают

контакторы КМ1 – КМ3. Kontakтами КМ1 двигатель отключается от сети переменного тока, а в цепи ротора вводится весь пусковой реостат, поскольку контакты КМ2, КМ3 разомкнутся. Одновременно с перечисленными выше переключениями разомкнется контакт КМ1 в цепи реле времени КТ3 и замкнется контакт КМ1 в цепи контактора КМ4. Хотя катушка КТ3 обесточивается, контакт реле КТ3 в течение времени выдержки останется замкнутым. Через контакты КМ1 и КТ3 в катушку контактора КМ4 будет проходить ток. Замкнувшиеся контакты КМ4 через дополнительный резистор $R_{дт}$ подадут постоянный ток в две фазы статора асинхронного двигателя. Двигатель остановится в режиме интенсивного динамического торможения.

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

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

Автоматическое управление в функции скорости. Простейшим командным аппаратом в системах автоматического управления в функции скорости является *индукционное реле контроля скорости* (рисунок 35). 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.

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.

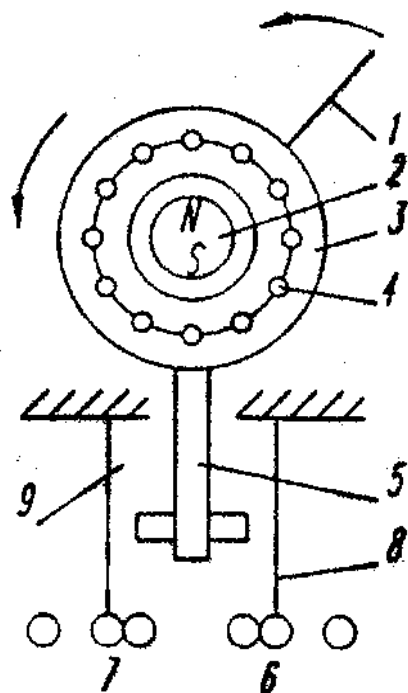


Рисунок 35 Схема реле контроля скорости

Наиболее широкое применение в машиностроении реле контроля скорости получило в схемах торможения *противовключением* асинхронных двигателей. Одна из таких схем представлена на рисунке 36. 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.

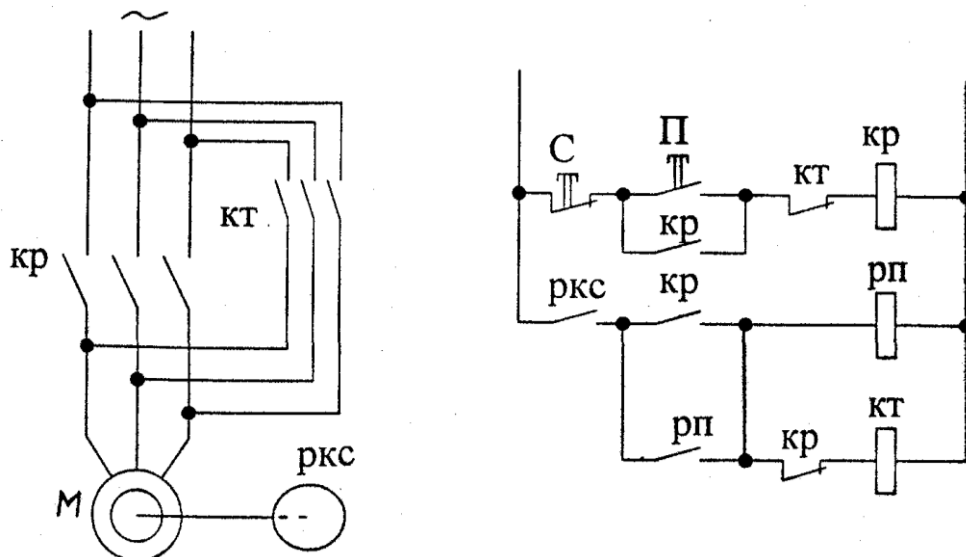


Рисунок 36 - Схема торможения противовключением нереверсивного двигателя

4.2 Аппаратура и схемы защиты электродвигателей

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

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

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

защиты электродвигателя от недопустимого перегрева при длительных небольших перегрузках применяют **тепловые реле** (рисунок 37). Ток защищаемого электродвигателя проходит через нагревательный элемент 1. Вблизи него расположена пластинка, состоящая из двух наложенных одна на другую и сваренных между собой полос 2 и 3 из металлов с различными коэффициентами теплового расширения. При нагревании пластинка изгибается вправо, воздействует на рычаг 4, который под действием пружины 5 повернется против часовой стрелки и разомкнет контакт 6. Этот контакт, включенный в цепь управления электродвигателя, отключит электродвигатель от сети. После остывания биметаллической пластинки нажатием кнопки возврата 7 рычаг 4 возвращается в исходное состояние и контакт 6 замыкается.

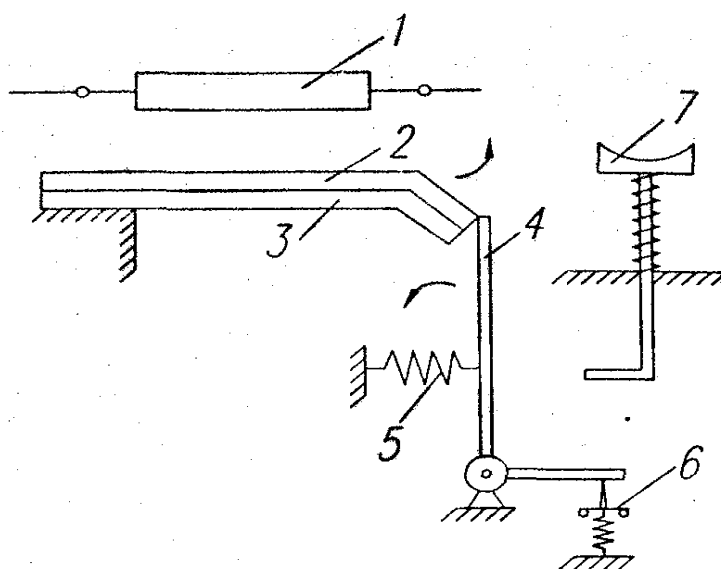


Рисунок 37 - Схема теплового реле

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

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

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

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

Для защиты от коротких замыканий и чрезмерных перегрузок кроме плавких предохранителей применяют *реле* постоянного и переменного тока. Схема устройства электромагнитного реле переменного тока ЭТ-520 показана на рисунке 38. 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.

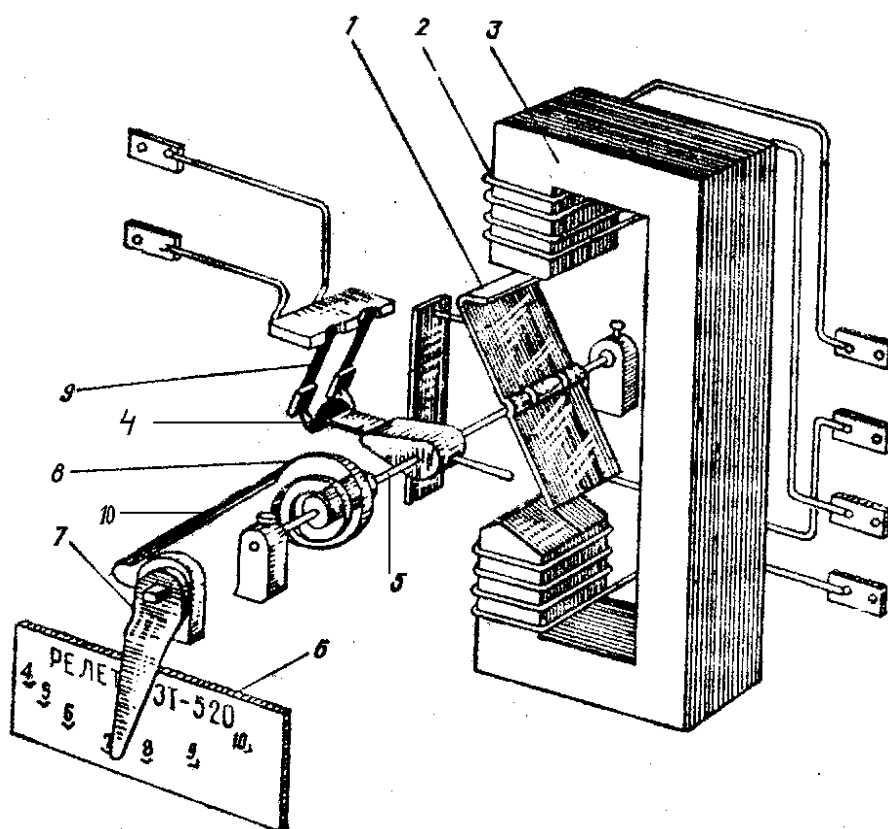


Рисунок 38 - Конструктивная схема электромагнитного реле тока

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

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

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

Автоматический выключатель может быть снабжен тремя электромагнитными расцепителями максимального тока, катушки которых включаются в цепи рабочего тока фаз. Эти расцепители практически мгновенно отключают аппарат при токе, превышающем номинальный в 6...10 раз (величину этого тока можно регулировать). Выпускают также автоматические выключатели с расцепителями минимального напряжения, которые обеспечивают нулевую защиту установки.

В схемах с аппаратами ручного управления для обеспечения нулевой защиты применяют промежуточные реле (рисунок 39). Перед началом работы станка необходимо нажать на кнопку ПП (подготовка пуска). Включится промежуточное реле РП и замкнет свой контакт РП, после чего кнопку ПП можно отпустить, а нижняя часть схемы с контактами контроллера КК-1, переключателя управления ПУ и т.д. и катушками контакторов оказывается под напряжением. При уменьшении напряжения питания до нуля или до недопустимо низких значений реле РП отпадает и его контакт РП отключает питание нижней части схемы. Наличие напряжения питания сигнализируется лампой ЛС.

Если все цепи управления схемы замыкаются одним *командоконтроллером*, можно применить схему, изображенную на рисунке 39, б здесь промежуточное реле РП включается контактом КК-0 командоконтроллера, когда контроллер установлен в нулевое положение (другие контакты контроллера разомкнуты). При повороте контроллера в любое рабочее положение контакт КК-0 разомкнется, а другие замкнутся, при этом реле РП будет питаться через контакт самоблокировки. Если напряжение питания исчезнет, реле РП отключится. Для нового включения контакторов 1К и др. при появлении напряжения питания необходимо предварительно вернуть командоконтроллер в нулевое положение.

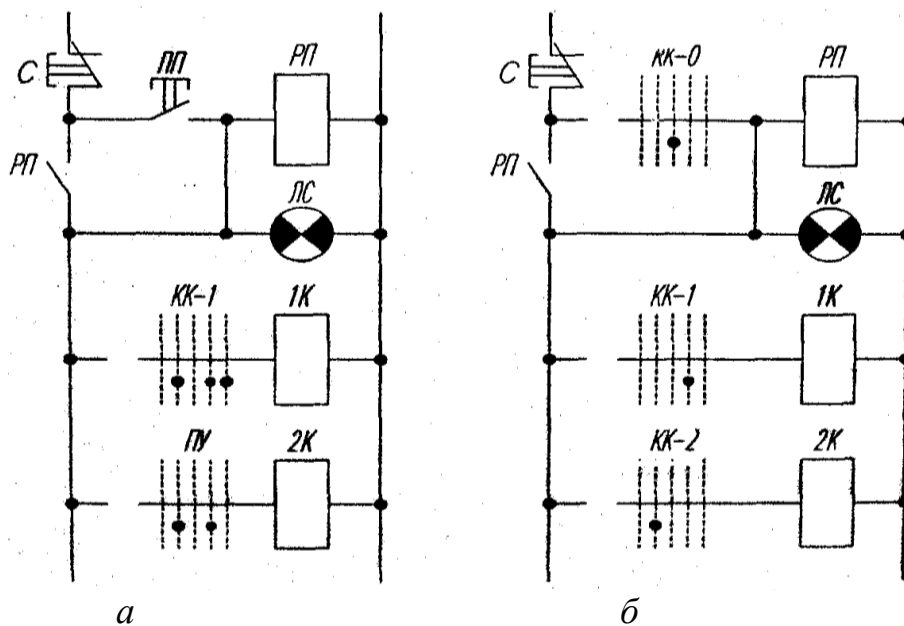


Рисунок 39 - Нулевая защита в схемах с командоконтроллером

4.3 Бесконтактная аппаратура. Датчики

Бесконтактная аппаратура находит все более широкое применение в электрооборудовании машиностроительного производства благодаря таким достоинствам, как высокая допустимая частота включений, долговечность, быстрдействие, 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 рисунке 40 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).

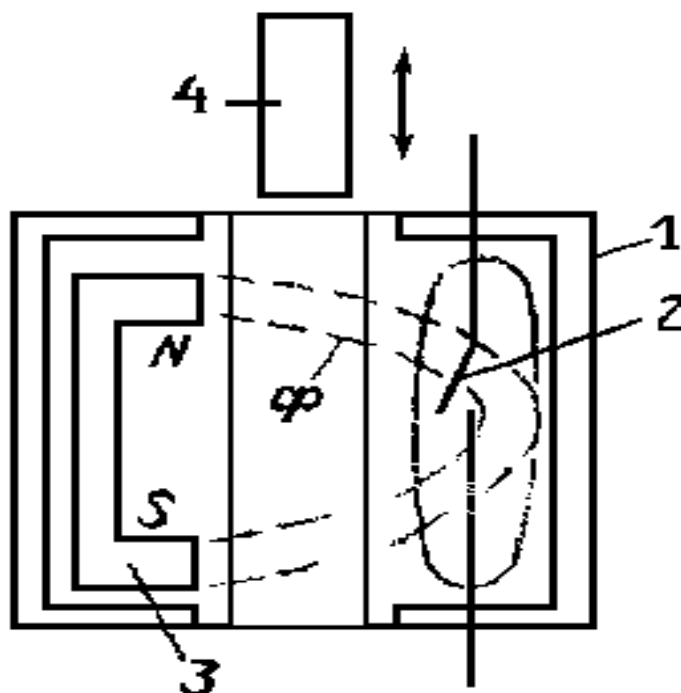


Рисунок 40 - Схема датчика положения на герконе

На рисунке 41,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):

$$U_{\text{вых}} = E_1 - E_3 = \sqrt{3} \cdot E_{\text{max}} \cdot \sin \beta, \quad (63)$$

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. 41,б).

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

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.

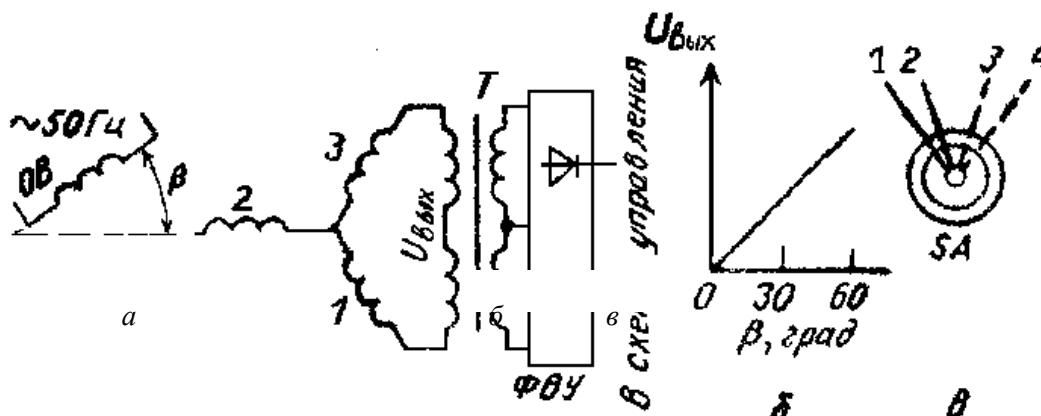


Рисунок 41 - Сельсинный командоаппарат:
 а – схема; б – статическая характеристика; в – условное обозначение

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

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

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

На рисунке 42 приведены условные графические обозначения основных бесконтактных логических элементов и эквивалентные им контактные схемы. Входные сигналы обозначены $X1$, $X2$, выходной – Y .

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

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

Элемент И–НЕ является комбинацией двух логических элементов. Сигнал на выходе исчезнет ($Y = 0$) лишь при наличии сигналов на обоих

входах. Во всех остальных случаях входных сигналов на выходе будет сигнал «1».

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 ($Y = 0$).

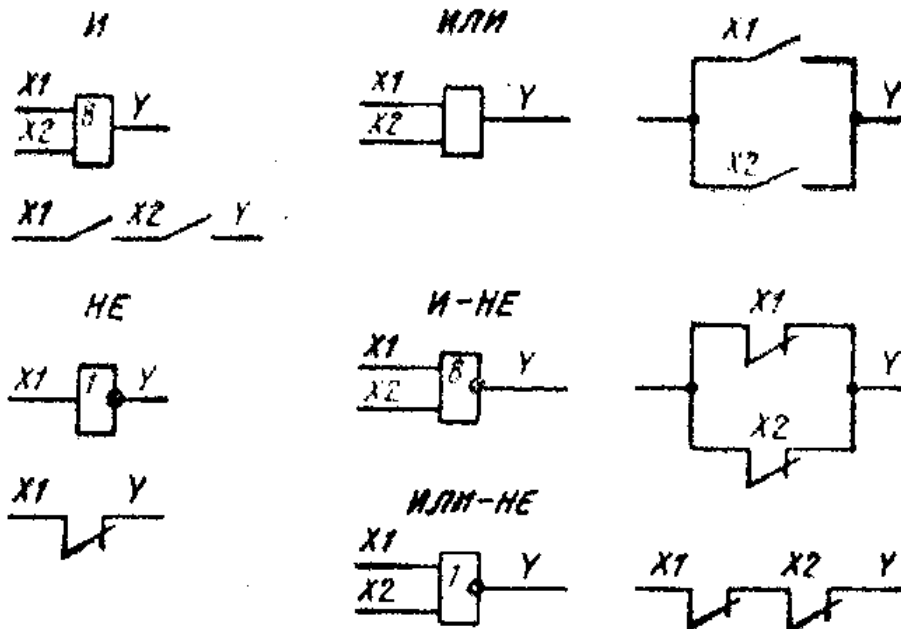


Рисунок 42 - Графическое изображение логических элементов

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 рисунке 43 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.

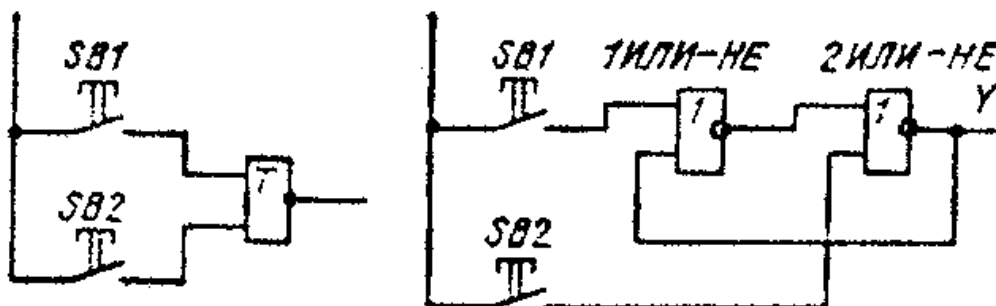


Рисунок 43 - Схема элемента ПАМЯТЬ

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 рисунке 44 представлена схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором в функции времени с использованием логических элементов. Пуск осуществляется в три ступени. В схеме предусмотрена ячейка ПАМЯТЬ на триггере Т. При нажатии на кнопку SB1 на выходе триггера Т появится сигнал «1» и с помощью усилителя А включится линейный контактор KM1. Сигнал на выходе триггера Т сохранится и после отпускания кнопки SB1. Сигнал с выхода триггера Т подается одновременно через цепочку R-C1 (задержка времени) и усилитель А1 на контактор ускорения KM2, который включится с заданной задержкой времени и выведет первую ступень пускового реостата. Затем аналогично включатся с задержками времени (R-C2, R-C3) ускоряющие контакторы KM3 и KM4, после чего пуск двигателя будет закончен.

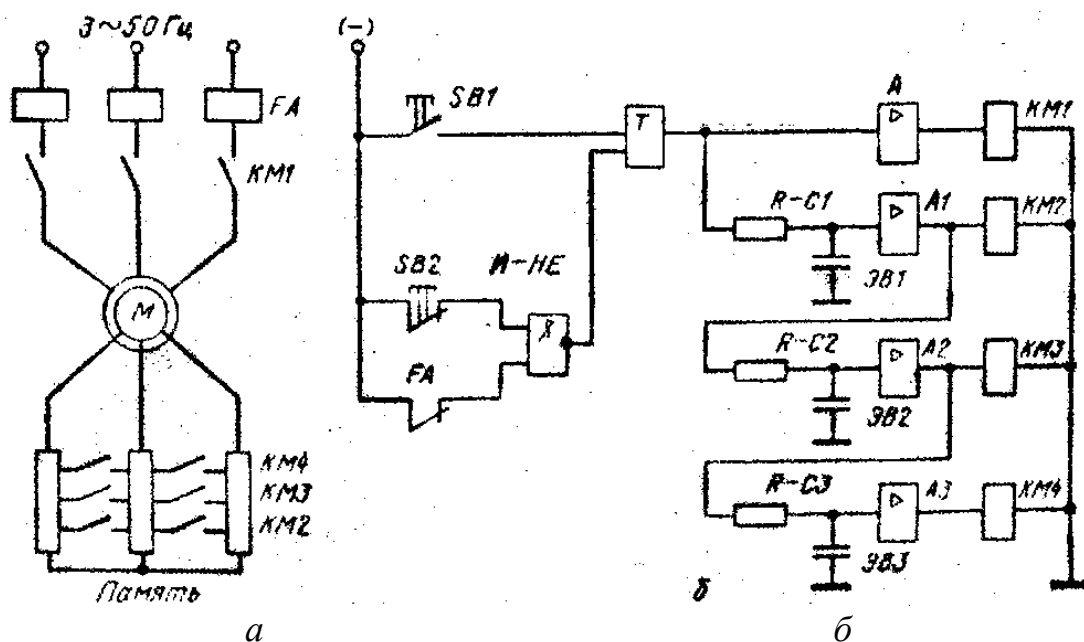


Рисунок 44 - Схема автоматического пуска АД с использованием логических элементов

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

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

5 Выбор электродвигателей для производственных механизмов

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

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

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

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

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

$$\tau = t^{\circ} - t_{\text{окр ср}}^{\circ} = \tau_y (1 - e^{-t/T_n}) + \tau_0 e^{-t/T_n}, \quad (63)$$

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 рисунке 45 кривой 1. Величина τ_y является асимптотой этой кривой. Практически процесс нагревания считается законченным, когда $t = (3-4) T_n$. Например, при $t = 4T_n$ $\tau = 0,982 \tau_y$, т.е. разница между τ и τ_y меньше двух процентов.

При отключении от сети нагретого электродвигателя он начнет охлаждаться. Уравнение его охлаждения имеет вид (см. рисунок 45):

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T_0}. \quad (64)$$

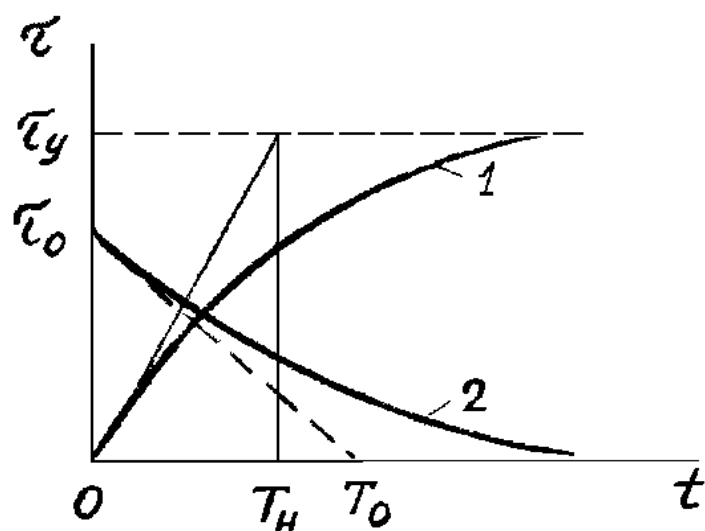


Рисунок 45 - Кривые нагрева (1) и охлаждения (2) двигателя

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

Из приведенных уравнений следует, что процессы нагревания и охлаждения электродвигателя зависят практически от величин 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 ($\tau = \tau_y = \text{const}$).

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

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

S1 – продолжительный (или **длительный**) – перегрев электродвигателя достигает установившегося значения τ_y (рисунок 46, а). Длительность рабочего периода $t_p > 3T_n$, длительность паузы роли не играет. В продолжительном режиме работают двигатели насосов, компрессоров, конвейеров, прокатных

станов 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 ($t_0 > 3T_0$), рисунок 46, 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 (рисунок 46, в). При повторно-кратковременном режиме время цикла не более 10 мин (в противном случае двигатель считается работающим в продолжительном режиме по нагреву).

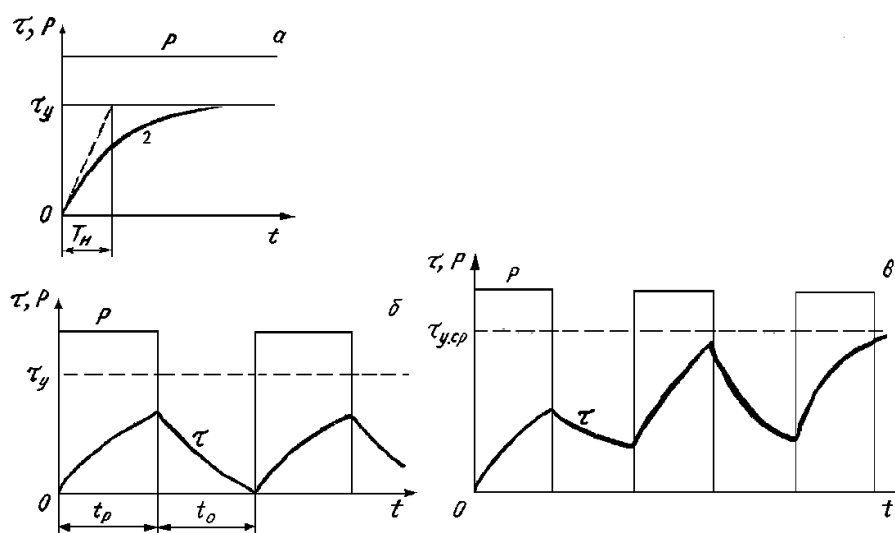


Рисунок 46 - Графики номинальных режимов электроприводов

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

$$ПВ = t_p / (t_p + t_0) 100 \% = (t_p / t_{ц}) 100 \% . \quad (65)$$

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 станов и т.п.

6 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 $M(t) = M_c = \text{const}$ и $P(t) = P_c = \text{const}$.

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

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

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

Нагрузочная диаграмма лифта строится в виде графика (рисунок 47), состоящего из семи участков. Первым строится участок 4-го графика, на котором $d\omega/dt = \text{const}$. Затем можно построить участки 2 и 6, на которых постоянными являются ускорение и замедление, а скорость увеличивается и уменьшается по линейному закону. Участки 1, 3, 5, 7 характеризуются линейным изменением ускорения (замедления), когда вторая производная от скорости по времени (рывок) остается постоянной, обусловленной нормами, а скорость изменяется по параболическому закону.

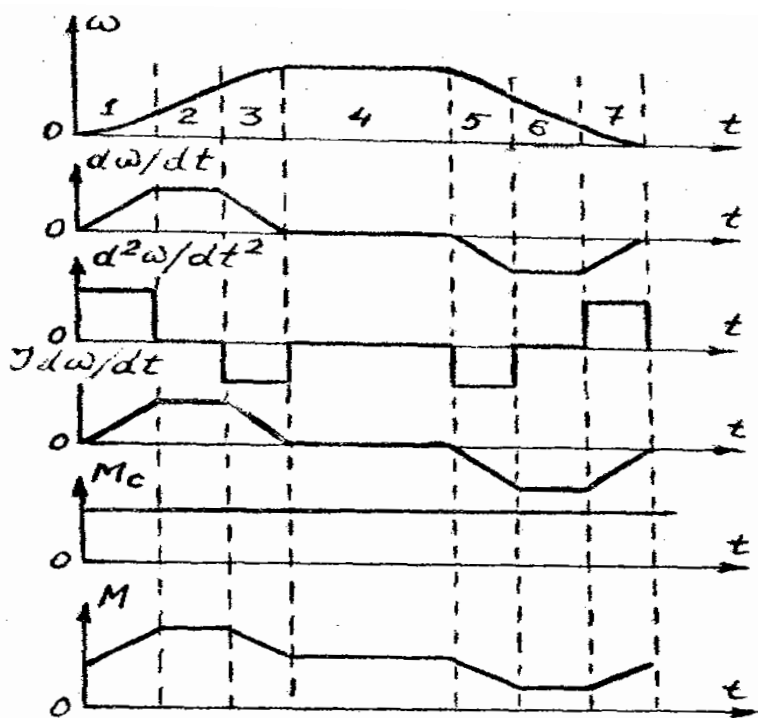


Рисунок 47 - К построению нагрузочной диаграммы ЭП пассажирского лифта

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

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

$$M(t) = M_c + J d\omega/dt. \quad (65)$$

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 (рисунок 48), электродвигатель сначала *выбирают по наибольшей мощности* этого графика с учетом его перегрузки, а затем выбранный электродвигатель *проверяют по нагреву*. Примерами электропривода с переменной нагрузкой на валу электродвигателя являются электроприводы многооперационных станков, кулачковых автоматов и др. Форма нагрузочного графика зависит от обрабатываемой детали, мощности и продолжительности отдельных переходов цикла обработки детали. При этом электродвигатель вращается непрерывно почти с постоянной скоростью, хоть его механическая характеристика имеет большую жесткость.

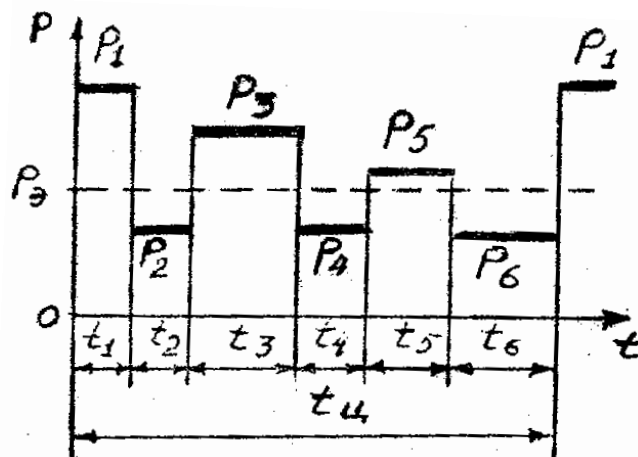


Рисунок 48 - Нагрузочный график при переменной нагрузке

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:

$$Q_3 \cdot t_{ц} = \sum(Q_i \cdot t_i) \quad \text{или} \quad \Delta P_3 \cdot t_{ц} = \sum(\Delta P_i \cdot t_i), \quad (66)$$

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:

$$\Delta P_3 = \sum(\Delta P_i \cdot t_i) / t_{ц}. \quad (67)$$

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:

$$\Delta P_i = P_i / \eta_i - P_i, \quad (68)$$

где η_i – КПД электродвигателя при работе с мощностью P_i .

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

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

$$\eta_i \approx \eta_n \sqrt[3]{P_i/P_n}. \quad (69)$$

2. Вычисляют ΔP_3 по формуле (67) и проверяют выполнение условия $\Delta P_3 \leq \Delta P_n$.

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

Метод эквивалентного тока. Если в формуле (67) потери мощности разделить на *постоянные* и *переменные*, пропорциональные квадрату тока нагрузки I^2 , получим

$$\Delta P_{\text{пост}} + b \cdot I_3^2 = \sum((\Delta P_{\text{пост}} + b \cdot I_i^2) \cdot t_i) / t_{\text{ц}}, \quad (70)$$

где b – величина, постоянная для конкретного двигателя.

Так как $\Delta P_{\text{пост}} \cdot t_{\text{ц}} = \Delta P_{\text{пост}} \cdot \sum t_i$, то после преобразований и решения (70) относительно I_3 получим

$$I_3 = \sqrt{\sum(I_i^2 \cdot t_i) / t_{\text{ц}}}. \quad (71)$$

Эта формула соответствует нагрузочному графику (см. рисунок 48) с прямоугольными участками. Если нагрузочный график $I = f(t)$ содержит треугольные и трапециевидальные участки (рисунок 49), в формулу (71) вместо I_1 и I_5 следует подставлять

$$I_{13} = I_1 / \sqrt{3}; \quad I_{53} = \sqrt{(I_4^2 + I_4 \cdot I_5 + I_5^2) / 3}. \quad (72)$$

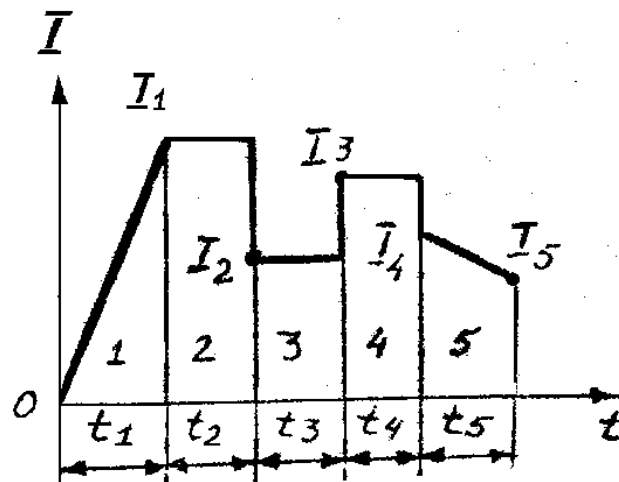


Рисунок 49 - Нагрузочный график $I = f(t)$

Метод эквивалентного тока основан на использовании формулы (71) при проверке электродвигателя по нагреву и состоит в следующем:

1. Рассчитывают I_3 по (71), 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

$$M = \sqrt{\sum (M_i^2 \cdot t_i) / t_{ц}}, \quad (73)$$

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,

$$P_3 = \sqrt{\sum (P_i^2 \cdot t_i) / t_{ц}}. \quad (74)$$

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.

6.1 Расчет номинальной мощности электродвигателя при длительном режиме работы

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

Примеры таких формул:

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

$$P = F \cdot V / (1000 \cdot 60 \cdot \eta_{\text{пер}}). \quad (75)$$

2. Для электропривода насоса

$$P = Q \cdot H \cdot \gamma \cdot 10^{-3} / (\eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{пер}}), \text{ кВт}, \quad (76)$$

где Q – производительность, м³/с;

H – высота напора, м;

γ – плотность жидкости, Н/м³;

$\eta_{\text{нас}}$ – КПД насоса.

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

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

Мощность по перегрузке определяется как

$$P_1 = P_{\text{max}} / \lambda, \quad (77)$$

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 $P_n \geq P_1$.

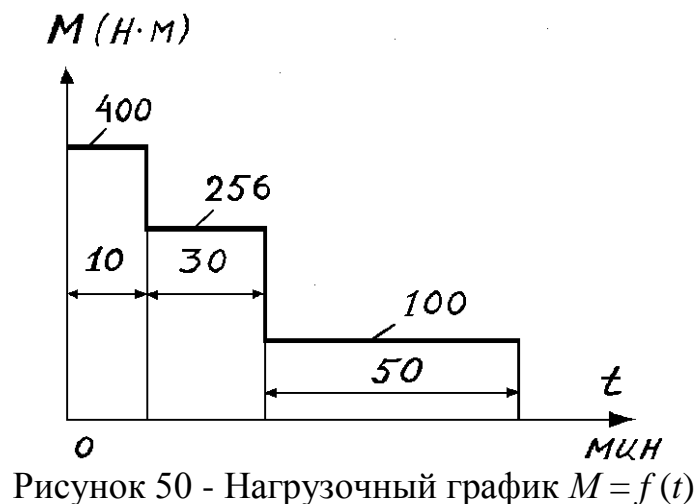
Если это условие перегрузки не соблюдается, из каталога выбирают следующий по шкале мощностей электродвигатель.

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. Выбрать электродвигатель для механизма, работающего по нагрузочному графику, представленному на рисунке 50. Угловая скорость вращения вала $\omega = 146$ рад/с ($n = 1460$ об/мин).



Решение

Эквивалентный момент (из графика)

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

Расчетная мощность электродвигателя

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

Принимаем по каталогу АД типа А02 – 81 – 4 с $P_n = 40$ кВт, $n = 1460$ об/мин, $\lambda_k = 2$, $\lambda_n = M_n / M_1 = 1,1$.

Номинальный момент АД

$$M_H = P_H / \omega_H = (40/146) \cdot 10^3 = 274 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

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

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

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

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

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

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

Проверим данный электродвигатель по пусковому моменту:

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

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

6.2 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_H при нормативной (стандартной) продолжительности включения $PВ_H = 15, 25, 40, 60 \%$.

Если при повторно-кратковременном режиме расчетная мощность P_3 и фактическая продолжительность включения $PВ_ф$ 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 $PВ_ф$ заметно отличается от $PВ_H$, *проверка двигателя по нагреву необходима* и проводится следующим образом:

1) по заданной нагрузочной диаграмме рассчитывают $PВ_ф$ и эквивалентную мощность P_3 (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

$$P_{15}^2 \cdot ПВ_{15} \approx P_{25}^2 \cdot ПВ_{25} \approx P_{40}^2 \cdot ПВ_{40} \approx P_{60}^2 \cdot ПВ_{60}. \quad (78)$$

Повторно-кратковременный режим характерен и для электропри-водов 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:

$$\Delta P_3 = \sum \Delta A_i / t_{ц}, \quad (79)$$

где ΔA_i – потери энергии на каждом значении нагрузки, включая процессы пуска и торможения.

Когда электродвигатель не работает (t_0 на рисунке 51), 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 (79) знаменатель уменьшается, а эквивалентные потери и номинальная мощность электродвигателя увеличиваются.

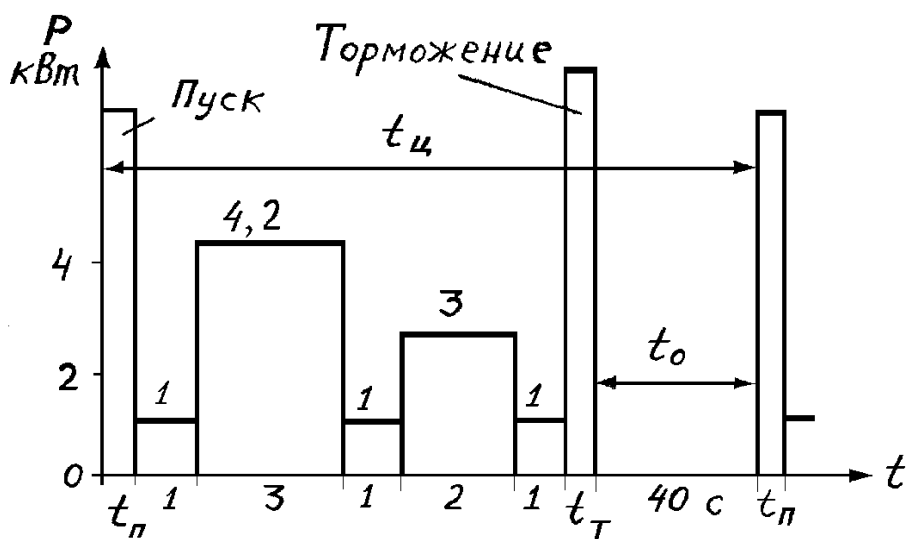


Рисунок 51 - Нагрузочный график $P = f(t)$

У АД защищенного исполнения с $n_0 = 1500$ об/мин и $P_n = 1...100$ кВт коэффициент $\beta_0 = 0,5...0,2$ (с увеличением P_n коэффициент β_0 убывает), у АД с обдувом $\beta_0 = 0,45...0,3$, у закрытых АД $\beta_0 = 0,98...0,93$.

Во время пуска и торможения средняя скорость вращения электродвигателя ниже номинальной, охлаждение двигателя ухудшается. Поэтому в формуле (79) ухудшение охлаждения учитывается путем умножения времени пуска t_n и торможения t_T на коэффициент

$$\beta_1 = (1 + \beta_0) / 2. \quad (80)$$

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:

$$P_{тр} = F_{тр} \cdot v \cdot 10^{-3} = G \cdot \mu \cdot v \cdot 10^{-3} \text{ кВт}, \quad (81)$$

где $F_{тр}$ — сила трения, Н;

v – скорость, м/с;
 G – сила тяжести (вес) перемещаемого узла, Н;
 μ – коэффициент трения движения.
 Мощность на валу электродвигателя

$$P_{\text{н}} = P_{\text{тр}} / (\lambda \cdot \eta) = P / \lambda, \quad (82)$$

где λ – коэффициент допустимой перегрузки.

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

$$\omega_{\lambda} = \omega_0 \cdot (1 - \lambda \cdot s_{\text{н}}), \quad (83)$$

где $\omega_0 = \pi n_0 / 30$ – синхронная угловая скорость АД;
 $s_{\text{н}}$ – номинальное скольжение.

Момент АД при перегрузке

$$M = P \cdot 10^3 / (\omega_0 \cdot (1 - \lambda \cdot s_{\text{н}})), \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (84)$$

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

$$M_{\text{со}} = P \cdot 10^3 \cdot \mu_0 / (\omega_0 \cdot \mu \cdot (1 - \lambda \cdot s_{\text{н}})), \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (85)$$

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.

7 Практикум

Практическое занятие № 1

Тема: Приведение моментов рабочей машины к валу электродвигателя.

Цель: Научиться определять приведенные моменты рабочей машины к валу электродвигателя.

План занятия:

1. Повторить теоретический материал.
2. Для кинематической схемы лебедки с исходными данными (таблице 7.1), согласно заданию, определить момент инерции и статический момент, мощность электродвигателя.
2. Зарисовать кинематическую схему лебедки.
3. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 7.1-Исходные данные

Пред-последняя цифра варианта	D_6 , м	η_{12}	η_{34}	η_{56}	η_6	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
0	0,5	0,92	0,9	0,95	0,9	16	64	14	56
1	1,0	0,93	0,9	0,92	0,95	10	50	8	40
2	1,5	0,95	0,92	0,9	0,92	8	40	12	48
3	0,8	0,9	0,95	0,92	0,93	18	90	10	40
4	1,0	0,94	0,92	0,94	0,95	15	75	12	60
5	0,5	0,9	0,95	0,93	0,94	10	40	15	75
6	0,8	0,93	0,94	0,94	0,9	12	60	16	64
7	1,5	0,94	0,95	0,9	0,92	14	56	15	60
8	1,0	0,95	0,9	0,92	0,93	15	60	14	70
9	0,8	0,92	0,93	0,95	0,9	12	48	18	90

Продолжение таблицы 7.1

Последняя цифра варианта	$I_{дв},$ кг·м ²	$I_6,$ кг·м ²	$I_2,$ кг·м ²	$I_3,$ кг·м ²	$I_4,$ кг·м ²	$n_{дв},$ об/мин	$G,$ кН	$v,$ м/с
0	0,8	4	1,5	0,2	1,6	1450	20	0,5
1	1,0	5	1,8	0,15	2,4	980	16	1,0
2	0,75	3,8	1,0	0,3	2	2950	25	0,6
3	1,2	6	1,1	0,25	1,8	730	18	0,8
4	0,85	4,5	3	0,18	1,0	1470	12	0,5
5	0,6	3	2,6	0,22	2,5	940	32	0,85
6	1,0	5	3	0,16	2,8	2980	40	1,0
7	1,8	6	1,6	0,3	3,5	960	10	0,75
8	0,8	4	1,5	0,12	1,6	2800	30	0,65
9	0,7	3,5	1,1	0,08	2,6	1430	45	0,5

Для кинематической схемы лебедки, приведенной на рисунке 7.1, известны следующие величины:

- диаметр барабана $D_6,$ м;
- КПД каждой пары передачи $\eta_{12}, \eta_{34},$ и барабана η_6 ;
- числа зубьев колес Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 ;
- моменты инерции двигателя $I_{дв},$ барабана $I_6,$ и зубчатых колес $I_2, I_3, I_4,$ кг·м²;
- частота вращения вала электродвигателя $n_{дв},$ об/мин;
- вес груза $G,$ Н;
- скорость подъема груза $v,$ м/с.

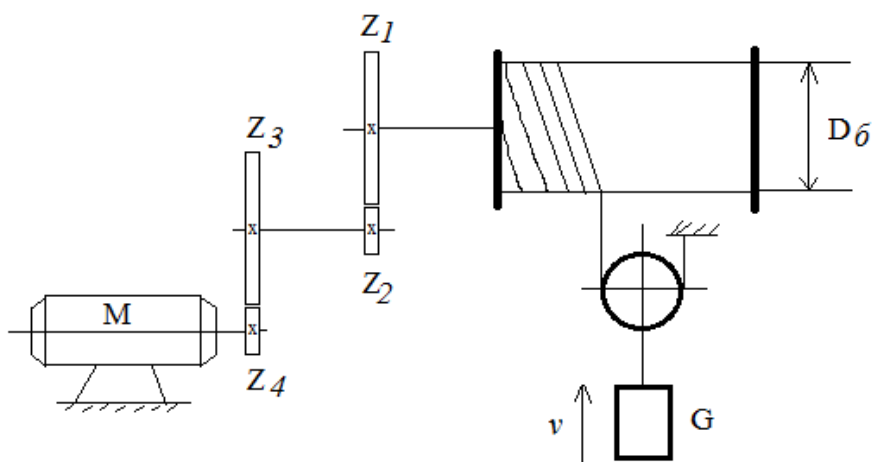


Рисунок 7.1- Кинематическая схема лебедки

Определить:

- приведенный к валу электродвигателя момент инерции лебедки $I_{пр}$;
- статический момент M_c , развиваемый двигателем при подъеме груза с постоянной скоростью;
- мощность двигателя для работы в установившемся режиме.

Порядок расчета

1. Определить момент на валу барабана (момент рабочей машины), н·м:

$$M_{PM} = \frac{G \cdot D_6}{2} \quad (7.1.1)$$

где G - вес груза, Н;

D_6 -диаметр барабана, м.

2. Определить статический момент, н·м:

$$M_c = \frac{M_{PM}}{\eta_{12} \cdot \eta_{34} \cdot \eta_6 \cdot K_{12} \cdot K_{34}} \quad (7.1.2)$$

где η_{12} , η_{34} , η_6 - КПД каждой пары передачи и барабана;

K_{12} , K_{34} – передаточное число пары колес.

Передаточное число определяется:

$$K_{12} = \frac{Z_2}{Z_1}, K_{34} = \frac{Z_4}{Z_3} \quad (7.1.3)$$

где Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , - числа зубьев колес.

3. Определить необходимую мощность на валу электродвигателя при подъеме груза с постоянной скоростью, кВт:

$$P_{дв} = \frac{M_c \cdot n_{дв}}{9550} \quad (7.1.4)$$

где $n_{дв}$ - частота вращения вала электродвигателя, об/мин.

4. Определить приведенный момент инерции вращающихся частей к валу электродвигателя при вращательном движении, кг·м²:

$$I_{пр} = I_{дв} + I_4 + \frac{I_3 + I_2}{K_{34}^2} + \frac{I_6}{K_{34}^2 \cdot K_{12}^2} \quad (7.1.5)$$

где $I_{дв}$ - моменты инерции двигателя, кг·м²;

I_2 , I_3 , I_4 -моменты инерции зубчатых колес, кг·м²;

K_{12} , K_{34} – передаточное число пары колес.

5. Определить момент инерции груза G , движущийся поступательно, к валу электродвигателя при вращательном движении, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$:

$$I_{\text{ПРпост}} = \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{\omega_{\text{дв}}^2} \quad (7.1.6)$$

где G – вес груза, Н;

g – ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м/с}^2$;

$\omega_{\text{дв}}$ – угловая скорость вращения двигателя, рад/сек.

Угловая скорость вращения двигателя, рад/сек:

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{дв}}}{60} \quad (7.1.7)$$

6. Определить общий момент инерции, приведенный к валу электродвигателя, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$:

$$I_{\text{ПР}} = I_{\text{ПРвр}} + I_{\text{ПРпост}} \quad (7.1.8)$$

Контрольные вопросы

1. Какой момент называется статическим? Чем отличается активный статический момент от реактивного?
2. Для какой цели статический момент рабочей машины приводят к валу электродвигателя?
3. Запишите основное уравнение вращательного движения электропривода. Какой физический смысл составляющих этого уравнения?
4. Приведите определение момента инерции тела. В каких единицах измеряется эта величина в системе СИ?
5. Напишите формулу для приведения статического момента к валу электродвигателя.
6. Напишите формулы для приведения момента инерции при вращательном и поступательном движении масс.
7. Как определяется общий приведенный момент инерции масс, движущихся поступательно и вращательно?

Практическое занятие № 2

Тема: Расчет активных сопротивлений в цепи статора, для пуска при пониженном напряжении.

Цель: Изучить методику расчета добавочных сопротивлений для асинхронных двигателей.

План занятия:

1. Повторить теоретический материал.
2. Определить пусковые сопротивления электродвигателя согласно варианту (таблица 7.2).
3. Начертить схему двигателя с пусковыми сопротивлениями в цепи статора.
4. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 7.2 - Исходные данные

Пред-последняя цифра варианта	P_n , кВт	n_n , об/мин	КПД, η_n	Последняя цифра варианта	U_n , В	$\cos\varphi_n$	I_{Π}/I_n	M_{Π}/M_n
0	11	2900	0,88	0	380	0,9	7,5	1,6
1	15	2930	0,88	1	220	0,91	7,5	1,4
2	30	2920	0,9	2	380	0,92	7,5	1,4
3	37	2940	0,9	3	220	0,89	7,5	1,4
4	5,5	1450	0,86	4	380	0,85	7,0	2,0
5	7,5	1450	0,88	5	220	0,86	7,5	2,0
6	18,5	1460	0,9	6	380	0,88	7,0	1,4
7	22	1470	0,9	7	220	0,9	7,0	1,4
8	3	950	0,81	8	380	0,76	6,0	2,0
9	4	950	0,82	9	220	0,81	6,0	2,0

Для асинхронного двигателя приведены данные:

- номинальная мощность двигателя P_n , кВт;
- номинальное линейное напряжение U_n , В;
- номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_n$;
- номинальный КПД η_n ;
- номинальная частота вращения электродвигателя n_n , об/мин;
- кратность пускового тока к номинальному $\lambda = I_{\Pi} / I_n$;
- кратность пускового момента к номинальному M_{Π} / M_n ;
- кратность пускового тока к номинальному требуется $\alpha = I'_{\Pi} / I_n = 0,5$.

Рассчитать:

- пусковые резисторы в цепи статора для снижения пусковых токов в 2 раза.

Порядок расчета

1. Определить номинальное скольжение:

$$S_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} \quad (7.2.1)$$

где n_1 - частота вращения магнитного поля статора, об/мин;

n_H – номинальная частота вращения электродвигателя, об/мин.

2. Определить коэффициент мощности двигателя при пуске:

$$\cos\varphi_{II} = \cos\varphi_H \cdot \left[\frac{M_{II}}{M_H} \cdot \frac{\eta_H}{(1 - S_H) \cdot \frac{I_n}{I_{ном}}} + \frac{I_n}{I_{ном}} \cdot \gamma(1 - \eta_H) \right] \quad (7.2.2)$$

где $\cos\varphi_H$ - коэффициент мощности;

$\lambda = M_{II} / M_H$ - кратность пускового момента к номинальному;

η_H – номинальный КПД;

I_{II} / I_H - кратность пускового тока к номинальному;

$\gamma = 0,35$ – отношение потерь в меди к номинальным.

3. Определить номинальный ток, А:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos\varphi_H} \quad (7.2.3)$$

где P_H - номинальная мощность двигателя, Вт;

U_H – номинальное линейное напряжение, В;

$\cos\varphi_H$ - коэффициент мощности номинальный.

4. Определить пусковой ток, А:

$$I_{II} = \frac{I_{II}}{I_H} \cdot I_H \quad (7.2.4)$$

где I_{II} / I_H - кратность пускового тока к номинальному.

5. Определить полное сопротивление фазы двигателя при пуске, Ом:

$$Z_{II} = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_{II}} \quad (7.2.5)$$

где I_{Π} - пусковой ток, А;

U_{H} –номинальное линейное напряжение, В.

6. Определить активное и реактивное сопротивления фаз двигателя при пуске, Ом:

$$\begin{aligned} r_{\Pi} &= Z_{\Pi} \cdot \cos \varphi_{\Pi}, \\ x_{\Pi} &= Z_{\Pi} \cdot \sin \varphi_{\Pi}, \end{aligned} \quad (7.2.6)$$

7. Определить пусковое сопротивление в цепи статора, Ом:

$$r_{\text{д}} = \sqrt{\left(\frac{Z_{\Pi}}{\alpha}\right)^2 - x_{\Pi}^2 - r_{\Pi}} \quad (7.2.7)$$

где $\alpha = I'_{\Pi} / I_{\text{H}} = 0,5$ - кратность пускового тока к номинальному требуема.

Если, необходимо определить реактивное пусковое сопротивление, используют выражение, Ом:

$$x_{\text{д}} = \sqrt{\left(\frac{Z_{\Pi}}{\alpha}\right)^2 - r_{\Pi}^2 - x_{\Pi}} \quad (7.2.8)$$

Контрольные вопросы

1. Какие способы пуска асинхронных двигателей существуют?
2. Для чего предназначены пусковые сопротивления, и какие сопротивления можно использовать?
3. Как включаются пусковые сопротивления и какова продолжительность их работы?
4. Поясните методику расчета пусковых резисторов?
5. Какой параметр измениться в расчетах, если необходимо определить сопротивления при снижении пускового тока в 1,5 раза?

Практическое занятие № 3

Тема: Определение мощности электродвигателей, работающих в различных режимах.

Цель: Научиться определять режимы работы и мощность электродвигателей.

План занятия:

1. Повторить теоретический материал.
2. Согласно заданию (таблица 7.3), начертить в масштабе нагрузочную диаграмму асинхронного электродвигателя.
3. Определить режим работы двигателя, необходимую мощность электродвигателя и выбрать двигатель серии АИР. Проверить двигатель по перегрузочной способности при максимальном моменте.
4. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 7.3 - Исходные данные

Пред- последняя цифра варианта	$M_1,$ Н·м	$M_2,$ Н·м	$M_3,$ Н·м	$M_4,$ Н·м	$n_{ном},$ об/мин
0	10	40	60	30	1450
1	100	400	250	200	980
2	500	1100	750	300	2950
3	30	150	280	100	730
4	400	1000	1500	600	1470
5	150	450	600	1000	940
6	50	200	150	100	2980
7	250	750	1500	1200	960
8	200	800	1200	800	2800
9	20	80	200	150	1430
Последняя цифра варианта	$t_1,$ сек	$t_2,$ сек	$t_3,$ сек	$t_4,$ сек	$t_0,$ сек
0	5	10	20	30	60
1	10	25	40	20	0
2	8	26	32	8	45
3	8	20	30	10	60
4	15	50	25	30	0
5	5	25	40	20	90
6	15	10	15	30	50
7	10	40	60	20	0
8	15	25	30	10	50
9	20	60	40	20	0

Для асинхронного двигателя приведены данные:

- момент на валу двигателя M_1, M_2, M_3, M_4 , соответствующий интервалу времени t_1, t_2, t_3, t_4 , н·м;
- периоды работы t_1, t_2, t_3, t_4 , сек ;
- период отключения t_0 , сек;
- частота вращения электродвигателя $n_{ном}$, об/мин.

Определить:

- режим работы двигателя;
- необходимую мощность электродвигателя.

Выбрать двигатель серии АИР.

Проверить двигатель по перегрузочной способности при максимальном моменте.

Порядок расчета

1. Определить действительную продолжительность включений с учетом пауз, %:

$$ПВ_{д} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_0} \cdot 100 \quad (7.3.1)$$

где t_1, t_2, t_3, t_4 - периоды работы, сек;

t_0 - период отключения, сек.

Если $ПВ_{д} > 60$ %, то режим считается продолжительным;

если $ПВ_{д} < 10$ %, - кратковременным;

если $10 \% < ПВ_{д} < 60$ %, - повторно-кратковременным.

2. Для продолжительного режима мощность двигателя определяют по выражению, кВт:

$$P_{д} = \frac{1,1 \cdot P_{э}}{\eta_{пер.уст}} \quad (7.3.2)$$

где $P_{э}$ – эквивалентная мощность, кВт;

$\eta_{пер.уст}$ - КПД передаточного устройства.

3. Для повторно-кратковременного режима мощность двигателя определяют из условия, кВт:

а) если $ПВ_{д} = ПВ_{н}$, то $P_{д} > P_{э}$;

б) если $ПВ_{д} \neq ПВ_{н}$, то $P_{д} = P_{э} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{д}}{ПВ_{н}}}$ (7.3.3)

где $ПВ_{н}$ – продолжительность включения номинальная, $ПВ_{н}=15; 25; 40; 60$.

4. Для кратковременного режима мощность двигателя определяют из условия, кВт:

$$P_D > P_{\text{ном}} \quad (7.3.4)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт.

Номинальная мощность двигателя определяется по условию, кВт:

$$P_{\text{ном}} = \frac{P_K}{p_M} \quad (7.3.5)$$

где P_K - мощность электродвигателя в кратковременном режиме, кВт;
 p_M – коэффициент механической перегрузки.

Зная отношение $\frac{t_K}{T}$, можно определить по графику коэффициенты тепловой p_T и механической p_M перегрузки (рисунок 7.3.1), где t_K – время работы двигателя в кратковременном режиме (сек), T – постоянная времени нагрева двигателя, сек.

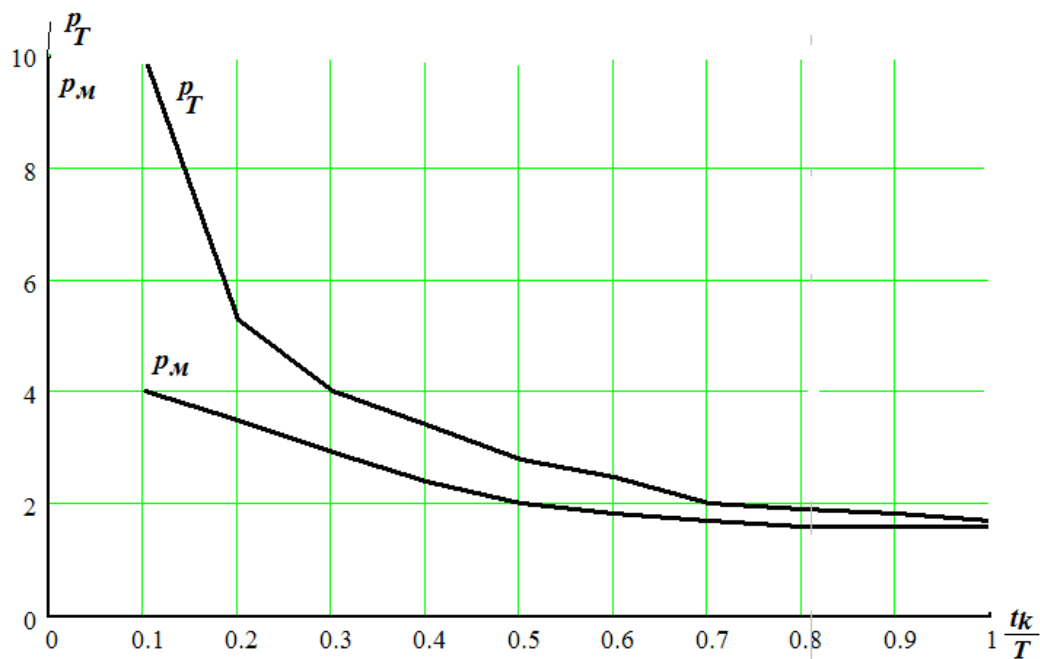


Рисунок 7.3.1 – Графики коэффициентов тепловой p_T и механической p_M перегрузок

Коэффициент тепловой перегрузки связан с коэффициентом механической перегрузки выражением:

$$p_T = p_M^2 \quad (7.3.6)$$

5. На основании диаграммы, используя метод эквивалентного момента, определить эквивалентный момент, н·м:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3 + M_4^2 \cdot t_4 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + \dots + t_n}} \quad (7.3.7)$$

где M_1, M_2, M_3, M_4, M_n – моменты нагрузки, н·м;

t_1, t_2, t_3, t_4, t_n - периоды работы, сек.

Если в рассматриваемый цикл работы входят пауза, пуск и торможение, то учитывая условия ухудшенного охлаждения за время паузы t_0 вводят коэффициент - 0,5, а за время пуска и торможения - коэффициент 0,75.

6. Определить эквивалентную мощность, кВт:

$$P_{\text{э}} = \frac{M_{\text{э}} \cdot n_{\text{ном}}}{9550} \quad (7.3.8)$$

где $n_{\text{ном}}$ - частота вращения электродвигателя, об/мин.

7. Выбрать мощность двигателя по условию

$$P_{\text{н}} > P_{\text{д}} \quad (7.3.9)$$

Контрольные вопросы

1. Какие режимы работы электродвигателей существуют?
2. Можно ли двигатель, предназначенный для продолжительного режима использовать для других режимов работы?
3. Как выбрать двигатель по мощности при работе в продолжительном режиме работы с неизменной нагрузкой?
4. В каком случае нельзя использовать метод эквивалентного момента для определения мощности?
5. В чем заключаются метод выбора двигателя по эквивалентному току, моменту, мощности.
6. Чем характерен кратковременный режим работы?
7. Чем характерен повторно-кратковременный режим работы?
8. Какие стандартные величины продолжительности включений существуют?
9. Как учитывается ухудшение условий охлаждения при пусках, торможении и остановках двигателя при повторно-кратковременном режиме?

Практическое занятие № 4

Тема: Расчет пускового реостата для асинхронного двигателя с фазным ротором.

Цель: Научиться рассчитывать пусковой реостат для асинхронных электродвигателей с фазным ротором.

План занятия:

1. Повторить теоретический материал.
2. Согласно заданию (таблица 7.4), рассчитать и начертить в масштабе пусковую диаграмму асинхронного двигателя.
3. Определить сопротивления реостата графоаналитическим и аналитическим методами. Сравнить результаты расчетов.
4. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 7.4 - Исходные данные

Пред-последняя цифра варианта	$P_{\text{ном}}$, кВт	$I_{2\text{ном}}$, А	Последняя цифра варианта	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$M_M/M_{\text{ном}}$
0	7	28	0	1450	1,9
1	10	32	1	980	2,1
2	14	63	2	2950	2
3	18	65	3	730	1,8
4	28	56	4	1470	2,2
5	32	52	5	940	1,95
6	40	74	6	2980	2,5
7	45	68	7	960	1,9
8	2,8	22,5	8	2800	2,25
9	5,5	18	9	1430	1,85

Для асинхронного двигателя приведены данные:

- номинальная мощность двигателя $P_{НОМ}$, кВт;
- номинальный ток ротора $I_{2НОМ}$, А;
- частота вращения электродвигателя $n_{НОМ}$, об/мин;
- перегрузочная способность двигателя $M_M/M_{НОМ}$.

Рассчитать:

- сопротивления реостата графоаналитическим и аналитическим методами.

Пуск двигателя производится при моменте статического сопротивления, создаваемого рабочей машиной, равном номинальному моменту двигателя, т.е. $M_C = M_{НОМ}$.

Порядок расчета

1. Определить номинальный момент асинхронного двигателя, н·м:

$$M_H = 9550 \frac{P_{НОМ}}{n_{НОМ}} \quad (7.4.1)$$

где $P_{НОМ}$ – номинальная мощность двигателя, кВт;

$n_{НОМ}$ – частота вращения электродвигателя, об/мин.

2. Определить максимальный момент асинхронного двигателя, н·м:

$$M_M = \frac{M_M}{M_H} \cdot M_H \quad (7.4.2)$$

где $M_M/M_{НОМ}$ – перегрузочная способность двигателя.

Момент максимальный должен соответствовать условию $M_M = (180 \dots 250\%) M_H$.

4. Определить номинальное скольжение, %:

$$S_H = \frac{n_1 - n_{НОМ}}{n_1} \cdot 100 \quad (7.4.3)$$

где $n_{НОМ}$ – частота вращения электродвигателя, об/мин;

n_1 – синхронная частота электродвигателя, об/мин.

5. Определить соотношение моментов максимального и переключающего:

$$\frac{M_M}{M_2} = \sqrt[m+1]{\frac{10000}{S_H(\%) \cdot M_2(\%)}} \quad (7.4.4)$$

где M_2 – переключающий момент, %;

S_H – скольжение номинальное, %;

m – число ступеней реостата.

11. Определить номинальное сопротивление обмотки ротора R_{2H} , Ом:

$$R_{2H} = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot (I_{2НОМ})^2} \quad (7.4.6)$$

где $P_{НОМ}$ – номинальная мощность двигателя, Вт;

$I_{2НОМ}$ – номинальный ток ротора, А.

12. Определить активное сопротивление обмотки ротора R_p , Ом:

$$R_p = \frac{S_H \cdot R_{2H}}{100} \quad (7.4.7)$$

где S_H – номинальное скольжение, %;

R_{2H} – номинальное сопротивление обмотки ротора, Ом.

13. Определить масштаб сопротивлений, Ом/мм:

$$m_R = \frac{R_p}{|a_1K|} \quad (7.4.8)$$

где $|a_1K|$ – длина отрезка a_1K на пусковой диаграмме, мм.

14. На основании пусковой диаграммы, определить сопротивления секций реостата, Ом:

$$\begin{aligned} R_1 &= |\partial z| m_R; \\ R_2 &= |zв| m_R; \\ R_3 &= |вб| m_R. \end{aligned} \quad (7.4.9)$$

где $|\partial z|$ – длина отрезка ∂z на пусковой диаграмме, мм;

$|zв|$ – длина отрезка $zв$ на пусковой диаграмме, мм;

$|вб|$ – длина отрезка $вб$ на пусковой диаграмме, мм;

15. При аналитическом расчете сопротивления секций на фазу определяются (для трех ступеней), Ом:

-сопротивление третьей ступени

$$R_3 = R_p \left(\frac{M_M}{M_2} - 1 \right) \quad (7.4.10)$$

-сопротивление второй ступени

$$R_2 = R_3 \cdot \frac{M_M}{M_2} \quad (7.4.11)$$

-сопротивление первой ступени

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{M_M}{M_2} \quad (7.4.12)$$

где M_M/M_2 –отношение момента максимального к переключающему;

R_P –активное сопротивление обмотки ротора, Ом;

R_3, R_2, R_1 –сопротивления ступеней реостата, Ом.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение реостата?
2. Какие методы расчета сопротивлений реостатов существуют?
3. Какие материалы используют для изготовления сопротивлений реостатов?
4. Какие требования предъявляются к сопротивлениям реостатов?
5. Сколько ступеней реостата может быть?
6. Из какого условия выбирают момент переключения?

Практическое занятие № 5

Тема: Расчет пускового реостата для двигателя постоянного тока.

Цель: Научиться рассчитывать пусковой реостат для двигателя постоянного тока.

План занятия:

1. Повторить теоретический материал.
2. Согласно заданию (таблица 7.5), рассчитать ступени пускового реостата для двигателя постоянного тока.
3. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 7.5-Исходные данные

Вариант	P_H , кВт	U_H , В	I_H , А	n_H , об/мин	$R_{Я}$, Ом
1	7,5	110	68	1500	1,613
2	15	220	68	1500	3,227
3	2,5	340	7	2200	46,240
4	30	110	273	1500	0,403
5	55	220	250	1500	0,880
6	7,5	110	68	500	1,613
7	15	220	68	750	3,227
8	2,5	220	11	2200	19,360
9	55	340	162	1500	2,102
10	75	440	170	3000	2,581

Продолжение таблицы 7.5

11	45	440	102	750	4,302
12	15	340	44	750	7,707
13	2,5	110	23	2200	4,840
14	30	220	136	1500	1,613
15	55	440	125	1000	3,520
16	75	220	341	1000	0,645
17	90	440	205	1500	2,151
18	2,5	110	23	1000	4,840
19	30	340	88	1500	3,853
20	55	440	125	1500	3,520
21	75	340	221	1000	1,541
22	110	220	500	1500	0,440
23	118	440	268	1000	1,641
24	200	220	909	1500	0,242
25	200	440	455	1500	0,968
26	2,5	220	11	1000	19,360
27	55	220	250	600	0,880
28	75	440	170	1000	2,581
29	110	340	324	1500	1,051
30	132	220	600	1000	0,367

Для двигателя постоянного тока приведены данные:

- номинальная мощность двигателя P_H , кВт;
- номинальное напряжение U_H , В;
- номинальный ток якоря I_H , А;
- частота вращения электродвигателя n_H , об/мин;
- сопротивление якоря $R_{я}$, Ом .

Рассчитать:

- сопротивления ступеней пускового реостата.

Порядок расчета

1. Принять число переключаемых ступеней m исходя из условия:

- для двигателей до 10 кВт принимают 1-2 ступени пускового реостата;
- для двигателей до 50 кВт принимают 2-3 ступени пускового реостата;
- для двигателей свыше 50 кВт принимают 3-4 ступени пускового реостата.

2. Определить отношение токов пускового и номинального K :

$$K = \sqrt[m+1]{\frac{U_H}{R_{я} \cdot I_H}} \quad (7.5.1)$$

где U_H – номинальное напряжение, В;

I_H – номинальный ток якоря, А;

$R_{я}$ – сопротивление якоря, Ом .

m – число ступеней реостата.

3. Определить ток переключений I_1 по выражению, А:

$$I_1 = (120\%) \cdot I_H \cdot K \quad (7.5.2)$$

где I_H – номинальный ток якоря, А;

K – отношение пускового и номинального токов, А.

4. Определить сопротивления секций пускового реостата R_1, R_2, R_3 , Ом:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{U_H}{I_1} \cdot \frac{K-1}{K}; \\ R_2 &= \frac{U_H}{I_1} \cdot \frac{K-1}{K^2}; \\ R_3 &= \frac{U_H}{I_1} \cdot \frac{K-1}{K^3}. \end{aligned} \quad (7.5.3)$$

где U_H – номинальное напряжение, В;

I_1 – ток переключений, А;

K – отношение пускового и номинального токов, А.

5. Определить сопротивление пускового реостата $R_{п}$, Ом:

$$R_{п} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (7.5.4)$$

где R_1, R_2, R_3 – сопротивления секций пускового реостата, Ом.

Резисторы (сопротивления), применяемые в электроприводе, изготавливаются из сплавов с высоким удельным сопротивлением – нихрома, манганина, фехраля или просто стальной полосы, или проволоки и литого чугуна. Основное требование к ним – должны выдерживать длительную высокую температуру нагрева (200...300⁰С).

Промышленность выпускают ящики сопротивлений типа НФ-1 с фехралевым активным элементом с сопротивлением 0,1...7,1 Ом, рамочные элементы с константовой проволокой или лентой с сопротивлением 0,2...2 Ом, ящики сопротивлений типа ЯС с чугунными элементами 0,1...8,0 Ом и др.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение реостата?
2. Какие методы расчета сопротивлений реостатов существуют?
3. Какие материалы используют для изготовления сопротивлений реостатов?
4. Какие требования предъявляются к сопротивлениям реостатов?
5. Сколько ступеней реостата может быть?
6. Из какого условия выбирают момент переключения?
7. Пояснить состав и характеристики манганина.
8. Пояснить состав и характеристики фехраля.
9. Пояснить состав и характеристики константана.

Практическое занятие № 6

Тема: Расчет и выбор конденсаторов при конденсаторном торможении асинхронных двигателей.

Цель: Научиться рассчитывать конденсаторы при конденсаторном торможении асинхронных двигателей.

План занятия:

1. Повторить теоретический материал.
2. Согласно заданию (таблица 7.6), рассчитать емкость и выбрать конденсатор для торможения.
3. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 7.6-Исходные данные

Пред-последняя цифра варианта	P_H , кВт	U_H , В	Последняя цифра варианта	Схема соединения	I_0 , %
0	3	220	0	Y	55
1	5,5	380	1	Δ	60
2	7,5	660	2	1	50
3	11	220	3	Y	45
4	15	380	4	Δ	65
5	18,5	660	5	1	55
6	22	220	6	Y	60
7	30	380	7	Δ	50
8	37	660	8	1	45
9	45	220	9	Y	65

Для асинхронного двигателя приведены данные:

- номинальная мощность двигателя P_H , кВт;
- номинальное линейное напряжение U_{HL} , В;
- ток холостого хода $I_{0\%}$, %.

Рассчитать:

- емкость и выбрать конденсатор для торможения двигателя.

Порядок расчета

1. Определить фазное напряжение U_Φ , в зависимости от схемы соединения обмоток статора.
2. Определить номинальный ток двигателя I_H , А:

$$I_H = \frac{P_H}{3 \cdot U_\Phi} \quad (7.6.1)$$

где P_H – номинальная мощность двигателя, Вт;
 U_Φ – номинальное фазное напряжение, В;

3. Определить ток холостого хода I_0 , А:

$$I_0 = I_H \cdot I_{0\%} \quad (7.6.2)$$

где I_H – номинальный ток, А;
 $I_{0\%}$ – ток холостого хода, %.

4. Определить емкость конденсатора C_p , мкФ:

$$C_p = 1840 \cdot \frac{I_0}{U_H} \quad (7.6.3)$$

где U_H – номинальное напряжение, В;
 I_0 – ток холостого хода, А.

5. Для эффективности торможения при трехфазном включении конденсатора принять емкость C_H , мкФ:

$$C_H = 4 \cdot C_p \quad (7.6.4)$$

где C_p – рабочая емкость конденсатора, мкФ.

6. Для эффективности торможения при однофазном включении конденсатора принять емкость C_{H2} , мкФ:

$$C_{H2} = 2,1 \cdot C_H \quad (7.6.5)$$

где C_H – емкость конденсатора при трехфазном включении, мкФ.

Контрольные вопросы

1. Какие виды торможения существуют?
2. Какие виды торможения двигателей постоянного тока существуют?
3. Какие виды торможения асинхронных двигателей существуют?
4. Как осуществляется конденсаторное торможение асинхронного двигателя?
5. Как осуществляется динамическое торможение для двигателя постоянного тока?
6. Как осуществляется динамическое торможение для асинхронного двигателя?
7. Как осуществляется торможение противовключением асинхронного двигателя?
8. Как осуществляется торможение противовключением двигателя постоянного тока?

Практическое занятие № 7

Тема: Изучение устройства и принципа действия аппаратуры управления.

Цель: Изучить конструкции различных типов аппаратуры управления, их маркировку, назначение.

План занятия:

1. Повторить теоретический материал.
2. Изучить устройство, принцип действия и назначение аппаратуры управления.
3. Ответить на контрольные вопросы.

Теоретические сведения

Контакторы

Контакторы постоянного и переменного тока — наиболее распространенные аппараты в схемах автоматического управления электроприводами. Они предназначены для многократных включений и отключений электрической цепи (до 1200 срабатываний в час) и приводятся в действие при помощи электромагнита. Номинальные токи контакторов находятся в пределах от 3 до 2500 А с номинальным напряжением до 660 В.

Контакторы классифицируются *по роду тока* и *по числу полюсов*.

Собственное время срабатывания контакторов постоянного тока зависит от величины контактора и находится в пределах 0,1... 0,4 с, напряжение отпускания 10... 20% номинального.

Наиболее популярными контакторами являются контакторы переменного тока рассчитанные на номинальный ток от 100 до 1000 А, с числом главных контактов от 1 до 5. Также широко распространены трехполюсные контакторы (рисунок 7.7.1).

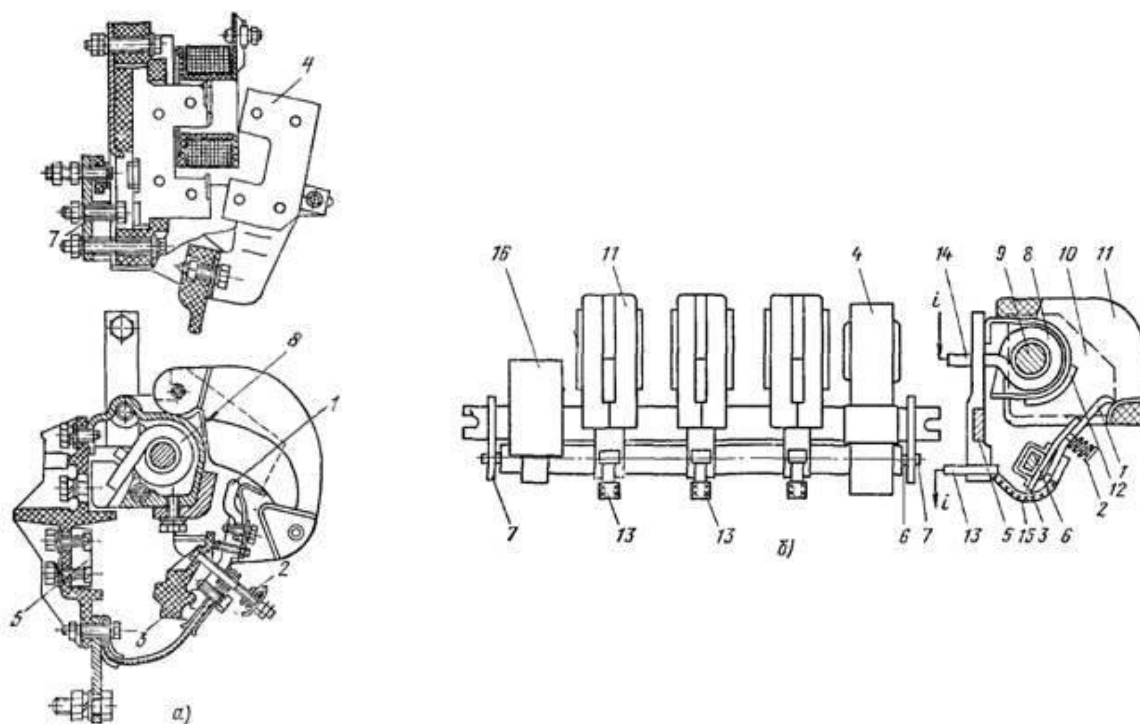
Следствием большого количества контактов, является увеличение усилия электромагнита и необходимого для включения контактора момента. Контакторы переменного тока имеют вспомогательные контакты, приводимые в действие тем же электромагнитом, который двигает и главные контакты.

Зазор, оставляемый между главными контактами, в контакторах переменного тока, меньше чем в контакторах постоянного тока. По этой причине, возникают наиболее благоприятные условия для гашения дуги, что позволяет сократить размеры, мощность и массу электромагнита.

Якорь (4) и подвижный контакт электромагнита связаны между собой посредством вала контактора (6). Контакт в контакторе переменного тока КТ-6000 плоский и без перекатывания. При помощи контактных пружин и подвижных частей, происходит отключение аппарата. Подвижные и неподвижные контакты, для удобства эксплуатации, сделаны сменяемыми. Контактная пружина (2) имеет предварительное сжатие, которое примерно равно половине конечного. На изоляционной рейке (5) закрепляются все детали контактора переменного тока. Рычаг (3) подвижного контакта, закреплен на валу (5), вращающемся на подшипниках (7) и покрытым изоляционным материалом. Катушка (8), сердечник (9), керамическая камера (11) и полюсные пластины (10) составляют в общем, систему дугогашения. Катушка (8) подключена к цепи последовательно вместе с подвижным и неподвижным контактом (12). Выводы (13) и (14) подключают к цепи главные контакты. А гибкая связь (15) и вывод (13) соединяются с подвижным контактом (13). Вращение вала (6) приводит в действие блок вспомогательных контактов (16). Благодаря тому, что все детали закреплены на рейке, появляется возможность установки контакторов переменного тока в комплексных станциях с реечной конструкцией, а также уменьшить массу и объем станции управления. Максимально допустимое число включений составляет 1200 в час. В контакторах переменного тока очень часто используется мостиковая контактная система с двумя разрывами цепи на каждый из полюсов (рисунок 7.7.6). Эта система позволяет довольно быстро гасить дуги, если отсутствует гибкая связь.

Для контакторов переменного тока характерны следующие особенности.

1. Катушка контактора питается однофазным током, из-за чего поток магнитной системы контактора периодически проходит через нуль. Это вызывает вибрацию и гудение магнитной системы. Для ослабления этих явлений на торцевой части сечения сердечника закладывается медный короткозамкнутый виток, который охватывает обычно около $\frac{1}{3}$ площади сечения сердечника. В момент перехода основного потока сердечника через нуль скорость изменения этого потока максимальна и поэтому в короткозамкнутом витке наводится максимальная э. д. с, как во вторичной обмотке трансформатора. Через виток проходит ток, который создает свой магнитный поток, замыкающийся через сердечник и якорь и препятствующий отпаданию последнего при переходе основного потока через нуль.



а) — магнитная система;

б) — контактная система

Рисунок 7.7.1. Контактор переменного тока

Контактор переменного тока имеет шихтованную магнитную систему.

Полное сопротивление, а следовательно, и ток катушки зависят от индуктивности цепи катушки, которая, в свою очередь, определяется величиной воздушного зазора в магнитной системе контактора.

При большом зазоре, то есть при отключенном контакторе, индуктивность мала, незначительно и полное сопротивление цепи катушки, а ток велик. Если якорь притянут, то зазор в магнитной системе близок к нулю, индуктивность велика, а ток в цепи катушки мал. Это приводит к тому, что начальный пусковой ток катушки в 8... 10 раз превышает ток катушки при притяннутом якоре.

Буквенные обозначения типа контакторов расшифровываются следующим образом: К — контактор, П — постоянного тока, Т — переменного тока, Д — промышленного назначения, М — морского исполнения, В — вертикальной установки. Когда после буквы Т стоит П, то это означает, что у контактора переменного тока цепи управления рассчитаны на постоянный ток, например КТПВ-1 (см. таблицу 7.7.1).

Контакторы переменного тока выпускают на токи 20... 600 А с числом полюсов до пяти. На базе конструкции контактора переменного тока изготавливают контакторы с защелкой. Эти контакторы удерживаются во включенном состоянии механической защелкой, и их положение не зависит от наличия напряжения сети.

Магнитные пускатели

Электромагнитные пускатели представляют собой комплексные устройства, в состав которых входят один или два (как правило, трехполюсные) контакторы переменного тока. В пускателе могут быть применены тепловые реле.

Номинальные токи пускателей от 2,5 до 150 А. Они обеспечивают управление двигателями мощностью до 75 кВт при напряжении 380 В. Наиболее распространены пускатели типов ПМЕ и ПАЕ.

Пускатели ПАЕ предназначены для двигателей большой мощности. Пускатели серии ПМЕ имеют прямоходовой электромагнит и рассчитаны на токи до 25 А.

Таблица 7.7.1-Условные обозначения контакторов КТ 6600 и КТП 6600

КТП XXX	Буквенное обозначение вида контактора. КТ – контактор переменного тока с управлением переменным током. КТП – контактор переменного тока с управлением постоянным током.
67 XX	Условный номер серии 67
3 X	Цифра. Условное обозначение величины номинального тока: 1 – 100 А 2 – 160 А 3 – 250 А
2 X	Цифра. Число полюсов: 2 или 3.
С X	Буква. Дополнительное условное обозначение серии: С – контакторы для работы только в продолжительном режиме.
- -	Разделительный знак.
У ХЛЗ XXX	Обозначение климатического исполнения и категории размещения по ГОСТ 15150-69; УЗ, ТЗ, ХЛЗ.

В обозначении серии ПМЕ, первая цифра после дефиса указывает величину (габарит) пускателя (0 — нулевая, 1 — первая, 2 — вторая); вторая цифра после дефиса — исполнение для нулевой величины (1, 4, 7 — открытое исполнение с четырьмя замыкающими контактами; 2, 5, 8 — защищенное с четырьмя замыкающими и двумя размыкающими контактами; 3, 6, 9 — пылеводонепроницаемые с четырьмя замыкающими контактами), для других величин 1 — открытое, 2 — защищенное и 3 — пылеводонепроницаемое исполнение; третья цифра после дефиса означает характер вращения электродвигателя, наличие тепловых реле и кнопок управления (1 — одностороннее вращение без реле, 2 — одностороннее вращение с тепловыми

реле, 3 — двухстороннее вращение (реверсивное) без реле, 4 — двухстороннее вращение и реле, 5 — одностороннее вращение без реле со встроенным в оболочку кнопками «пуск» и «стоп», 6 — одностороннее вращение с тепловыми реле и встроенными в оболочку кнопками).

В обозначении серии ПАЕ первая цифра после дефиса означает величину пускателя (3, 4, 5 и 6); вторая цифра после дефиса — исполнение (1 — открытое, 2 — защищенное, 3 — пылезащищенное; 4 — пылебрызгонепроницаемое); третья цифра после дефиса — характер вращения электродвигателя, наличие тепловых реле и кнопок управления (расшифровывается аналогично серии ПМЕ).

Тиристорные пускатели. Коммутирующим элементом данных аппаратов является тиристор — простейший управляемый вентиль, представляющий собой четырехслойный полупроводниковый прибор, пропускающий ток в одном направлении.

Тиристор открывается, когда на его управляющий электрод подан небольшой положительный потенциал (4 ... 8 В) по отношению к катоду. После открывания тиристора управляющий сигнал не влияет на состояние тиристора, который остается открытым до тех пор, пока анодный ток практически не снизится до нуля.

В пускателях используют силовые тиристоры серии Т с воздушным охлаждением, выбираемые по току и напряжению.

Тиристор может выдерживать весьма кратковременные (порядка микросекунд) перегрузки по току. Поэтому допустимый ток перегрузок вентиля должен быть больше пускового, а максимальное допустимое напряжение выбираемого тиристора должно быть не менее амплитудного значения напряжения, прикладываемого к тиристорам в прямом или обратном направлении. В пускателях, например на номинальный ток 16 А, используют тиристоры, предельный ток которых 160 А.

Тиристорные пускатели имеют следующие преимущества перед электромагнитными: отсутствие искрообразования, высокая механическая прочность и стойкость к воздействию ударов и вибраций, продолжительный срок службы, малое время включения и отключения, бесшумность в работе и малая мощность управления.

В настоящее время промышленность выпускает тиристорные пускатели серии ПТ-16-380-У5, ПТ-40-380-УГ (неревверсивные); и ПТ-16-380 Р-У5 и ПТ-40-380 Р-У5 (реверсивные) на номинальные токи 16 и 40 А.

Тиристорный пускатель состоит из силового блока, основу которого составляют шесть тиристоров, схемы управления, блоков защиты и питания цепей управления.

В случае подачи напряжения и при отсутствии аварийных состояний триод V3 открыт (рисунок 7.7.2). При нажатии кнопки S1 получает питание катушка реле К, контакты которого замыкают цепь управления соответствующими тиристорами. Допустим, что после замыкания контактов К положительная полуволна напряжения сети приложена к аноду тиристора VI. Тогда ток управления, отпирающий этот тиристор, пройдет через диод V6, кон-

такт К, резистор R1, управляющий электрод и катод тиристора VI. С открытием тиристора шунтируется цепь управления. При переходе тока через нуль тиристор VI закрывается. Следующая полуволна напряжения будет положительной для тиристора V2, ток управления протекает через диод V4, резистор R1, контакт К и управляющий электрод тиристора V2 и т. д.

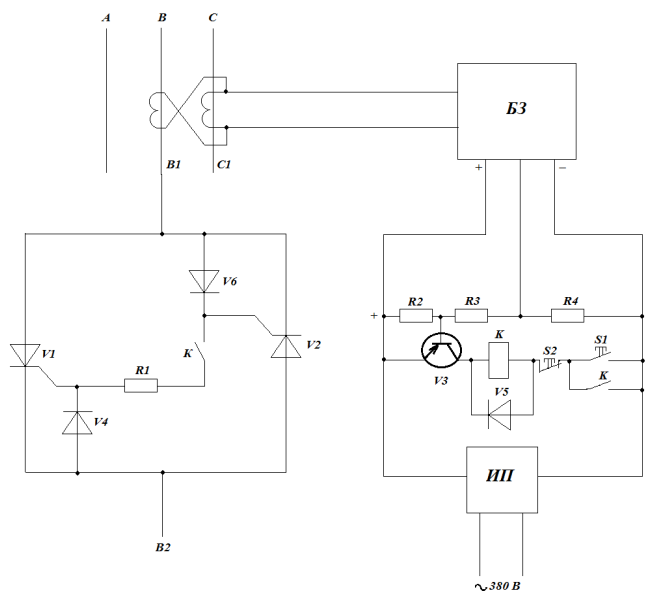


Рисунок 7.7.2 –Функциональная схема тиристорного пускателя

Аналогичным образом развивается процесс и в фазах А и С.

Блок токовой защиты БЗ воздействует на схему управления реле К, через свой выход, запирая транзистор V3.

В реверсивных пускателях предусмотрены дополнительные тиристоры для переключения фаз и два реле, контакты которых включены в цепь управления соответствующих тиристоров.

Тиристорные пускатели используют для управления нерегулируемыми приводами с высокой частотой включений.

Для этих же целей разработаны гибридные аппараты, основанные на совместном применении контактов и полупроводниковых приборов. Принцип работы данных устройств заключается в шунтировании силовых контактов на период коммутации тиристорами для исключения дугообразования, что приближает электрическую износостойкость контактов к механической, то есть срок службы аппаратов примерно увеличивается на один порядок

Реле управления

Реле управления. Наряду с контакторами и электромагнитными пускателями в схемах автоматического управления электроприводами применяют различного рода реле управления: тока, напряжения, времени и др.

Электромагнитное реле — аппарат, включающий или отключающий электрические цепи управления под воздействием электрических импульсов.

Уставкой реле называют величину напряжения, тока, времени, при которой срабатывает реле и на которую оно отрегулировано.

Напряжение (ток) срабатывания — наименьшее значение этого параметра, при котором начинается и полностью заканчивается втягивание якоря реле.

Напряжение (ток) отпущения — наибольшее значение напряжения (тока), при котором начинается и полностью заканчивается отпадение якоря.

Коэффициент возврата реле — отношение напряжения (тока) отпущения к напряжению (току) срабатывания.

Реле времени. Для получения задержек до 3 мин используют пневматические реле времени типа РВП (рисунок 7.7.3).

Основным элементом реле является замедлитель в виде воздушной камеры 8, разделенной на верхнюю и нижнюю части эластичной мембраной 4. При подаче напряжения на катушку 2 якорь электромагнита (в виде буквы «Т») опускается вниз и втягивается в сердечник 1. При этом вместе с якорем опускается шток 10 -под действием силы собственного веса и пружины 9.

Но это процесс происходит медленно, по мере заполнения верхней части воздушной камеры 8 наружным воздухом через калибровочное дроссельное отверстие 6.

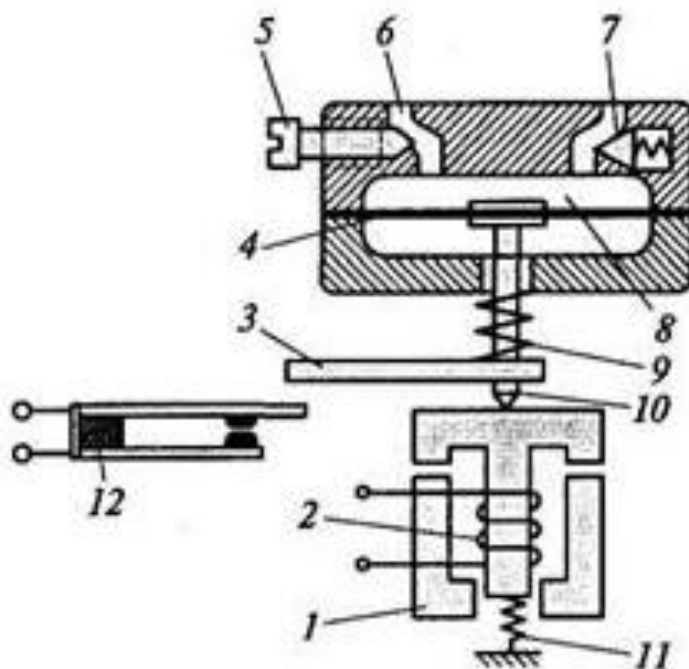


Рисунок 7.7.3 – Пневматическое реле времени

1- сердечник электромагнита; 2 – катушка электромагнита; 3 – рычаг электромагнита; 4 – мембрана; 5 – регулировочный винт; 6 – калибровочное дроссельное отверстие; 7 – обратный клапан; 8 – камера воздушная; 9 – пружина; 10 – шток; 11 – возвратная пружина; 12 – контакты.

Когда шток 10 опустится на якорь электромагнита (в виде буквы «Г»), он своим рычагом 3 надавит на верхний подвижный контакт 12, который замкнется с нижним контактом.

Таким образом происходит замедление при срабатывании реле (при подаче питания на катушку электромагнита).

При снятии питания с катушки электромагнита якорь (в виде буквы «Г») вместе со штоком 10 под действием возвратной пружины 11 поднимется, т.е. вернется в исходное положение. Этот процесс проходит быстро, благодаря открытию обратного клапана 7, так что воздух из камеры 8 будет выходить не только через отверстие 6, но и через отверстие обратного клапана 7.

Уставка времени срабатывания реле выполняется посредством винта 5, путем изменения размера дроссельного отверстия 6: чем меньше отверстие, тем больше время срабатывания.

Промышленность выпускает пневматические реле типа РВП (Р – реле, В – времени, П – пневматическое) с замедлением до 180 с.

Помимо пневматических реле, выпускают двигательные реле, выдержка времени которых может достигать нескольких часов.

Реле с магнитоуправляемыми контактами. Широкое распространение получили язычковые (герконные) реле, представляющие собой катушку, внутри которой установлены герметичные магнитоуправляемые контакты.

Принцип работы реле заключается в следующем (рисунок 7.7.4). при протекании постоянного тока по катушке 3 магнитные силовые линии намагничивают контакты 2, помещенные в стеклянный баллон 1. Контакты притягиваются и замыкают цепь тока.

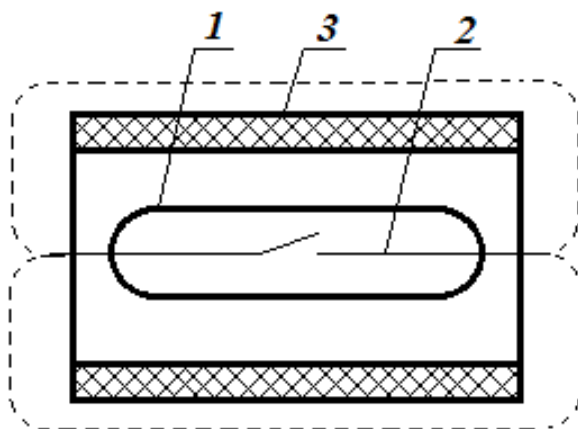


Рисунок 7.7.4 – Реле с магнитоуправляемыми контактами

Существует несколько серий реле с магнитоуправляемыми контактами: промежуточные РПГ, РЭС и РТГ.

Герконные реле выпускаются на номинальные напряжения 12 и 24 В постоянного тока.

Исполнения реле различаются по числу контактов, числу обмоток в катушке, номинальному напряжению.

Основными преимуществами язычковых реле по сравнению с малогабаритными и миниатюрными герметичными якорными реле являются: большая механическая износостойкость контактов (до 10 включений), более высокая надежность, меньшее время срабатывания и отпускания, меньшая мощность срабатывания и более простая конструкция.

Реле серии РТГ (реле токовое, герконное) выполняются на номинальный ток от 1,6 до 630 А.

Контакторы КМГ 14 предназначены для коммутации силовых электрических цепей вплоть до осуществления частых пусков и остановок двигателей переменного тока мощностью до 1,1 кВт.

Контрольные вопросы

1. Объясните назначение аппаратуры управления и защиты электродвигателями.
2. Из каких элементов состоят кнопочные посты?
3. Как устроен путевой выключатель и для чего он предназначен?
4. Какую аппаратуру используют для пуска электродвигателей?
5. Как устроено пневматическое реле времени?
6. Объясните принцип действия герконного реле и назовите его преимущества перед обычным электромагнитным реле?
7. Начертите функциональную схему тиристорного пускателя и объясните его устройство.
8. Объясните устройство и назначение пусковых резисторов для электродвигателей.

8 Указания к выполнению самостоятельной работы №1

Тема: Расчет мощности двигателей для общепромышленных механизмов.

Цель: Научиться рассчитывать мощность двигателей для привода механизмов производственного назначения и выбирать двигатели к ним.

Задание:

1. Решить задачи №№ 1-7 по варианту.
2. Ответить на контрольные вопросы.

Задача 1

Вычислить необходимую мощность электродвигателя для привода нории производительностью Q_H и высотой подъема H (таблица 8.1). Выбрать асинхронный двигатель серии 4А (приложение А). Нория приводится в движение через двухступенчатый редуктор с цилиндрическими колесами. Частота вращения быстроходного вала редуктора n_1 приведена в таблице 1. Коэффициент запаса $K_3=1,2...1,4$. КПД нории $\eta_H=0,8$, кпд редуктора принять по приложению Б.

Задача 2

Вычислить необходимую мощность электродвигателя для привода горизонтального ленточного транспортера производительностью Q , длиной L (таблица 8.2). Выбрать асинхронный двигатель серии 4А (приложение А). Передача от двигателя к транспортеру клиноременная. Коэффициент запаса $K_3=1,1...1,25$. Опытный коэффициент транспортера K_T берется из таблицы приложения В. Сведения о кпд передачи принять из таблицы по приложению Б. Синхронная частота вращения n_1 , об/мин приведена в таблице 2 исходных данных.

Таблица 8.1 - Исходные данные к задаче 1

Пред-последняя цифра варианта	Производительность Q_H , т/ч	n_1 , об/мин	Последняя цифра варианта	Высота подъема H , м
0	100	970	0	10
1	100	950	1	20
2	100	930	2	30
3	175	1480	3	40
4	175	1470	4	50
5	175	1450	5	60
6	350	1430	6	10
7	350	930	7	30
8	350	950	8	50
9	350	970	9	60

Таблица 8.2 - Исходные данные к задаче 2

Пред-последняя цифра варианта	Производительность Q, т/ч	n_1 , об/мин	Последняя цифра варианта	Длина транспортера L, м	Высота подъема груза H, м
0	10	1000	0	10	0,5
1	20	1500	1	50	0,8
2	50	1000	2	125	1
3	100	1500	3	10	0,5
4	200	1000	4	50	0,8
5	400	1500	5	125	1
6	10	1000	6	10	0
7	20	1500	7	50	0
8	50	1000	8	125	0
9	100	1500	9	10	0

Задача 3

Вычислить необходимую мощность электродвигателя для привода горизонтального винтового транспортера производительностью Q, длиной L (таблица 8.3). Выбрать асинхронный двигатель серии 4А (приложение А). Передача червячная с двухзаходным червяком. Коэффициент запаса $K_3=1,1...1,25$. Опытный коэффициент транспортера K_C берется из таблицы (приложение Г). Сведения о кпд передачи принять из таблицы (приложение Б). Синхронная частота вращения n_1 , об/мин приведена в таблице 3 исходных данных.

Таблица 8.3 - Исходные данные к задаче 3

Пред-последняя цифра варианта	Производительность Q, т/ч	n_1 , об/мин	Последняя цифра варианта	Материал	Длина транспортера L, м	Высота подъема груза H, м
0	4,5	1000	0	зерно	1	0,5
1	9	1500	1	земля	4	0,8
2	18	1000	2	песок	6	1
3	4,5	1500	3	зола	9	0,5
4	9	1000	4	гравий	10	0,8

Продолжение таблицы 8.3

5	18	1500	5	опилки	12	1
6	4,5	1000	6	глина	4	0
7	9	1500	7	мел	6	0
8	18	1000	8	известь	9	0
9	4,5	1500	9	щепа	10	0

Задача 4

Вычислить необходимую мощность электродвигателя для привода центробежного вентилятора производительностью Q при давлении H (таблица 8.4). Выбрать асинхронный двигатель серии 4А (приложение А). Передача клиноременная. КПД вентилятора принять $\eta_B=0,4\dots 0,7$. Сведения о кпд передачи принять из таблицы (приложение Б). Синхронная частота вращения n_1 , об/мин приведена в таблице 4 исходных данных.

Таблица 8.4 - Исходные данные к задаче 4

Пред-последняя цифра варианта	Производительность Q , m^3/c	Давление H , Па	Последняя цифра варианта	n_1 , об/мин
0	0,16	310	0	1000
1	0,4	600	1	1500
2	0,6	750	2	3000
3	0,8	350	3	1000
4	1,1	445	4	1500
5	1,2	545	5	3000
6	2,3	600	6	1000
7	3,3	850	7	1500
8	0,16	310	8	3000
9	0,4	600	9	1000

Задача 5

Вычислить необходимую мощность электродвигателя для привода центробежного насоса производительностью Q при давлении H (таблица 8.5). Выбрать асинхронный двигатель серии 4А (приложение А). КПД центробежного насоса принять $\eta_H=0,7\dots 0,75$ (>39000 Па), $\eta_H=0,3\dots 0,6$ (<39000 Па). Сведения о кпд передачи принять из таблицы (приложение Б). Коэффициент запаса

$K_3=1,1\dots1,4$. Синхронная частота вращения n_1 , об/мин приведена в таблице 5 исходных данных. Удельный вес перекачиваемой жидкости γ принять из таблицы (приложение Д)

Таблица 8.5 - Исходные данные к задаче 5

Пред-последняя цифра варианта	Производительность Q , м ³ /час	Давление H , Па	Последняя цифра варианта	Удельный вес перекачиваемой жидкости γ , Н/м ³	n_1 , об/мин
0	10	55	0	Вода	1000
1	20	50	1	Бензин	1500
2	30	45	2	Мазут	3000
3	40	40	3	Масло машинное	1000
4	50	35	4	Молоко цельное	1500
5	60	30	5	Пиво	3000
6	70	25	6	Спирт этиловый	1000
7	80	20	7	Хлористый натрий	1500
8	90	15	8	Серная кислота	3000
9	100	10	9	Патока	1000

Задача 6

Вычислить необходимую мощность электродвигателей для лебедки подъема и тележки перемещения мостового крана. Известна масса поднимаемого груза Q , масса захватного устройства Q_0 и тележки Q_T (таблица 8.6). Выбрать асинхронный двигатель серии 4А (Приложение А). Передача лебедки – червячная, тележки – зубчатая цилиндрическая. Сведения о КПД передачи принять из таблицы (Приложение Б). Скорость подъема груза v_1 , скорость перемещения тележки v_2 приведены в таблице 6. Коэффициент запаса $K_3=1,25\dots1,4$. Для тележки известны радиусы колеса R_K и цапф $r_{Ц}$. (таблица 8.6).

Коэффициент трения, учитывающий тип подшипников $\mu=0,01\dots0,15$. Коэффициент, учитывающий материал и степень износа колес $f=0,05\dots0,1$.

Таблица 8.6 - Исходные данные к задаче 6

Пред-последняя цифра варианта	Масса поднимаемого груза Q , Н	Радиус колеса/цапфы $R_K/r_{Ц}$, м	Последняя цифра варианта	Масса захватного устройства Q_0 и тележки Q_T , Н	Скорость подъема груза v_1 , м/с	Скорость перемещения тележки v_2 , м/с
0	250	0,02/ 0,002	0	50	0,6	1
1	500	0,05/ 0,005	1	100	0,5	1
2	750	0,08/ 0,008	2	150	0,5	0,9
3	1000	0,1/ 0,01	3	200	0,45	0,9
4	1500	0,15/ 0,015	4	300	0,45	0,8
5	2000	0,2/ 0,02	5	400	0,4	0,8
6	3200	0,3/ 0,03	6	640	0,4	0,7
7	4000	0,35/ 0,035	7	800	0,35	0,7
8	5000	0,4/ 0,04	8	1000	0,35	0,6
9	7500	0,55/ 0,055	9	1500	0,3	0,6

Задача 7

Вычислить необходимую мощность электродвигателей для привода лифта грузоподъемностью Q и весом кабины Q_0 (таблица 8.7). Выбрать асинхронный двигатель серии 4А (Приложение А). Передача –червячная. Сведения о кпд передачи принять из таблицы (Приложение Б). Скорость подъема груза v_1 приведена в таблице 8.7. Коэффициент запаса $K_3=1,3...1,5$. Коэффициент уравновешивания $\alpha=0,4...0,6$.

Таблица 8.7 - Исходные данные к задаче 7

Пред- последняя цифра варианта	Масса поднимаемо го груза Q, кг	Масса захватного устройств а Q₀, кг	Последня я цифра варианта	Скорость подъема груза v_л, м/с
0	225	330	0	1
1	300	420	1	1,5
2	320	450	2	1,3
3	400	520	3	1,45
4	450	570	4	1,4
5	500	600	5	1,8
6	630	690	6	1,9
7	1000	900	7	1,35
8	1275	1000	8	2
9	1200	1000	9	1

Контрольные вопросы

1. Какие параметры необходимо учитывать при выборе электродвигателя для привода рабочих машин?
2. Каким параметром определяется предельно допустимая температура нагрева электродвигателя?
3. Какие режимы работы электродвигателей существуют?
4. Какие материалы обладают наибольшей допустимой температурой?
5. Как обозначается степень защиты двигателя от воздействия окружающей среды?
6. Какими по степени защиты от воздействия окружающей среды могут быть электродвигатели серии 4А и АИ?
7. Что означает степень защиты IP 23?
8. Что означает степень защиты IP44?
9. Какие механизмы, рассматриваемые в заданиях работают в продолжительном, повторно-кратковременных или иных режимах?

9 Указания к выполнению самостоятельной работы №2

Тема: Системы релейно-контакторного управления электроприводом.

Цель: Изучить принципы построения схем управления электроприводом и получить навыки в их разработке.

Задание:

1. Выполнить задание в соответствии по варианту.
Все элементы схемы начертить по ГОСТу.
2. Ответить на контрольные вопросы.

Вариант 1

Составить нереверсивную схему управления контактором в двух вариантах:

- а) с использованием контактных элементов;
- б) с применением бесконтактных элементов, осуществляющих функции ИЛИ-НЕ.

Описать работу схемы.

Вариант 2

Составить релейно-контакторную нереверсивную схему управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором в функции времени, предусмотреть торможение противовключением. Реостат имеет три ступени. Управление с помощью кнопок.

Описать работу схемы.

Вариант 3

Составить релейно-контакторную нереверсивную схему автоматического управления в функции времени двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением. Управление с помощью кнопок. Реостат имеет три ступени, которые шунтируются контактором ускорения. Схема без торможения.

Описать работу схемы.

Вариант 4

Составить релейно-контакторную нереверсивную схему автоматического управления в функции времени двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Управление кнопочное. Реостат содержит три ступени. Предусмотреть динамическое торможение.

Описать работу схемы.

Вариант 5

Составить релейно-контакторную нереверсивную схему управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором в функции времени. Реостат содержит три ступени. Управление кнопочное. В схеме предусмотреть реле времени.

Описать работу схемы.

Вариант 6

Составить релейно-контакторную нереверсивную схему управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором в функции тока. Реостат содержит две ступени. Управление кнопочное.

Описать работу схемы.

Вариант 7

Составить релейно-контакторную реверсивную схему управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Управление кнопочное. Предусмотреть динамическое торможение.

Описать работу схемы.

Вариант 8

Составить релейно-контакторную реверсивную схему управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором. Реостат содержит две ступени. Управление кнопочное.

Описать работу схемы.

Вариант 9

Составить релейно-контакторную схему управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором. Блокировку, предотвращающую одновременное включение контакторов «Вперед» и «Назад», выполнить на кнопках. Предусмотреть торможение противовключением. Реостат содержит три ступени.

Описать работу схемы.

Вариант 10

Составить релейно-контакторную нереверсивную схему автоматического управления в функции ЭДС двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением. Управление кнопочное. Реостат содержит четыре ступени.

Описать работу схемы.

Вариант 11

Составить релейно-контакторную нереверсивную схему управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором в функции времени, предусмотреть торможение противовключением. Реостат имеет две ступени. Управление с помощью кнопок.

Описать работу схемы.

Вариант 12

Составить релейно-контакторную нереверсивную схему автоматического управления в функции времени двигателя постоянного тока с параллельным

возбуждением. Управление с помощью кнопок. Реостат имеет две ступени, которые шунтируются контактором ускорения. Схема без торможения.

Описать работу схемы.

Вариант 13

Составить релейно-контакторную нереверсивную схему автоматического управления в функции времени двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Управление кнопочное. Реостат содержит две ступени. Предусмотреть динамическое торможение.

Описать работу схемы.

Вариант 14

Составить релейно-контакторную нереверсивную схему управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором в функции времени. Реостат содержит две ступени. Управление кнопочное. В схеме предусмотреть реле времени.

Описать работу схемы.

Вариант 15

Составить релейно-контакторную нереверсивную схему управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором в функции тока. Реостат содержит три ступени. Управление кнопочное.

Описать работу схемы.

Вариант 16

Составить релейно-контакторную реверсивную схему управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Управление кнопочное. Предусмотреть торможение противовключением.

Описать работу схемы.

Вариант 17

Составить релейно-контакторную реверсивную схему управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором. Реостат содержит три ступени. Управление кнопочное.

Описать работу схемы.

Вариант 18

Составить релейно-контакторную схему управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором. Блокировку, предотвращающую одновременное включение контакторов «Вперед» и «Назад», выполнить на кнопках. Предусмотреть торможение противовключением. Реостат содержит две ступени.

Описать работу схемы.

Вариант 19

Составить релейно-контакторную нереверсивную схему автоматического управления в функции ЭДС двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением. Управление кнопочное. Реостат содержит две ступени.

Описать работу схемы.

Вариант 20

Составить схему управления контактором «Вперед» и «Назад» в двух вариантах:

а) с использованием контактных элементов;

б) с применением бесконтактных элементов, осуществляющих функции ИЛИ-НЕ.

Описать работу схемы.

Контрольные вопросы

1. Какие функции используются для построения схем управления электроприводом?
2. Как осуществляется динамическое торможение двигателей постоянного тока?
3. Как осуществляется динамическое торможение асинхронных двигателей?
4. Как осуществляется торможение противовключением двигателей постоянного тока?
5. Как осуществляется торможение противовключением асинхронных двигателей?
6. Для чего предназначено реле времени в схемах управления?
7. Что такое блокировка?
8. Что такое защита?
9. Какие схемы управления называют реверсивными, какие нереверсивными?

10 Лабораторный практикум

Лабораторная работа №1

Тема: Определение момента инерции и махового момента электропривода методом свободного выбега

Цель работы: Определить момент инерции и маховой момент электропривода; приобрести практические навыки в опытном определении момента инерции и махового момента электропривода; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о динамическом моменте в электроприводе.

Теоретические сведения

Основные понятия. При постоянной частоте вращения электропривода мощность, развиваемая электродвигателем, расходуется на преодоление лишь только статистической нагрузки. Если же в электроприводе наступил переходной режим, и он работает с переменной частотой вращения, то мощность электродвигателя расходуется не только на статистическую, но и на динамическую нагрузки.

Статистическая нагрузка обусловлена двумя факторами: моментом статистического сопротивления на валу рабочего механизма и силами сопротивления в передачах, соединяющих вал электродвигателя с выходным валом рабочего механизма (рабочей машины). Динамическая нагрузка электропривода определяется динамическим моментом M_j , обусловленным изменением скорости движения всех элементов системы электропривода.

Уравнение движения электропривода устанавливает связь между моментами, действующими на вал электродвигателя: моментом M_2 развиваемым электродвигателем на валу, моментом статистической нагрузки M_c и моментом динамической нагрузки M_j :

$$M_2 = M_c + M_j \quad (10.1.1)$$

Момент статистической нагрузки, соответствующий установившемуся режиму работы электропривода (неизменной чистоте вращения) можно представить в виде суммы моментов – момента статистического сопротивление механизма $M_{c.m}$, обусловленного полезной работой механизма (например, работой по подъему груза), и момента трения $M_{тр}$, обусловленного силами трения в механизме:

$$M_c = M_{c.m} + M_{тр} \quad (10.1.2)$$

Момент трения можно учесть введением в уравнение (10.1.2) значений КПД рабочего механизма η_M и КПД передаточного устройства редуктора) η_P . В этом случае момент статистического сопротивления механизма ($H \cdot m$):

$$M_c = M_{c.m} / \eta \quad (10.1.3)$$

где $\eta = \eta_M \cdot \eta_P$ – КПД устройств, приводимых в движение приводным электродвигателем, в долях единицы.

Динамический момент M_j возникает под влиянием ускорений при изменениях скорости движения. Для электропривода с вращательным движением динамический момент ($H \cdot m$):

$$M_j = J(d\omega/dt) \quad (10.1.4)$$

где J – момент инерции вращающегося тела относительно оси вращения, $к \cdot м^2$;

ω – угловая скорость этого тела, рад/с.

Используя выражения (1.3) и (1.4), получим уравнение движения электропривода:

$$M_2 = M_c + M_j = (M_{c.m} / \eta) + J(d\omega/dt) \quad (10.1.5)$$

Обычно приводной электродвигатель соединяется с рабочим механизмом промежуточным передаточным устройством, изменяющим частоту вращения. Таким устройством чаще всего является редуктор с КПД η_P и передаточным отношением $i = \omega_D / \omega_{MEH}$, где ω_D и ω_{MEH} угловые скорости вращения вала в электродвигателя и рабочего механизма соответственно.

Для того чтобы избежать трудоемкой задачи по решению нескольких уравнений движения для различных элементов электропривода с разными угловыми скоростями движения, все моменты сопротивление и моменты инерции различных элементов, образующих систему электроприводом, приводят к какой-либо одной скорости движения – обычно угловой скорости вращения вала электродвигателя. Другими словами, реальная система электропривода, элементы которой вращаются с разными угловыми скоростями, заменяется упрощённо системой, у которой все движущиеся массы сосредоточены на одном валу и вращаются с угловой скоростью ω_D . В этом случае приведённое значение статистического момента сопротивления механизма имеет вид:

$$M'_{c.m} = M_{c.m} / (\eta i) \quad (10.1.6)$$

где $i = \omega_D / \omega_{MEH}$ – передаточное отношение редуктора.

Общий момент инерции системы электропривода определяется суммой моментов инерций: момента инерции вращающихся частей электропривода и

расположенных на его валу устройств (например соединительной муфты) J_d и приведённого угловой скорости вала электродвигателя момента инерции J' :

$$J_{\text{общ}} = J_d + J' \quad (10.1.7)$$

Приведённый момент инерции определяется суммой приведённых значений моментов инерции всех элементов электропривода, вращающихся с угловой скоростью, отличающейся от угловой скорости вращения вала электродвигателя ω_d :

$$J' = J_1 \frac{1}{i_1^2} + J_2 \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \dots + J_n \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2 \dots i_n^2} \quad (10.1.8)$$

где i_1, i_2, \dots, i_n – передаточные отношения на разных ступенях угловых скоростей вращения.

Мерой инерции вращающихся тел является также маховый момент связанный с моментом инерции зависимостью:

$$G \cdot D^2 = 4 \cdot g \cdot J \quad (10.1.9)$$

где G – сила тяжести тела, Н;

D – диаметр вращения, м;

$g = 9.81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести.

В данной работе рассматривается один из методов экспериментального определения общего момента инерции и общего махового момента системы электропривода – метод свободного выбега (самоторможения). Сущность этого метода состоит в следующем. Исследуемый агрегат, включающий в себя электродвигатель и механически соединённые с ним элементы, разгоняется до некоторой установившейся частоты вращения в режиме х.х. $n_{до}$. После этого электродвигатель отключают от сети и наступает процесс самопроизвольного торможения, т.е. торможение исключительно за счёт внутренних сил трения (трения в подшипниках электродвигателя и сочленённых с ним вращающихся частей о воздух, трения щеток о коллектор и т. п.). На преодоления этих сил трения затрачивается кинетическая (Дж) запасенная во вращающихся частях агрегата:

$$A = J_{\text{общ}} \omega_{до}^2 / 2 \quad (10.1.10)$$

С другой стороны, эта энергия может быть определена как произведение мощности, затраченной на приведение вращения агрегата в режиме х.х. $P_{вр.0}$ на время t_0 :

$$A = P_{вр.0} t_0 \quad (10.1.11)$$

Приравняв (1.10) к (1.11), получим выражение общего момента инерции ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$):

$$J_{\text{общ}} = 2 \cdot P_{\text{ВР0}} \cdot t_0 / \omega_{\text{ДО}}^2 \quad (10.1.12)$$

Переход к частоте вращения $n_{\text{до}}$ и учитывая, что $\omega_{\text{ДО}} = n_{\text{до}}(\pi/30)$, получим:

$$J_{\text{общ}} = 182,6 \cdot P_{\text{ВР0}} \cdot t_0 / n_{\text{ДО}}^2 \quad (10.1.13)$$

По полученному значению общего момента инерции вращающихся частей агрегата $J_{\text{общ}}$, воспользовавшись зависимостью (1.9), определяют маховый момент агрегата ($\text{Н}\cdot\text{м}^2$):

$$G \cdot D^2 = 4 \cdot g \cdot J_{\text{общ}} = 7164 \cdot P_{\text{ВР0}} \cdot t_0 / n_{\text{ДО}}^2 \quad (10.1.14)$$

Значения $P_{\text{ВР0}}$ и t_0 вошедшие в (10.1.13) и (10.1.14), определяют экспериментально, выполнив опыт х.х. и опыт свободного выбега [построив кривую выбега $n=f(t)$ (рисунок 10.1.1)].

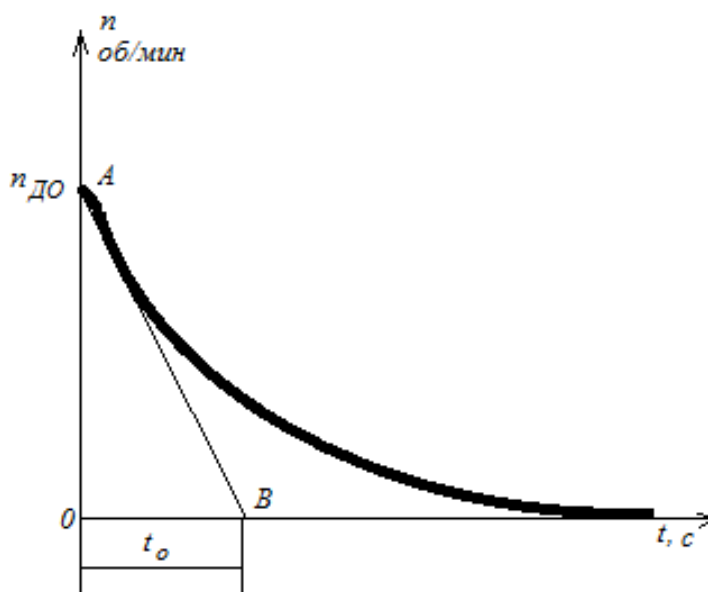


Рисунок 10.1.1 –Кривая выбега $n=f(t)$

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал:

- статистический и динамический моменты сопротивления;
- основное уравнение движение электропривода;

- момент инерции и маховый момент электропривода, приведение момент инерции и махового момента электропривода к частоте вращения вала электродвигателя.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения графика.

Работа в лаборатории

Лабораторная установка.

Лабораторная установка представляет собой агрегат, состоящий из двух электрических машин постоянного тока, одна из которых – электродвигатель М (рисунок 10.1.1) параллельного возбуждения. Этот электродвигатель включается в сеть через рубильник и пусковой реостат ПР. В схему включены: вольтметр V для контроля за напряжением сети $U_c=U_{ном}$ и амперметр А для измерения величины тока в цепи якоря I_a . Произведение показаний этих приборов определяет значение мощности (Вт), потребляемой двигателем в цепи якоря: $P_a=U_{ном}I_a$. Для измерения времени следует применить секундомер.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки; записать паспортные данные электрических машин и данные измерительных приборов.

2. Собрать схему по рисунку 10.1.2 и после проверки её преподавателем выполнить опыт х.х.

3. Выполнить опыт х.х.

Опыт холостого хода. Электродвигатель включают в сеть при номинальном напряжении $U_c=U_{ном}$. Регулирующим реостатом $r_{пр}$ устанавливают частоту вращения $n_{до}=1.2 n_{д.ном}$. После того как частота вращения агрегата достигает установившегося значения, снимают показания приборов и заносят их в таблицу 10.1.1.

Необходимые вычисления выполняют по формулам: мощность х.х, в цепи якоря электродвигателя, (Вт):

$$P_0=U_{ном} I_{a0} \quad (10.1.15)$$

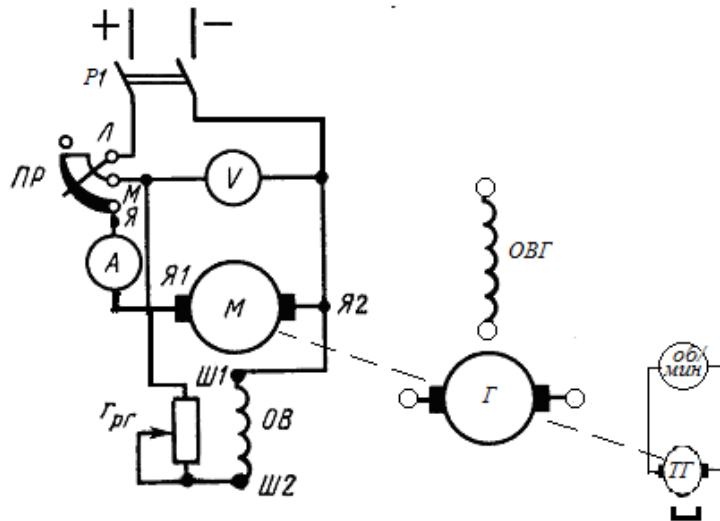


Рисунок 10.1.2 – Схема включения электродвигателя для проведения опытов по определению момента инерции методом свободного выбега

Электрические потери в обмотках цепи якоря, (Вт):

$$P_{\text{Эа}} = I_{\text{а0}} \sum r, \quad (10.1.16)$$

где

$$\sum r = r_{\text{а}} + r_{\text{ДП}} + \dots \quad (10.1.17)$$

-сумма сопротивлений обмоток в цепи якоря (обмотки якоря $r_{\text{а}}$ обмотки добавочных полюсов $r_{\text{ДП}}$ и т.п.) при температуре окружающей среды (Ом);

электрические потери в щёточном контакте, (Вт):

$$P_{\text{Э.щ}} = I_{\text{а0}} \cdot \Delta U_{\text{щ}} \quad (10.1.18)$$

Здесь $\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В}$ – падение напряжения в контакте щёток.

Все полученные значения величин заносят в таблицу 10.1.1 и определяют мощность $P_{\text{вр.0}}$, затрачиваемую на вращение агрегата в режиме х.х., (Вт):

$$P_{\text{вр.0}} = P_0 - (P_{\text{Эа}} + P_{\text{Э.щ}}) \quad (10.1.19)$$

Таблица 10.1.1 – Данные опыта холостого хода

Измерения			Вычисления			
$U_{\text{ном}}$, В	$I_{\text{а0}}$, А	$n_{\text{до}}$, об/мин	P_0 , Вт	$P_{\text{Эа}}$, Вт	$P_{\text{Э.щ}}$, Вт	$P_{\text{вр.0}}$, Вт

4. Снять данные и построить кривую выбега агрегата $n = f(t)$

Кривая выбега. После снятия показаний приборов при опыте х.х. отключают электродвигатель от сети (разомкнуть Р1) и одновременно включают секундомер. В процессе выбега агрегата, т. е. его вращения по инерции, необходимо 6–8 раз измерить частоту вращения $n_{до}$ с одновременным фиксированием времени, соответствующего каждому измерению. Первый замер частоты вращения делают в момент отключения электродвигателя, т.е. в момент времени $t=0$, а последний – при полной остановке агрегата, т.е. при $n=0$. Особенно внимательно следует отнестись к измерениям при первых трёх замерах, следующих непосредственно после отключения электродвигателя, так как точность этих измерений в значительной степени влияет на результаты лабораторной работы. Показания приборов заносят в таблицу 10.1.2.

Таблица 10.1.2 – Данные снятия кривой выбега

t, с	0					
$n_{до}$, об/мин						0

Затем строят кривую выбега $n = f(t)$.

5. Используя результаты опытов по пп. 3 и 4, определить общий момент инерции и маховый момент агрегата.

Момент инерции и маховый момент. Для того чтобы воспользоваться выражением (10.1.13) для определения общего момента инерции агрегата, необходимо определить время t_0 . С этой целью на графике кривой выбега проводят касательную к начальной части кривой в точке А (рисунок 10.1.1) до пересечения в с осью абсцисс в точке В.

Полученный таким образом отрезок ОВ на оси абсцисс и определит время t_0 . Это значение t_0 заносят в таблицу 10.1.3. В эту же таблицу заносят значения $P_{вр\cdot 0}$ и $n_{до}$ из таблицы 10.1.1, а затем определяют общий момент инерции агрегата $J_{общ}$ (10.1.13) и махового момента GD^2 (10.1.14).

Таблица 10.1.3 Момент инерции и маховый момент

$P_{вр\cdot 0}$, Вт	$n_{до}$, об/мин	t_0 , с	$J_{общ}$, кг·м ²	GD^2 , н·м

5. Составить отчёт и сделать заключение о проделанной работе.

Анализ результатов лабораторной работы. Анализируя результаты лабораторной работы, необходимо иметь в виду следующие. При расчёте

момента инерции в выражении (10.1.13) предусмотрена подстановка значения мощности, затраченной исключительно на приведение во вращение агрегата с частотой вращения $n_{до}$, т. е. мощности механических потерь $P_{мех}$. Что же касается значения $P_{вр0}$, определяемой по (10.1.19), то она помимо мощности механических потерь $P_{мех}$ включает в себя и мощность магнитных потерь $P_{м}$, т.е. $P_{вр0} = P_{мех} + P_{м}$.

Следует заметить, что исследованию подвергается агрегат, состоящий из двух электрических машин, поэтому магнитные потери происходят лишь в одной из них (в электродвигателе), а механические – одновременно в двух машинах. По этой причине доля магнитных потерь в общей сумме потерь $P_{вр0} = P_{м} + P_{д.мех} + P_{г.мех}$ становится малозначительной. Если же учесть, что в реальных условиях система электропривода содержит помимо рабочей машины ещё и передаточное устройство (редуктор), то ошибка метода свободного выбега становится практически незаметной.

Контрольные вопросы

1. На какие свойства электропривода влияет величина момента инерции и махового момента?
2. Что такое маховой момент и какова его зависимость от момента инерции системы электропривода?
3. На чем основан метод свободного выбега для определения момента инерции системы электропривода?
4. Как изменится время выбега агрегата, если на валу двигателя установить маховик?
5. Что представляет собой кривая выбега и каков порядок снятия данных для её построения?

Лабораторная работа №2

Тема: Исследование нагрева и охлаждения электродвигателя

Цель работы: Изучить переходные режимы нагрева и охлаждения, ознакомиться с методами определения постоянной времени нагрева и охлаждения электродвигателя.

Теоретические сведения

Основные понятия. Правильный выбор номинальной мощности электродвигателя определяет экономическую эффективность привода. Применение двигателя недостаточной мощности приводит к преждевременному выходу из строя. Использование двигателей завышенной мощности ведет к увеличению первоначальной стоимости электропривода и к увеличению расхода электроэнергии.

Мощность двигателя выбирается, исходя из необходимости обеспечения пуска, преодоления всех сопротивлений во время работы, соблюдения нормального теплового режима электродвигателя.

Нагрев электродвигателя вызывается потерями энергии. При длительной работе двигателя с постоянной нагрузкой, а, следовательно, с постоянными потерями температуры двигателя превысит температуру охлаждающей среды на определенную величину и наступит тепловое равновесие. Если считать теплоотдачу двигателя пропорциональной разности температур двигателя и среды (температуре перегрева ϑ_y), то:

$$\vartheta_y = \Delta P / A \quad (10.2.1)$$

где ΔP – потери мощности, Вт;

A – удельная теплоотдача двигателя, Вт/°С.

Удельная теплоотдача двигателя – это количество теплоты, отдаваемое двигателем в окружающую среду за секунду при разности температур в один градус.

Установившаяся температура перегрева ϑ_y прямопропорциональна потерям мощности и обратнопропорциональна теплоотдаче двигателя.

Удельная теплоотдача двигателя, Вт/°С:

$$A = \Delta P_H / \vartheta_{yH} \quad (10.2.2)$$

где ΔP_H – номинальные потери мощности, Вт;

ϑ_{yH} – номинальная установившаяся температура перегрева, °С.

Номинальные потери мощности ΔP_H можно определить по справочным данным двигателя, Вт;

$$\Delta P_H = P_H (1 - \eta_H) \quad (10.2.3)$$

где P_H – номинальная мощность двигателя, Вт;

η_H – номинальный КПД двигателя.

Номинальная установившаяся температура перегрева ϑ_{yH} определяется по справочным данным или из опыта.

При включении двигателя в работу или при изменении нагрузки наблюдается тепловой переходный процесс. Температура перегрева двигателя в переходных режимах определяется по выражению, °С:

$$\vartheta = \vartheta_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \vartheta_{нач} e^{-\frac{t}{T}} \quad (10.2.4)$$

где ϑ_y – установившаяся температура перегрева, °С;

$\vartheta_{нач}$ – начальная температура перегрева, °С;

t – время в определенный момент, с;

T – постоянная времени нагрева двигателя, с.

Величина T выражается в секундах или минутах и называется постоянной времени нагрева двигателя. Она представляет собой то время, в течении которого температура двигателя повысится от нуля до значения установившейся температуры при постоянных потерях и отсутствии отдачи теплоты в окружающую среду. Для двигателей небольшой мощности $T=10\dots 20$ мин.

Постоянная времени нагрева больше у двигателей тихоходных, закрытого исполнения, T возрастает с увеличением номинальной мощности.

Постоянную времени нагрева определяют экспериментально, по кривой нагрева, или аналитически, пользуясь выражением:

$$T=C/A \quad (10.2.5)$$

где A – удельная теплоотдача двигателя, Вт/°С;

C – теплоемкость двигателя, Дж/°С.

Постоянная времени нагрева двигателя – это время, за которое двигатель нагреется до значения $0,632 \vartheta_y$, а постоянная охлаждения – это время, за которое температура снизится до $0,368$ от начальной.

Коэффициент ухудшения теплоотдачи:

$$\alpha_a = T/T_0 \quad (10.2.6)$$

где T – постоянная времени нагрева двигателя, с;

T_0 – постоянная времени охлаждения двигателя, с.

Теплоемкость двигателя C равна произведению удельной теплоемкости на его массу, Дж/°С:

$$C=c_0 G \quad (10.2.7)$$

где c_0 – средняя удельная теплоемкость материалов,

из которых выполнен двигатель, $c_0 \approx 420 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{С}}$;

G – масса двигателя, кг.

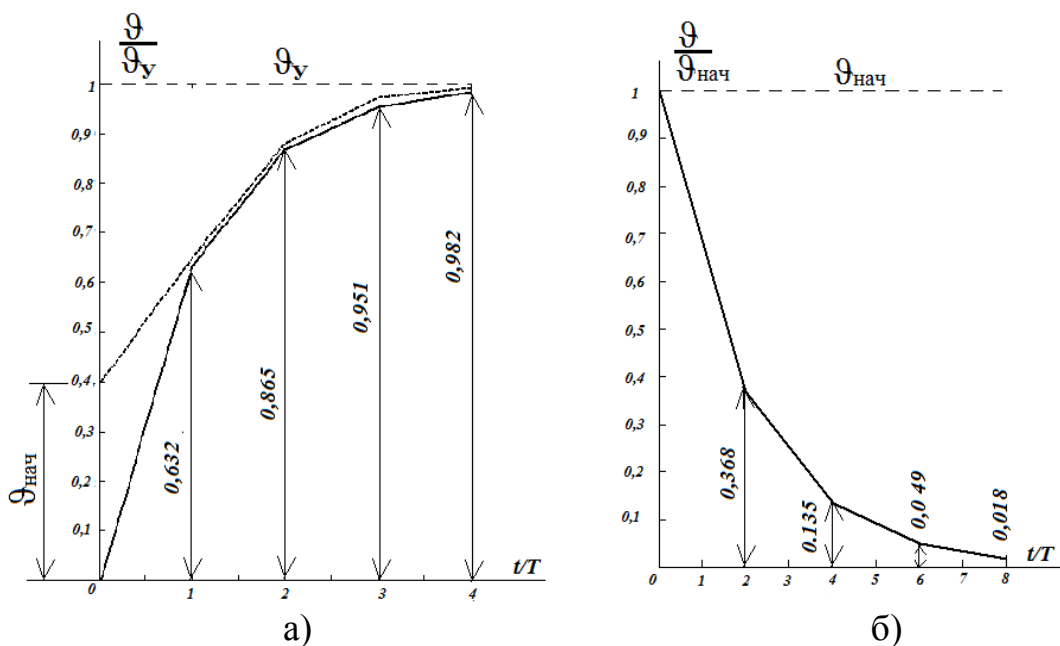


Рисунок 10.2.1 –Изменение температуры двигателя при нагреве (а) и охлаждении (б).

В электродвигателе наименьшей нагревостойкостью обладают изоляционные материалы. Электроизоляционные материалы разделяются на классы (таблица 10.2.1).

Таблица 10.2.1-Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов

Классы изоляции	Материалы	Допускаемая температура нагрева
А	Материалы органического происхождения: хлопок, бумага, эмали, лаки, полиамидные волокна, пропитанные ил погруженные в масло	до 105 ⁰ С
Е	Синтетические пленки	120 ⁰ С
В	Материалы на основе слюды, асбеста, стекловолкна с органическими связующими	130 ⁰ С
F	Те же материалы с синтетическими связующими	155 ⁰ С
Н	Те же материалы с кремний-органическими связующими	180 ⁰ С
С	Чистая слюда, фарфор, асбест, стекло	свыше 180 ⁰ С

В электрических машинах в основном применяют изоляционные материалы, которые относят к классам А, Е, В, F, Н.

В электродвигателях серии 4А применяют более нагревостойкую изоляцию классов Е, В, F. Еще более нагревостойкие материалы класса Н используют во взрывоопасных двигателях большой мощности.

Срок службы изоляции зависит от температуры, при которой она работает. Превышение рабочей температуры на 10°C по сравнению с предельно допустимой сокращает срок службы изоляции вдвое. При температуре более 200°C двигатель выйдет из строя в течение нескольких минут. Поэтому, нагрев электродвигателей, так же как и другого электрооборудования, является основным критерием допустимой нагрузки.

Кроме предельно допустимой температуры нагрева, указывают предельно допустимое превышение температуры двигателя над окружающей средой. Эта величина получается вычитанием из предельно допустимой температуры нагрева двигателя номинальной температуры окружающей среды, которая принята равной 40°C .

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал:

- нагрев и охлаждение электродвигателей;
- удельная теплоотдача двигателя и теплоемкость;
- постоянная времени нагрева и охлаждения.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения графика.

Работа в лаборатории

Лабораторная установка.

Лабораторная установка состоит из соединенных между собой асинхронного двигателя небольшой мощности и нагрузочного генератора постоянного тока (рисунок 2.2). нагрузка устанавливается при помощи резистора; в качестве тормозных сопротивлений можно использовать лампы накаливания. Температуру двигателя измеряют при помощи термопары с гальванометром, термистора или термосопротивления с измерительным мостом.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и методами определения температуры обмоток двигателя. Записать паспортные данные электрических машин и данные измерительных приборов в таблицу 10.2.2.

Таблица 10.2.2 Номинальные параметры электродвигателей

Тип дв и-ля	Номинальная частота вращения дв-ля n_2 , об/мин	Номинальная мощность дв-ля $P_{ном}$, кВт	КПД двигателя η	Коэффициент мощности $\cos\varphi_2$	Масса двигателя G , %	Номинальная установившаяся температура перегрева $\vartheta_{УН}$, °С

2. Собрать схему по рисунку 10.2.2 и после проверки её преподавателем замерить начальную температуру обмоток двигателя. Результаты измерений занести в таблицу 10.2.3.

3. Включить асинхронный электродвигатель, установить номинальную нагрузку и поддерживать ее в дальнейшем состоянии постоянной.

В течение 45 минут от начала работы электродвигателя, через каждые 5 минут измерять температуру. Результаты измерений занести в таблицу 10.2.3.

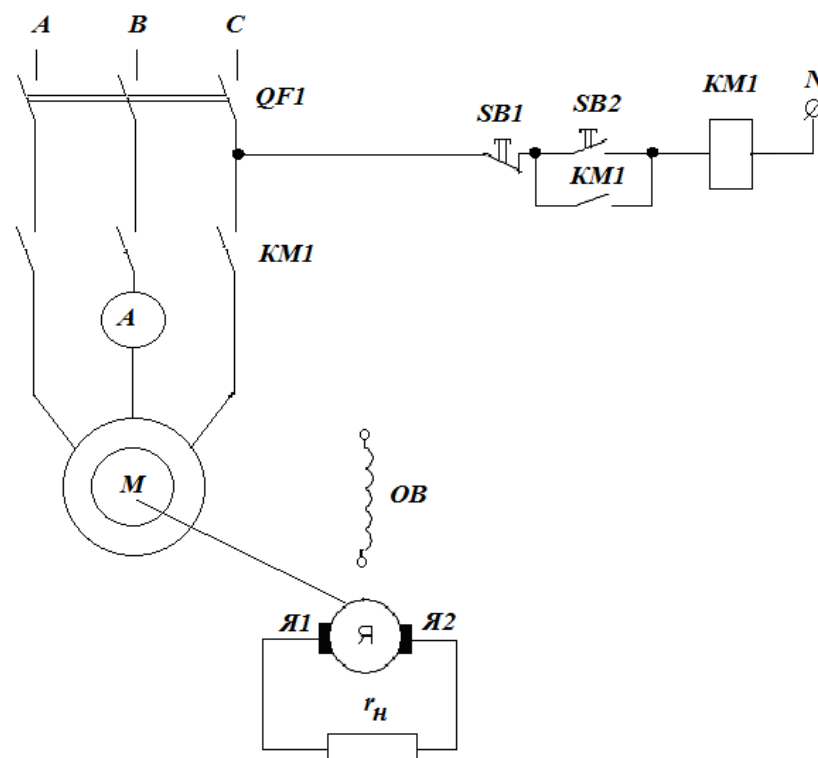


Рисунок 10.2.2 – Принципиальная схема установки для снятия кривых нагрева и охлаждения

Таблица 10.2.3- Результаты измерений

Нагрев двигателя		Охлаждение двигателя	
Время работы двигателя t, мин	Температура перегрева ϑ , °C	Время охлаждения двигателя t, мин	Температура перегрева ϑ , °C
0	$\vartheta_{нач}, °C =$	0	$\vartheta_{нач}, °C =$
5		5	
10		10	
...			
45	$\vartheta_{у}, °C =$	40	

4. Отключить электродвигатель и в течение 30...40 минут измерять и записывать периодически температуру (таблица 10.2.3).
5. Построить кривые нагрева и охлаждения. По кривым нагрева и охлаждения определить постоянную времени нагрева и охлаждения.
6. Вычислить установившуюся температуру электродвигателя, удельную теплоотдачу и теплоемкость. Результаты измерений занести в таблицу 10.2.4.
7. Определить постоянную времени нагрева теоретически и по кривой нагрева (таблица 10.2.4). Сравнить полученные результаты.

Таблица 10.2.4 –Результаты вычислений

	По кривым нагрева и охлаждения	Вычисления аналитические
Постоянная времени нагрева двигателя T, с		
Постоянная времени охлаждения двигателя T ₀ , с		
Установившаяся температура двигателя $\vartheta_{у}$, °C		
Номинальные потери мощности $\Delta P_{н}$, кВт		
Удельная теплоотдача двигателя A, Вт/°C		
Теплоемкость двигателя C, Дж/°C		
Коэффициент ухудшения теплоотдачи		

8. Определить коэффициент ухудшения теплоотдачи неподвижного двигателя по сравнению с вращающимся.

Контрольные вопросы

1. Чем ограничивается допустимая нагрузка электродвигателя?
2. Какие классы изоляции применяют в электродвигателях?
3. Как классифицируются режимы работы электродвигателей?
4. Как определяют относительную продолжительность работы электродвигателя?
5. Что такое эквивалентный ток и как его вычисляют?
6. Как определить установившуюся температуру двигателя?
7. Как определить постоянную времени и время нагрева двигателя до установившейся температуры?

Лабораторная работа №3

Тема: Исследование электромагнитного пускателя

Цель работы: Изучить конструкцию, принцип действия пускателя с катушками на переменном и постоянном токе. Исследовать электромагнитную систему пускателя.

Теоретические сведения

Контакты постоянного и переменного тока — наиболее распространенные аппараты в схемах автоматического управления электроприводами. Они предназначены для многократных включений и отключений электрической цепи (до 1200 срабатываний в час) и приводятся в действие при помощи электромагнита. Номинальные токи контактов находятся в пределах от 3 до 2500 А с номинальным напряжением до 660 В.

Контакты классифицируются *по роду тока* и *по числу полюсов*.

Собственное время срабатывания контактов постоянного тока зависит от величины контактора и находится в пределах 0,1... 0,4 с, напряжение отпускания 10... 20% номинального.

Наиболее популярными контакторами являются контакторы переменного тока рассчитанные на номинальный ток от 100 до 1000 А, с числом главных контактов от 1 до 5. Также широко распространены трехполюсные контакторы (рисунок 10.3.1).

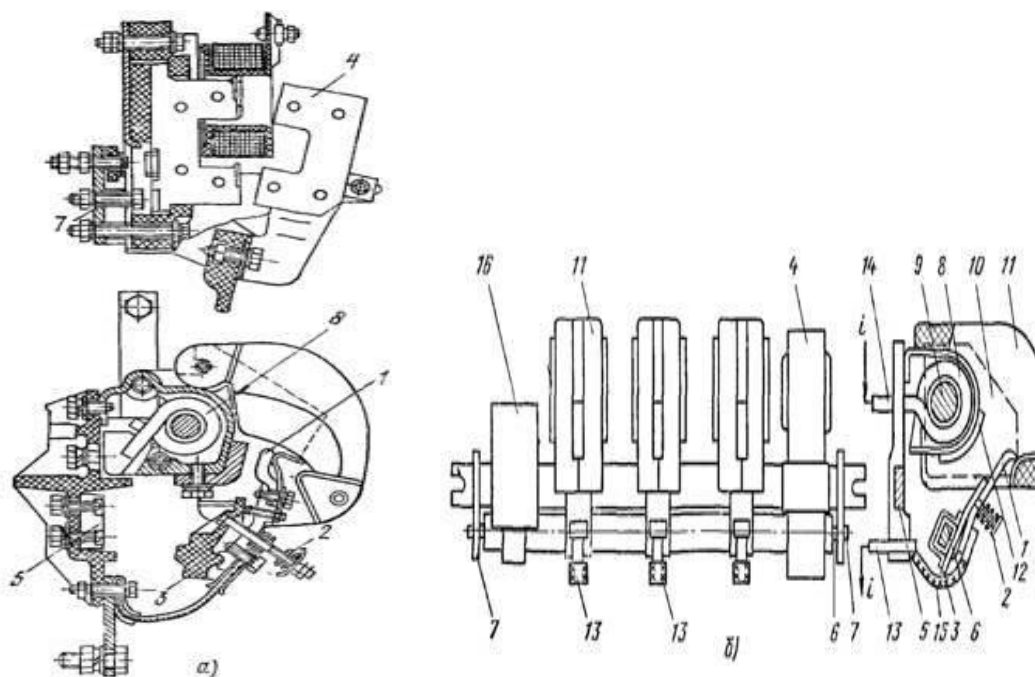
Следствием большого количества контактов, является увеличение усилия электромагнита и необходимого для включения контактора момента. Контакты переменного тока имеют вспомогательные контакты, приводимые в действие тем же электромагнитом, который двигает и главные контакты.

Зазор, оставляемый между главными контактами, в контакторах переменного тока, меньше чем в контакторах постоянного тока. По этой причине, возникают наиболее благоприятные условия для гашения дуги, что позволяет сократить размеры, мощность и массу электромагнита.

Якорь (4) и подвижный контакт электромагнита связаны между собой посредством вала контактора (6). Контакт в контакторе переменного тока КТ-6000 плоский и без перекатывания. При помощи контактных пружин и подвижных частей, происходит отключение аппарата. Подвижные и неподвижные контакты, для удобства эксплуатации, сделаны сменяемыми. Контактная пружина (2) имеет предварительное сжатие, которое примерно равно половине конечного. На изоляционной рейке (5) закрепляются все детали контактора переменного тока. Рычаг (3) подвижного контакта, закреплен на валу (5), вращающемся на подшипниках (7) и покрытым изоляционным материалом. Катушка (8), сердечник (9), керамическая камера (11) и полюсные пластины (10) составляют в общем, систему дугогашения. Катушка (8) подключена к цепи последовательно вместе с подвижным и неподвижным контактом (12). Выводы (13) и (14) подключают к цепи главные контакты. А гибкая связь (15) и вывод (13) соединяются с подвижным контактом (13). Вращение вала (6) приводит в действие блок вспомогательных контактов (16). Благодаря тому, что все детали закреплены на рейке, появляется возможность установки контакторов переменного тока в комплексных станциях с реечной конструкцией, а также уменьшить массу и объем станции управления. Максимально допустимое число включений составляет 1200 в час. В контакторах переменного тока очень часто используется мостиковая контактная система с двумя разрывами цепи на каждый из полюсов (рисунок 10. 3.б). Эта система позволяет довольно быстро гасить дуги, если отсутствует гибкая связь.

Для контакторов переменного тока характерны следующие особенности.

1. Катушка контактора питается однофазным током, из-за чего поток магнитной системы контактора периодически проходит через нуль. Это вызывает вибрацию и гудение магнитной системы. Для ослабления этих явлений на торцевой части сечения сердечника закладывается медный короткозамкнутый виток, который охватывает обычно около $\frac{1}{3}$ площади сечения сердечника. В момент перехода основного потока сердечника через нуль скорость изменения этого потока максимальна и поэтому в короткозамкнутом витке наводится максимальная э. д. с, как во вторичной обмотке трансформатора. Через виток проходит ток, который создает свой магнитный поток, замыкающийся через сердечник и якорь и препятствующий отпаданию последнего при переходе основного потока через нуль.



а) — магнитная система;

б) — контактная система

Рисунок 10.3.1- Контактор переменного тока

Контактор переменного тока имеет шихтованную магнитную систему.

Полное сопротивление, а следовательно, и ток катушки зависят от индуктивности цепи катушки, которая, в свою очередь, определяется величиной воздушного зазора в магнитной системе контактора.

При большом зазоре, то есть при отключенном контакторе, индуктивность мала, незначительно и полное сопротивление цепи катушки, а ток велик. Если якорь притянут, то зазор в магнитной системе близок к нулю, индуктивность велика, а ток в цепи катушки мал. Это приводит к тому, что начальный пусковой ток катушки в 8... 10 раз превышает ток катушки при притянутом якоре.

Буквенные обозначения типа контакторов расшифровываются следующим образом: К — контактор, П — постоянного тока, Т — переменного тока, Д — промышленного назначения, М — морского исполнения, В — вертикальной установки. Когда после буквы Т стоит П, то это означает, что у контактора переменного тока цепи управления рассчитаны на постоянный ток, например КТПВ-1.

Контакторы переменного тока выпускают на токи 20... 600 А с числом полюсов до пяти. На базе конструкции контактора переменного тока изготавливают контакторы с защелкой. Эти контакторы удерживаются во включенном состоянии механической защелкой, и их положение не зависит от наличия напряжения сети.

Электромагнитные пускатели представляют собой комплексные устройства, в состав которых входят один или два (как правило, трехполюсные) контакторы переменного тока. В пускателе могут быть применены тепловые реле.

Номинальные токи пускателей от 2,5 до 150 А. Они обеспечивают управление двигателями мощностью до 75 кВт при напряжении 380 В. Наиболее распространены пускатели типов ПМЕ и ПАЕ.

Пускатели ПАЕ предназначены для двигателей большой мощности. Пускатели серии ПМЕ имеют прямоходовой электромагнит и рассчитаны на токи до 25 А.

В обозначении серии ПМЕ, первая цифра после дефиса указывает величину (габарит) пускателя (0 — нулевая, 1 — первая, 2 — вторая); вторая цифра после дефиса — исполнение для нулевой величины (1, 4, 7 — открытое исполнение с четырьмя замыкающими контактами; 2, 5, 8 — защищенное с четырьмя замыкающими и двумя размыкающими контактами; 3, 6, 9 — пылеводонепроницаемые с четырьмя замыкающими контактами), для других величин 1 — открытое, 2 — защищенное и 3 — пылеводонепроницаемое исполнение; третья цифра после дефиса означает характер вращения электродвигателя, наличие тепловых реле и кнопок управления (1 — одностороннее вращение без реле, 2 — одностороннее вращение с тепловыми реле, 3 — двухстороннее вращение (реверсивное) без реле, 4 — двухстороннее вращение и реле, 5 — одностороннее вращение без реле со встроенным в оболочку кнопками «пуск» и «стоп», 6 — одностороннее вращение с тепловыми реле и встроенными в оболочку кнопками).

В обозначении серии ПАЕ первая цифра после дефиса означает величину пускателя (3, 4, 5 и 6); вторая цифра после дефиса — исполнение (1 — открытое, 2 — защищенное, 3 — пылезащищенное; 4 — пылебрызгонепроницаемое); третья цифра после дефиса — характер вращения электродвигателя, наличие тепловых реле и кнопок управления (расшифровывается аналогично серии ПМЕ).

Тиристорные пускатели. Коммутирующим элементом данных аппаратов является тиристор — простейший управляемый вентиль, представляющий собой четырехслойный полупроводниковый прибор, пропускающий ток в одном направлении.

Тиристор открывается, когда на его управляющий электрод подан небольшой положительный потенциал (4 ... 8 В) по отношению к катоду. После открывания тиристора управляющий сигнал не влияет на состояние тиристора, который остается открытым до тех пор, пока анодный ток практически не снизится до нуля.

В пускателях используют силовые тиристоры серии Т с воздушным охлаждением, выбираемые по току и напряжению.

Тиристор может выдерживать весьма кратковременные (порядка миллисекунд) перегрузки по току. Поэтому допустимый ток перегрузок вентиля должен быть больше пускового, а максимальное допустимое напряжение выбираемого тиристора должно быть не менее амплитудного значения

напряжения, прикладываемого к тиристорному в прямом или обратном направлении. В пускателях, например на номинальный ток 16 А, используют тиристоры, предельный ток которых 160 А.

Тиристорные пускатели имеют следующие преимущества перед электромагнитными: отсутствие искрообразования, высокая механическая прочность и стойкость к воздействию ударов и вибраций, продолжительный срок службы, малое время включения и отключения, бесшумность в работе и малая мощность управления.

В настоящее время промышленность выпускает тиристорные пускатели серии ПТ-16-380-У5, ПТ-40-380-УГ (неревверсивные); и ПТ-16-380 Р-У5 и ПТ-40-380 Р-У5 (реверсивные) на номинальные токи 16 и 40 А.

Тиристорный пускатель состоит из силового блока, основу которого составляют шесть тиристоров, схемы управления, блоков защиты и питания цепей управления.

В случае подачи напряжения и при отсутствии аварийных состояний триод V3 открыт (рисунок 10.3.2). При нажатии кнопки S1 получает питание катушка реле К, контакты которого замыкают цепь управления соответствующими тиристорами. Допустим, что после замыкания контактов К положительная полуволна напряжения сети приложена к аноду тиристора V1. Тогда ток управления, отпирающий этот тиристор, пройдет через диод V6, контакт К, резистор R1, управляющий электрод и катод тиристора V1. С открытием тиристора шунтируется цепь управления. При переходе тока через нуль тиристор V1 закрывается. Следующая полуволна напряжения будет положительной для тиристора V2, ток управления протекает через диод V4, резистор R1, контакт К и управляющий электрод тиристора V2 и т. д.

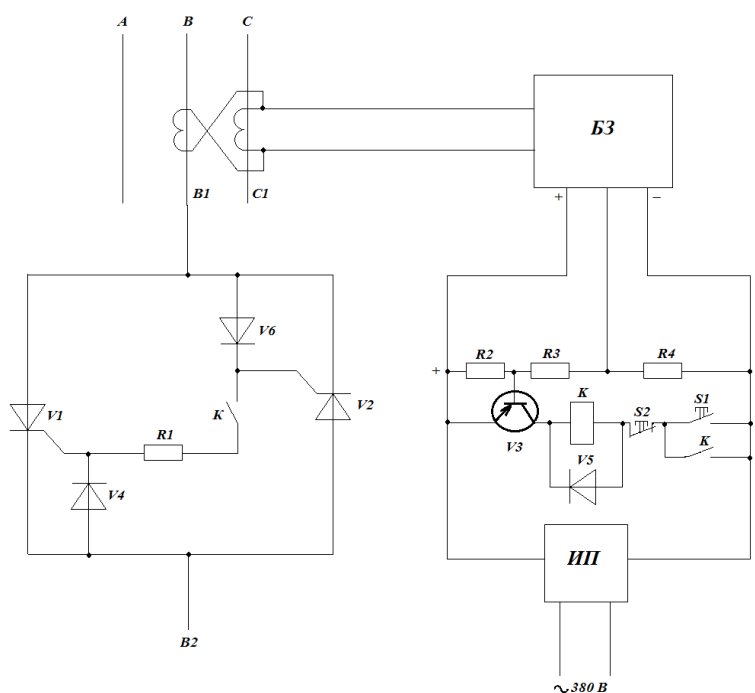


Рисунок 10.3.2 –Функциональная схема тиристорного пускателя

Аналогичным образом развивается процесс и в фазах А и С. Блок токовой защиты БЗ воздействует на схему управления реле К, через свой выход, запирая транзистор V3.

В реверсивных пускателях предусмотрены дополнительные тиристоры для перекрещения фаз и два реле, контакты которых включены в цепь управления соответствующих тиристоров.

Тиристорные пускатели используют для управления нерегулируемыми приводами с высокой частотой включений.

Для этих же целей разработаны гибридные аппараты, основанные на совместном применении контактов и полупроводниковых приборов. Принцип работы данных устройств заключается в шунтировании силовых контактов на период коммутации тиристорами для исключения дугообразования, что приближает электрическую износостойкость контактов к механической, то есть срок службы аппаратов примерно увеличивается на один порядок

Реле управления. Наряду с контакторами и электромагнитными пускателями в схемах автоматического управления электроприводами применяют различного рода реле управления: тока, напряжения, времени и др.

Электромагнитное реле — аппарат, включающий или отключающий электрические цепи управления под воздействием электрических импульсов.

Уставкой реле называют величину напряжения, тока, времени, при которой срабатывает реле и на которую оно отрегулировано.

Напряжение (ток) срабатывания — наименьшее значение этого параметра, при котором начинается и полностью заканчивается втягивание якоря реле.

Напряжение (ток) отпускания — наибольшее значение напряжения (тока), при котором начинается и полностью заканчивается отпадение якоря.

Коэффициент возврата реле — отношение напряжения (тока) отпускания к напряжению (току) срабатывания.

Реле времени. Для получения задержек до 3 мин используют пневматические реле времени типа РВП (рисунок 10.3.3).

Основным элементом реле является замедлитель в виде воздушной камеры 8, разделенной на верхнюю и нижнюю части эластичной мембраной 4. При подаче напряжения на катушку 2 якорь электромагнита (в виде буквы «Т») опускается вниз и втягивается в сердечник 1. При этом вместе с якорем опускается шток 10 -под действием силы собственного веса и пружины 9.

Но это процесс происходит медленно, по мере заполнения верхней части воздушной камеры 8 наружным воздухом через калибровочное дроссельное отверстие 6.

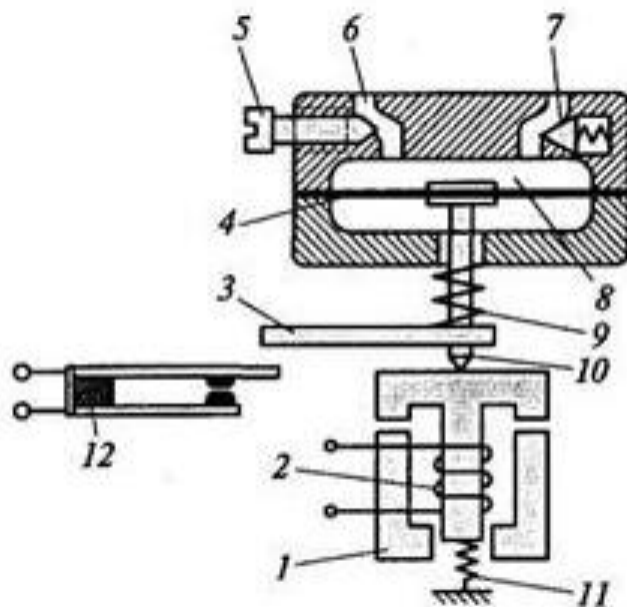


Рисунок 10.3.3 – Пневматическое реле времени

1- сердечник электромагнита; 2 – катушка электромагнита; 3 – рычаг электромагнита; 4 – мембрана; 5 – регулировочный винт; 6 – калибровочное дроссельное отверстие; 7 – обратный клапан; 8 – камера воздушная; 9 – пружина; 10 – шток; 11 – возвратная пружина; 12 – контакты.

Когда шток 10 опустится на якорь электромагнита (в виде буквы «Т»), он своим рычагом 3 надавит на верхний подвижный контакт 12, который замкнется с нижним контактом.

Таким образом происходит замедление при срабатывании реле (при подаче питания на катушку электромагнита).

При снятии питания с катушки электромагнита якорь (в виде буквы «Т») вместе со штоком 10 под действием возвратной пружины 11 поднимется, т.е. вернется в исходное положение. Этот процесс проходит быстро, благодаря открытию обратного клапана 7, так что воздух из камеры 8 будет выходить не только через отверстие 6, но и через отверстие обратного клапана 7.

Уставка времени срабатывания реле выполняется посредством винта 5, путем изменения размера дроссельного отверстия 6: чем меньше отверстие, тем больше время срабатывания.

Промышленность выпускает пневматические реле типа РВП (Р – реле, В – времени, П – пневматическое) с замедлением до 180 с.

Помимо пневматических реле, выпускают двигательные реле, выдержка времени которых может достигать нескольких часов.

Реле с магнитоуправляемыми контактами. Широкое распространение получили язычковые (герконные) реле, представляющие собой катушку, внутри которой установлены герметичные магнитоуправляемые контакты.

Принцип работы реле заключается в следующем (рисунок 10.3.4). при протекании постоянного тока по катушке 3 магнитные силовые линии

намагничивают контакты 2, помещенные в стеклянный баллон 1. Контакты притягиваются и замыкают цепь тока.

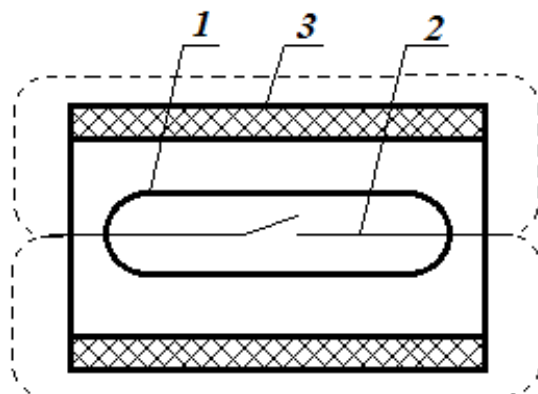


Рисунок 10.3.4 –Реле с магнитоуправляемыми контактами

Существует несколько серий реле с магнитоуправляемыми контактами: промежуточные РПГ, РЭС и РТГ.

Герконные реле выпускаются на номинальные напряжения 12 и 24 В постоянного тока.

Исполнения реле различаются по числу контактов, числу обмоток в катушке, номинальному напряжению.

Основными преимуществами язычковых реле по сравнению с малогабаритными и миниатюрными герметичными якорными реле являются: большая механическая износостойкость контактов (до 10 включений), более высокая надежность, меньшее время срабатывания и отпускания, меньшая мощность срабатывания и более простая конструкция.

Реле серии РТГ (реле токовое, герконное) выполняются на номинальный ток от 1,6 до 630 А.

Контакторы КМГ 14 предназначены для коммутации силовых электрических цепей вплоть до осуществления частых пусков и остановок двигателей переменного тока мощностью до 1,1 кВт.

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал:

- устройство, принцип действия и типы магнитных пускателей и контакторов;
- основные параметры магнитного пускателя.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения графика.

Работа в лаборатории

Лабораторная установка. При испытании магнитного пускателя напряжение регулируют при помощи лабораторного автотрансформатора ЛАТР. К его выходу подключают измерительный прибор К 505, а к выходу прибора подключают магнитный пускатель. Для контроля работы аппаратов используют сигнальную лампу, которая включается в сеть через замыкающий контакт магнитного пускателя.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия аппаратуры управления и защиты, записать основные паспортные данные и технические характеристики.
2. Собрать электрическую схему (рисунок 10.3.5) для испытания магнитной системы пускателя на переменном токе.

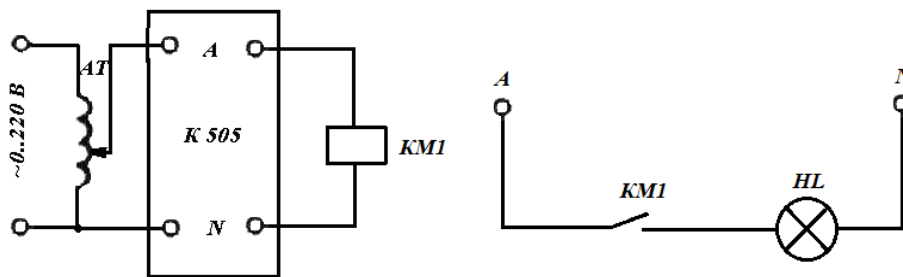


Рисунок 10.3.5 – Испытание магнитного пускателя на переменном токе

3. Плавно увеличивая напряжение на катушке электромагнитного пускателя до номинального значения, измерить и записать в таблицу 10.3.1 показания приборов (не менее 7 измерений). Измерить значения тока при разомкнутой (один раз) и замкнутой (три раза) магнитной системе на границе напряжения втягивания якоря. У пускателя с катушкой на постоянном токе влияние индуктивного сопротивления исключается.

Значения токов при разомкнутой и замкнутой магнитной системе берутся по границе срабатывания аппарата. При малых значениях напряжения на катушке пускателя магнитная система будет разомкнутой, индуктивное сопротивление малым, а ток большим. Поэтому в цепь включается миллиамперметр на большие пределы измерения. При замыкании магнитной системы сопротивление в цепи катушки резко возрастает (за счет индуктивной составляющей), а ток уменьшается.

Таблица 10.3.1-Результаты измерения напряжения и тока срабатывания

Номер измерения	Ток переменный		Ток постоянный	
	U, В	I, А	U, В	I, А
1				
2				
...				
6				
7				
Напряжение и ток срабатывания $U_{CP}, В; I_{CP}, А$				

4. Уменьшая напряжение на катушке пускателя, замерить и записать в таблицу 10.3.2 значения напряжения отключения.

Таблица 10.3.2-Результаты измерения напряжения и тока отпускания

Номер измерения	Ток переменный		Ток постоянный	
	U, В	I, А	U, В	I, А
1				
2				
...				
6				
7				
Напряжение и ток отпускания $U_{OT}, В; I_{OT}, А$				

5. По результатам измерений построить вольтамперные характеристики пускателей с катушками на постоянном и переменном токе (в одной координатной системе).

6. Рассчитать коэффициенты возврата и кратность пускового тока катушек. Результаты расчетов внести в таблицу 10.3.3

7. Собрать электрическую схему (рисунок 10.3.6) для испытания магнитной системы пускателя на постоянном токе. Повторить опыты при питании катушки магнитного пускателя постоянным током.

Таблица 10.3.3-Результаты вычислений коэффициента возврата и кратности пускового тока

Номер измерения	Ток переменный	Ток постоянный
Напряжение срабатывания $U_{CP}, В$		
Напряжение отпускания $U_{OT}, В$		
Ток срабатывания $I_{CP}, А$		
Ток срабатывания $I_{OT}, А$		
Коэффициент возврата, $K_B = U_{OT} / U_{CP}$ ($K_B = I_{OT} / I_{CP}$)		
Кратность пускового тока, $K_I = I_{CP} / I_{OT}$		

8. Плавно увеличивая напряжение на катушке электромагнитного пускателя до номинального значения, замерить и записать в таблицу 10.3.1 показания приборов (не менее 7 измерений). Замерить значения тока при разомкнутой (один раз) и замкнутой (три раза) магнитной системе на границе напряжения втягивания якоря. У пускателя с катушкой на постоянном токе влияние индуктивного сопротивления исключается.

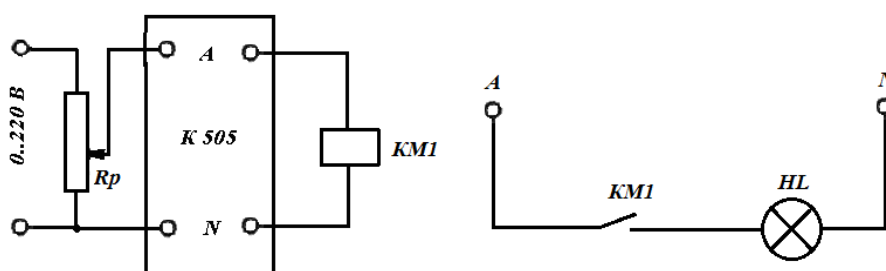


Рисунок 10.3.6 - Испытание магнитного пускателя на постоянном токе

9. Уменьшая напряжение на катушке пускателя, замерить и записать в таблицу 10.3.2 значения напряжения отключения.

10. По результатам измерений построить вольтамперные характеристики пускателей с катушками на постоянном и переменном токе (в одной координатной системе).

11. Рассчитать коэффициенты возврата и кратность пускового тока катушек. Результаты расчетов внести в таблицу 10.3.3.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение магнитного пускателя?
2. Как устроен магнитный пускатель?
3. Что такое «величина» магнитного пускателя?
4. По какому параметру существует градация магнитных пускателей?
5. Каково назначение короткозамкнутого медного витка в магнитопроводе магнитного пускателя?
6. Как отличаются магнитные пускатели по числу контактов?
7. Какую защитную функцию выполняет магнитный пускатель?
8. Начертите функциональную схему тиристорного пускателя и объясните его устройство.
9. Какое напряжение называют напряжением срабатывания?
10. Какое напряжение называют напряжением отпускания?
11. Как определяется коэффициент возврата?
12. От какого параметра зависит сопротивление катушки магнитного пускателя?

Лабораторная работа №4

Тема: Исследование средств защиты электродвигателя

Цель работы: Изучить устройство, принцип действия и технические характеристики аппаратов защиты электроприводов от ненормальных условий. Исследовать защитные характеристики теплового реле и автоматического выключателя.

Теоретические сведения

Автоматические выключатели. Автоматические выключатели используют для защиты электрических установок от недопустимых перегрузок и токов короткого замыкания, а также для защиты и нечастых пусков трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутый ротором.

Автоматические выключатели различаются: *по числу полюсов* (одно-, двух- и трехполюсные); *роду тока* (переменного и постоянного); *типу расцепителя* (тепловой, электромагнитный, комбинированный) и по номинальному току.

Автоматы серии АП50 выпускаются с регулируемыми электромагнитными и тепловыми расцепителями (исполнение МТ), только тепловыми (Т) и только электромагнитными (М) расцепителями в двух- и трехполюсном исполнении на номинальные токи уставок от 1,6 до 50 А.

Автоматический выключатель (рисунок 10.4.1) состоит из следующих элементов: корпуса, дугогасительных камер, механизма управления, коммутирующего устройства, расцепителей.

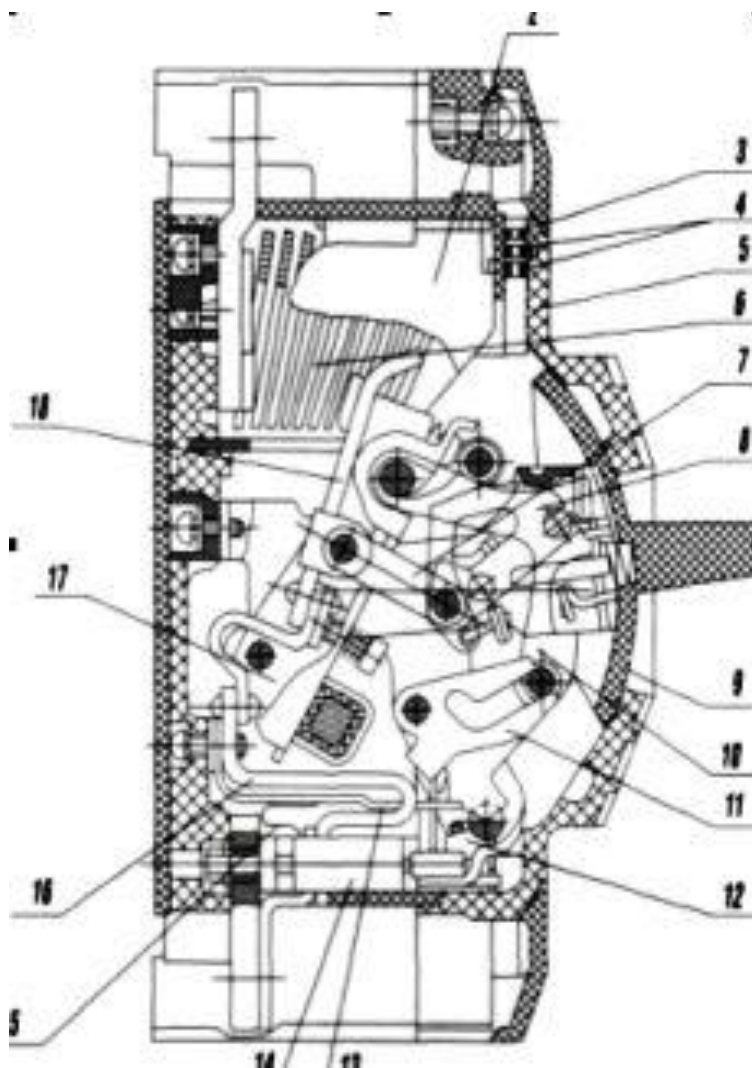


Рисунок 10.4.1-Автоматический выключатель, серия ВА 04-36 (устройство выключателя): 1- основание, 2- камера дугогасительная, 3, 4-пластины искрогасительные, 5-крышка, 6-пластины. 7-звено, 8-звено, 9-рукоятка, 10-рычаг опорный, 11-защелка, 12- рейка отключающая, 13- пластина термобиметаллическая, 14-расцепитель элетромагнитный, 15 -проводник гибкий, 16-токопровод, 17- контактодержатель, 18-контакты подвижные

Механизм свободного расцепления обеспечивает мгновенное размыкание контактов с постоянной скоростью, не зависящей от скорости движения кнопки отключения. Тепловые расцепители срабатывают с обратной зависимостью от тока выдержкой времени. Электромагнитные расцепители срабатывают мгновенно при токах, больших тока уставки (на 15%). Гибкие проводники соединяют подвижные контакты с тепловыми расцепителями, которые, в свою очередь, соединены с электромагнитными расцепителями.

Держатели подвижных контактов монтируются на изоляционной траверсе, кинематически связанной с механизмом свободного расцепления и кнопками «включение» и «отключение». Контакты каждого полюса заключены в дугогасительную камеру. Гашение дуги в камере происходит в результате ее дробления поперечными стальными пластинами и деионизации.

Расцепители при срабатывании воздействуют на общую для всех полюсов отключающую рейку. Механизм свободного расцепления срабатывает, и все полюса автомата одновременно размыкаются.

Автомат имеет приспособление для регулировки тока уставки. Перемещением рычага ток уставки может быть уменьшен до номинального тока следующей по шкале уставки с точностью до 20%. Например, уставку на 25 А можно снизить до 16 А, а уставку с 17 А до 10 А и т. д.

Электромагнитные расцепители снабжены указателем, позволяющим за счет сжатия пружины увеличить ток срабатывания до 40%.

Условное обозначение серии расшифровывается следующим образом: буква А — автомат, П — промышленный, 50 — значение наибольшего номинального тока (в амперах), цифра после тире — число расцепителей, буква М — наличие электромагнитного расцепителя, Т — теплового, МТ — комбинированного.

Автоматы серии АК50 вместо теплового расцепителя имеют гидравлический замедлитель. Однополюсные автоматические выключатели типа АБЗ служат для защиты цепей управления и электродвигателей постоянного тока от коротких замыканий с номинальным током до 25 А, могут иметь гидравлический замедлитель и электромагнитный расцепитель.

Автоматы серии АЗ100 выпускают на номинальный ток свыше 50 А.

Автоматические выключатели серии АЕ-20 служат для защиты от перегрузки и токов короткого замыкания, включения и отключения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором при нечастых пусках.

Автоматы серии АЕ-20 выпускаются с номинальным током теплового расцепителя от 0,32 до 100 А, серии АЕ-2010 до 10 А, серии АЕ-2030 до 25 А, а серии АЕ-2050 до 100 А.

Тепловой расцепитель с кратностью тока уставки 1,1 не срабатывает в течение часа, кратности 1,35 срабатывает в течение 30 мин, а при кратности 6 срабатывает в течение 2 ... 10 с.

Электромагнитный расцепитель отключает автомат в течение 0,02 с, если ток больше тока уставки. Автоматические выключатели могут также иметь расцепители минимального напряжения (Н).

В настоящее время распространены автоматические выключатели типов АП50Б, АЕ10, АЕ20, АЕ20М, ВА04-36, ВА-47, ВА-51, ВА-201, ВА88 и др. Автоматические выключатели АП50Б выпускают на номинальные токи до 63А, АЕ20, АЕ20М – до 160А, ВА-47 и ВА-201 – до 100А, ВА04-36 – до 400 А, ВА88 – до 1600А.

Ток уставок электромагнитных, комбинированных и тепловых расцепителей автоматических выключателей выбирают по следующим выражениям.

1. Номинальный ток электромагнитного или комбинированного расцепителя автоматических выключателей I_{Σ} выбирают по длительному расчетному току линии:

$$I_{\Sigma} \geq I_{\text{дл}} \quad (10.4.1)$$

2. Ток срабатывания отсечки электромагнитного или комбинированного расцепителя $I_{\text{ср.}\Sigma}$ проверяется по максимальному кратковременному току линии:

$$I_{\text{ср.}\Sigma} \geq 1,25 I_{\text{кр}} \quad (10.4.2)$$

Для ответвления к одиночному электродвигателю максимальный кратковременный ток линии равен пусковому току электродвигателя.

3. Ток срабатывания расцепителя автоматического выключателя с регулируемой характеристикой, обратно зависимой от тока:

$$I_{\text{ср.р}} \geq 1,25 I_{\text{дл}} \quad (10.4.3)$$

4. Номинальный ток защищаемого от перегрузки теплового расцепителя автомата выбирается только по длительному расчетному току линии:

$$I_{\text{н}} \geq I_{\text{дл}} \quad (10.4.4)$$

Тепловые реле и температурная защита. Тепловые реле служат для защиты электродвигателя от небольших, но длительных перегрузок. Хорошо отрегулированное реле может защитить трехфазный электродвигатель от работы на двух фазах.

Тепловое реле любого типа имеет нагревательный элемент из нихромовой проволоки или ленты, биметаллическую пластину, контакты с пружиной и защелкой, и регулятор тока срабатывания.

Тепловые реле бывают *прямого* и *косвенного действия*. Реле, встраиваемые в магнитные пускатели, представляют собой реле косвенного действия, так как их контакты включаются в цепь втягивающей катушкой.

По способу нагрева биметаллической пластины тепловые реле могут быть с прямым, косвенным или комбинированным нагревом.

Принцип действия теплового реле заключается в том, что ток электродвигателя, протекая по нагревательному элементу вызывает нагрев биметаллической пластинки. Параметры подбираются таким образом, что при протекании тока, превышающего установленную величину, она изгибается и отключает размыкающие контакты.

Основное требование, предъявляемое к тепловой защите, заключается в том, что она должна сработать при перегрузках двигателя выше 20 % в течение не более 20 минут с момента достижения тепловым реле установившейся температуры в результате нагрева номинальным током.

Защитные характеристики тепловых реле имеют следующий вид, представленный на рисунке 10.4.2.

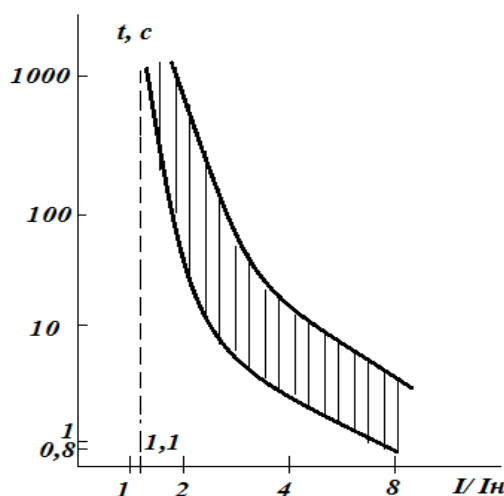


Рисунок 10.4.2 - Защитные характеристики тепловых реле

Характеристика показывает, при малых перегрузках, например в 1,1 раза, тепловое реле срабатывает через 300-400 секунд (5-7 минут), в то время как при перегрузках в 3 раза, оно срабатывает за 4-6 секунд (после достаточного нагрева номинальным током).

Основной рабочий орган теплового реле — *биметаллическая пластина*, которая при нагреве изгибается и переводит контактную систему в отключенное состояние. Пластина состоит из двух прочно соединенных между собой разнородных металлов, которые обладают различными коэффициентами линейного расширения при нагреве.

На рисунке 10.4.3 показана конструктивная схема реле. Биметаллическая пластина 3 упирается в верхний конец пружины 2. Нижний конец пружины давит на выступ 5 пластмассовой колодки, которая может поворачиваться вокруг оси 0. На рисунке положение пластины 1 соответствует ее холодному состоянию. Подвижный контактный элемент и неподвижный 1 замкнуты. При увеличении тока до значения, превосходящего допустимое, нагревательный элемент сообщает биметаллической пластине 3 такое количество тепла, что она изгибается и занимает крайнее положение (как показано стрелкой), в это же положение переходит и верхний конец пружины 2.

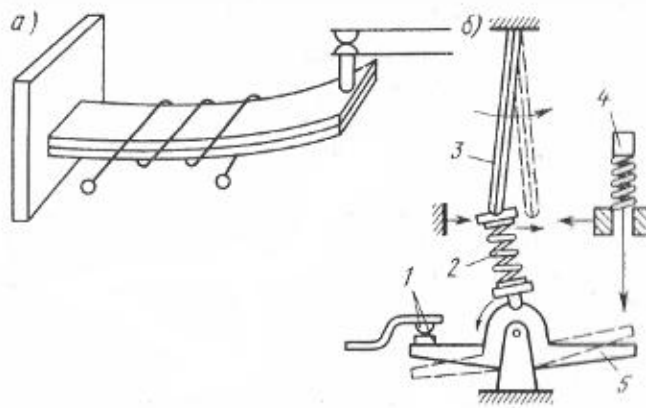


Рисунок 10.4.3 Тепловое реле (конструктивная схема):
 а) –чувствительный элемент; б) –прыгающий контакт;
 1 –контакты; 2 –пружина; 3 –биметаллическая пластина;
 4 – кнопка, 5 – мостик.

Возврат реле в исходное положение самопроизвольное или при помощи кнопки самовозврата.

Выпускаются тепловые реле типов ТРН, ТРП, РТТ и РТЛ. Наиболее распространенные реле типа ТРН, они устанавливаются в магнитных пускателях от нулевой до третьей величины. Реле ТПР однополюсные, РТТ и РТЛ –трехполюсные.

Наиболее совершенное реле типа РТТ на токи от 0,2 до 630 А.

Реле представляет собой пластмассовый корпус, имеющий четыре ячейки. В трех ячейках размещаются термоэлементы с нагревателями и выводами, а в четвертой — исполнительный механизм, связанный с термоэлементами подвижными планками.

Особенностью реле ТРЛ является то, что у него имеется температурная компенсация, учитывающая температуру окружающей среды и выполнена на базе биметаллической пластины с обратным прогибом по отношению к основной пластине.

Все тепловые реле имеют устройства для регулирования тока уставки. У реле ТРН и ТРП регулятор может поворачиваться от нейтрального положения на ± 5 делений. Каждое деление соответствует 5 % тока нагревательного элемента, поэтому при определенном нагревательном элементе можно добиться уменьшения (или увеличения) на 25 % тока срабатывания, тем самым подгоняя его как можно ближе к току двигателя, т.е. добиваясь четкости работы тепловой защиты.

В основе выбора теплового реле лежит соответствие номинального тока его нагревательного элемента номинальному току двигателя.

Тепловые реле эффективно работают только в том случае, если проводится регулярная их настройка при изменении внешних температур и если нагревательные элементы строго соответствуют параметрам защищаемого электродвигателя.

Отсутствие в некоторых случаях технической возможности постоянно настраивать тепловую защиту, а также большое количество электроприводов вынуждают использовать так называемую **встроенную температурную защиту**, чувствительный орган которой по своим тепловым параметрам является моделью обмоток защищаемого электродвигателя. Температурная защита состоит из температурных датчиков и управляющего устройства.

Температурными датчиками служат полупроводниковые терморезисторы-позисторы, встроенные в лобовую часть обмотки статора (по одному в каждую фазу).

Наибольшее практическое применение для датчиков встроенной температурной защиты находят позисторы СТ14-1А ($t_{cp} = 130^{\circ}\text{C}$) или СТ14-15 ($t_{cp} = 105^{\circ}\text{C}$), изготавливаемые в виде дисков диаметром 3 мм и толщиной 1,5 мм. На температурных характеристиках позисторов (рисунок 10.4.4, а) виден почти скачкообразный характер изменения сопротивления в узких интервалах критических температур.

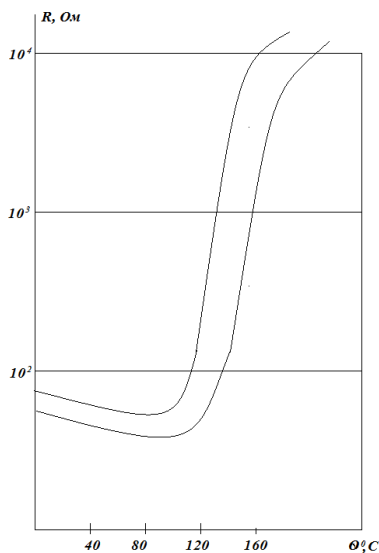
Позисторы размещают в обмотках двигателя — по одному в каждой фазе.

Блок питания (рисунок 10.4.4, б) содержит мостовую выпрямительную схему на диодах V1...V4, стабилитрон V5, поддерживающий напряжение питания температурного реле на неизменном уровне, и цепочку R1, C1, R2.

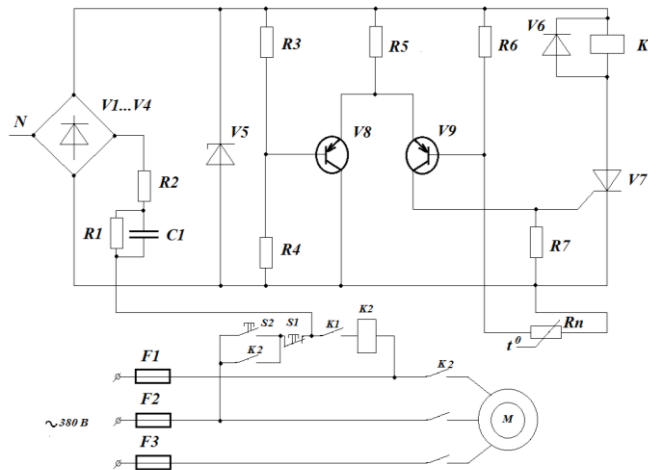
В температурное реле входят транзисторы V8, V9 и резисторы R3...R6. Резисторы R3, R4, R6 совместно с позисторами Rп образуют делители напряжений, определяющие потенциалы базы транзисторов V8 и V9 и температуру срабатывания устройства защиты. Резистор R5 является общей нагрузкой для транзисторов V8 и V9. Резистор R7 определяет уровень входного сигнала тиристора V7.

С коллектора транзистора V9 сигнал подается на управляющий электрод тиристора, включенного в цепь катушки электромагнитного реле.

При нажатии кнопки S1 подается напряжение питания. Если температура обмотки электродвигателя ниже рабочей температуры термодатчиков, то их сопротивление будет немного меньше сопротивления срабатывания. В этом случае транзистор V8 будет закрыт, а транзистор V9 — открыт. Таким образом, ток будет протекать только через транзистор V9 и управляющий переход тиристора V7. Тиристор и реле включатся, и контакты реле замкнут цепь катушки пускателя. При повышении температуры обмотки статора сверх допустимого значения сопротивление термодатчиков резко возрастает и транзистор V9 запирается, а V7 открывается. Управляющий переход тиристора V7 при этом обесточивается. В момент, когда двухполупериодное выпрямленное напряжение проходит через нулевое значение, тиристор запирается, реле теряет питание и двигатель отключается.



а)



б)

Рисунок 10.4.4-Температурная защита электродвигателей

При выходе из строя датчиков температуры или обрыве цепи их соединения с управляющим устройством последнее не позволяет включить электродвигатель в сеть.

Датчики температуры в асинхронный двигатель, устанавливают в заводских условиях при его изготовлении или капитально ремонте.

Конструктивно управляющее устройство смонтировано в пластмассовом корпусе и соединяется с датчиком изолированным проводом.

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал:
 - устройство, принцип действия и типы автоматических выключателей;
 - устройство, принцип действия и типы тепловых реле.
2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения графика.

Работа в лаборатории

Лабораторная установка.

При испытании защитных аппаратов напряжение регулируют при помощи лабораторного автотрансформатора ЛАТР. К его выходу подключают измерительный прибор К 505, а к выходу прибора подключают защитный аппарат. Предел измерения по току выбирают в соответствии с максимальным током, проходящем через защитный аппарат. При номинальном токе уставки, равном, например, 2 А, предел измерения составляет 0...10 А.

Для контроля работы аппаратов используют сигнальную лампу, которая включается в сеть через размыкающий контакт теплового реле или замыкающий контакт автоматического выключателя.

Время срабатывания тепловых расцепителей определяют при помощи секундомера. Опыт выполняют при нагретом расцепителе, поэтому первое показание в отчет не записывают.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия средств защиты электроприводов, записать основные паспортные данные и технические характеристики.
2. Собрать электрическую схему (рисунок 10.4.5) для снятия защитных характеристик теплового реле.

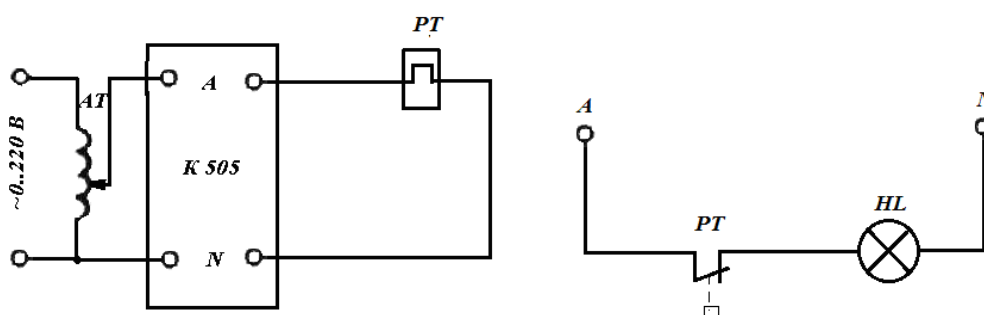


Рисунок 10.4.5 -Электрическая схема исследования теплового реле

3. Установить номинальную нагрузку на тепловое реле и прогреть его в течение 20 минут.
4. Установить нагрузку на 10 % больше номинального значения и после срабатывания теплового реле определить время срабатывания по секундомеру. Результаты измерений занести в таблицу 10.4.1.

Таблица 10.4.1 Результаты исследования теплового реле

Превышение нагрузки более номинальной, %	Измерения		Вычисления
	Ток нагрузки I, А	Время отключения t, с	Кратность тока нагрузки
0			
10			
20			
30			
40			

5. Снять нагрузку, охладить реле и проделать несколько опытов при нагрузках на 20, 30, 40 % более номинальной. Результаты измерений записать в таблицу 10.4.1.
6. По данным таблицы 10.4.1 построить ампер–секундную характеристику теплового реле.
7. Собрать электрическую схему (рисунок 10.4.6) для снятия защитных характеристик теплового реле.
8. Установить номинальную нагрузку на автоматическом выключателе и прогреть его в течение 20 минут.
9. Установить нагрузку на 35 % больше номинального значения и после срабатывания автоматического выключателя определить время срабатывания по секундомеру. Результаты измерений занести в таблицу 10.4.2.

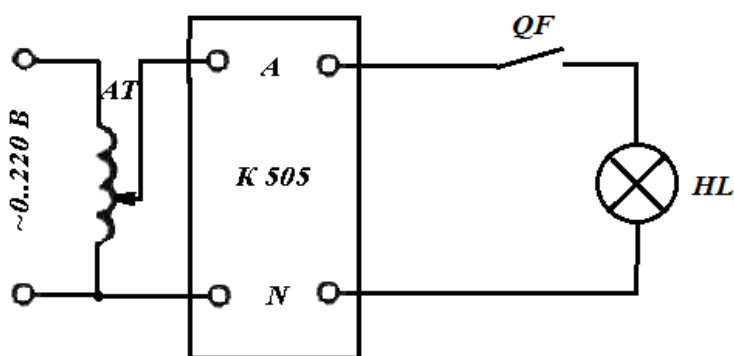


Рисунок 4.6-Электрическая схема исследования автоматического выключателя

Таблица 10.4.2-Результаты исследования автоматического выключателя

Превышение нагрузки более номинальной, %	Измерения		Вычисления
	Ток нагрузки I, А	Время отключения t, с	Кратность тока нагрузки
35			
40			
100			
500 (в 6 раз)			

10. Снять нагрузку, охладить автоматический выключатель и проделать несколько опытов при нагрузках на 40, 50, 100 % более номинальной. Результаты измерений записать в таблицу 10.4.2.
11. Установить нагрузку в 6 раз больше номинального значения и после срабатывания автоматического выключателя определить время срабатывания по секундомеру. Результаты измерений занести в таблицу 10.4.2.

12. Построить ампер–секундную характеристику автоматического выключателя.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен автоматический выключатель?
2. Как классифицируются автоматические выключатели?
3. Для чего предназначен электромагнитный расцепитель автоматического выключателя?
4. Для чего предназначен тепловой расцепитель автоматического выключателя?
5. Для чего предназначен комбинированный расцепитель автоматического выключателя?
6. Как устроен электромагнитный расцепитель автоматического выключателя?
7. Как устроен тепловой расцепитель автоматического выключателя?
8. Какой элемент теплового реле является основным?
9. Каков принцип действия биметаллической пластины?
10. Какие устройства служат для защиты двигателей от перегрузок?
11. Возможна ли регулировка тока срабатывания защитных аппаратов?

Лабораторная работа №5

Тема: Исследование блокировочных связей и сигнализации в схемах управления электроприводом

Цель работы: Изучить назначение и способы выполнения блокировок и сигнализации в схемах управления электроприводом.

Теоретические сведения

Узлы блокировок. Блокировочные связи в схемах автоматического управления электроприводами обеспечивают необходимую последовательность включения и отключения отдельных ее элементов. Наличие блокировок предотвращает повреждение отдельных частей механизмов, работающих согласованно, устраняет опасность выхода из строя оборудования в результате неправильных действий обслуживающего персонала и повышает надежность установки в целом.

Блокировка замыкающего контакта пусковой кнопки обеспечивает питание контактора при опускании кнопки. Такая блокировка предотвращает самозапуск механизма при внезапных исчезновениях и появлениях питающего напряжения, что исключает возможность несчастных случаев, например при профилактических осмотрах и ремонте механизмов. *Блокировка реверсивных контакторов и магнитных пускателей* исключает одновременные включения контакторов при заедании или залипании подвижной части аппаратуры, при неправильных действиях с кнопками и т. д.

В схеме на рисунке 10.5.1,а предусматривается включение второго электродвигателя (контактор К2) только после включения первого (контактор К1). Блокировочная связь, посредством которой выполняется это условие, осуществляется включением замыкающего блок-контакта К1 в цепь катушки контактора К2.

На рисунке 10.5.1,б изображена схема управления, предусматривающая только одновременную работу двух двигателей. Блокировочная связь в этой схеме осуществляется замыкающим блок-контактом контактора К1 в цепи катушки К2, а замыкающим блок-контактом К2, включенным параллельно контакту кнопки S1. При нажатии кнопки S1 включится контактор К1, который, закрыв свой блок-контакт, подаст напряжение на катушку контактора К2. Контактор К2, сработав, зашунтирует своим блок-контактом кнопку S1 и создаст цепь независимого питания катушки К1. Если по каким-либо причинам контактор К2 не включится, то кнопка S2 не будет зашунтирована и после ее отпущения вся схема выключится.

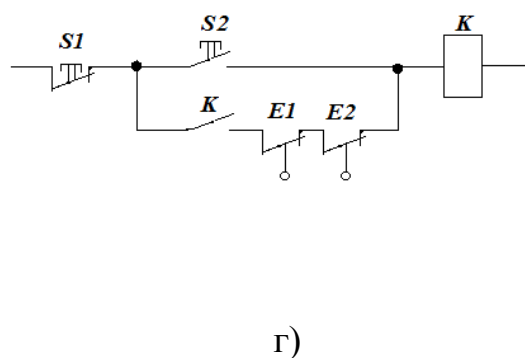
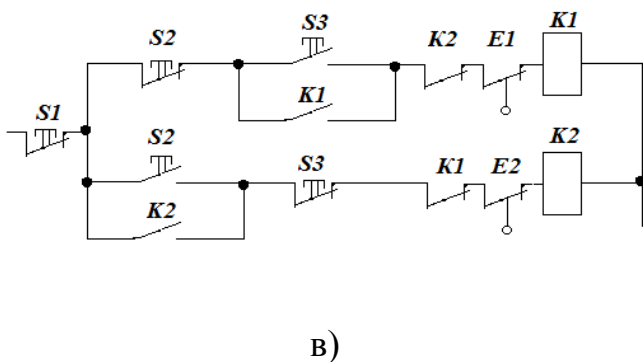
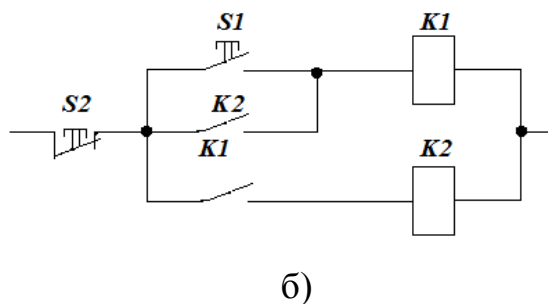
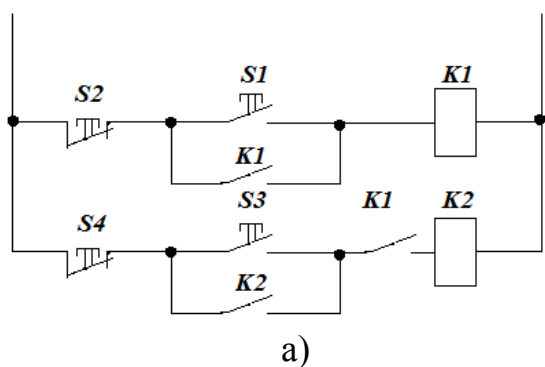


Рисунок 10.5.1-Блокировочные связи в в схемах управления

Путевые блокировки ограничивают ход рабочего органа механизма при помощи путевых и конечных выключателей. Они предупреждают повреждение механизма и обеспечивают высокую точность выполнения технологической операции.

На рисунке 10.5.1,в изображена схема управления реверсивным электроприводом с ограничением перемещения рабочего механизма. Это

ограничение достигается установкой в необходимых местах конечных выключателей E1 и E2, размыкающие контакты которых находятся в цепи катушек соответствующих контакторов.

При включении рабочим механизмом какого-нибудь конечного выключателя электродвигатель останавливается, и повторный пуск его может быть осуществлен только в обратном направлении. Схема, показанная на рисунке 10.5.1,г, позволяет автоматически останавливать механизм в двух заданных точках. Достигается это установкой путевых выключателей E1 и E2, размыкающие контакты которых включаются последовательно с блок-контактом К, шунтирующим кнопку S2. После пуска двигателя механизм приходит в движение и при достижении места остановки нажимает на путевой выключатель, например E1, и электродвигатель останавливается. После выполнения необходимой технологической операции вновь нажимают кнопку S2 и механизм продолжает дальнейшее движение.

Сигнализация, применяемая в электрических схемах электропривода, служит для контроля наличия сигнала, например напряжения, технического состояния и положения включающих и отключающих аппаратов, последовательности операций, совершаемых схемой электропривода и для контроля аварийного состояния схемы.

Световая сигнализация осуществляется при помощи различной сигнальной арматуры: табло, транспорантов, семафоров. При этом световой сигнал может быть воспроизведен ровным или мигающим светом, а также свечением ламп неполным накалом. В некоторых случаях сигнализация о срабатывании защиты может быть выполнена при помощи специальных сигнальных указательных реле-блинкеров.

Звуковая сигнализация выполняется при помощи звонков, гудков и сирен.

Сигнализация по назначению может быть разделена на две основные группы:

- сигнализация положения (состояния)—для информации о состоянии технологического оборудования, например включено — отключено;
- предупреждающая и аварийная — для информации об отключениях наиболее важных объектов, например вентиляции или отклонении технологического процесса от заданного хода.

Сигнализация положения выполняется для механизмов, которые имеют два или более рабочих положения. Наиболее распространены две структуры построения схем сигнализации положения (состояния) технологических механизмов:

- схемы сигнализации, совмещенные со схемами управления;
- схемы сигнализации с независимым от схем управления питанием на группу технологических механизмов одного или разного назначения.

Схемы сигнализации, совмещенные со схемами управления, как правило, выполняют в том случае, если полезная площадь щитов и пультов позволяет применить сигнальную аппаратуру без ограничения ее размеров и допускающую прямое питание от цепей управления. Сигнализация положения

(состояния) технологических механизмов в таких схемах может осуществляться одним или двумя световыми сигналами.

На рисунке 10.5.2 приведены три схемы включения сигнальных ламп. В первом случае (рисунок 10.5.2,а) лампа горит, когда магнитный пускатель К включен: неисправность лампы равносильна ложному сигналу, так как погашенная лампа сигнализирует об отключении. От этого недостатка свободна схема с двумя лампами (рисунок 10.5.2,б). В любом положении магнитного пускателя одна из ламп горит (Н1 — пускатель включен, Н2 — пускатель отключен). Если обе же лампы погашены, то сигнализация неисправна.

На рисунке 10.5.2,в показана схема одноламповой сигнализации. Когда пускатель включен, лампа горит полным накалом, если отключен — неполным благодаря диоду V.

Схемы предупреждающей и аварийной сигнализаций, предназначенных для оповещения обслуживающего персонала о нарушении нормального хода процесса, воспроизводятся ровным или мигающим светом и сопровождаются, как правило, звуковым сигналом. Наиболее распространены схемы сигнализации с центральным съемом звукового сигнала. Они дают возможность принимать новый звуковой сигнал до размыкания контактов, вызвавших появление предыдущего сигнала.

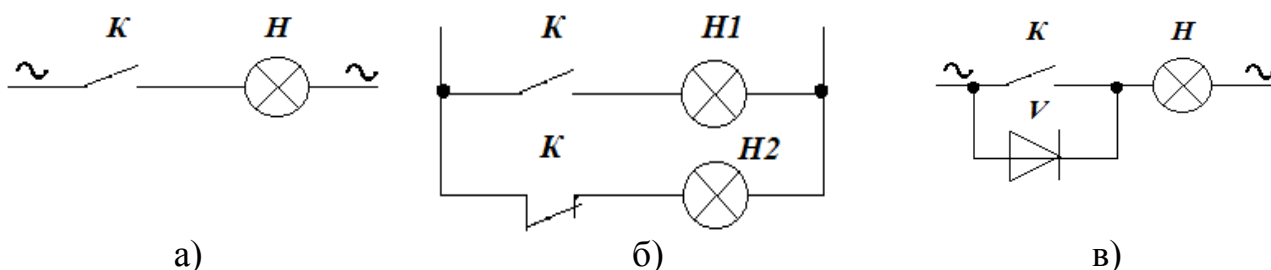


Рисунок 10.5.2-Схемы включения сигнальных ламп.

Мнемосхемы. На рабочих плоскостях щитов и пультов управления сложными технологическими процессами часто размещают мнемосхемы — комплекс символов, изображающих элементы дистанционного управления объекта: заслонки, клапаны, задвижки, шиберы, насосы, вентиляторы и т. п.

Мнемосхемы бывают *мимическими* (несветящимися) и *световыми*. В мимических мнемосхемах оборудование и соединительные связи изображаются сплошными накладными плитками. Между изображением оборудования располагаются сигнальные лампы.

В световой мнемосхеме все контролируемые и управляемые узлы объекта и связи между ними отображаются световыми символами различных цветов.

Световая сигнализация обобщенной мнемосхемы осуществляется по вызову оператора посредством клавиатуры, совмещенной с групповой сигнализацией (в одной арматуре сигнальная лампа и клавиша).

Приход известительного сигнала о нарушении технологического процесса сопровождается звуковой сигнализацией и мигающим светом кнопки-лампы, символизирующей комплект контролируемого оборудования.

Оператор *квитирует* (гасит) звуковой сигнал нажатием светящейся кнопки, при этом на обобщенной мнемосхеме воспроизводится состояние контролируемого пункта и причина, вызвавшая предупредительный сигнал. Кнопка, светящаяся до этого мигающим светом, горит ровным светом до тех пор, пока не будет устранено нарушение режима.

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал:

- блокировочные связи и сигнализации в схемах управления электродвигателей;
- устройство магнитных пускателей, их принцип действия;
- изучить действие электрических и механических блокировок, выполненных в магнитных пускателях.

Работа в лаборатории

Лабораторная установка. Лабораторная установка состоит из двух асинхронных двигателей с к.з. ротором, магнитных пускателей и кнопочных станций.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с оборудованием электроприводов, записать основные паспортные данные и технические характеристики электродвигателей и магнитных пускателей в таблицу 10.5.1.

Таблица 10.5.1-Технические характеристики электродвигателей и аппаратуры управления

Двигатель №1		Двигатель №2		Магнитный пускатель	
Тип двигателя		Тип двигателя		Тип магнитного пускателя	
Номинальная частота вращения двигателя n_2 , об/мин		Номинальная частота вращения двигателя n_2 , об/мин		Номинальный ток, А	
Номинальная мощность двигателя $P_{ном}$, кВт		Номинальная мощность двигателя $P_{ном}$, кВт		Максимальная мощность, кВт	
КПД двигателя η		КПД двигателя η		Величина	
Коэффициент мощности $\cos\varphi_2$		Коэффициент мощности $\cos\varphi_2$		Вид расцепителя	
				Номинальный ток расцепителя, А	

2. Собрать электрическую схему управления с блокировочной связью, предусматривающей включение второго электродвигателя только после первого (рисунок 10.5.3).

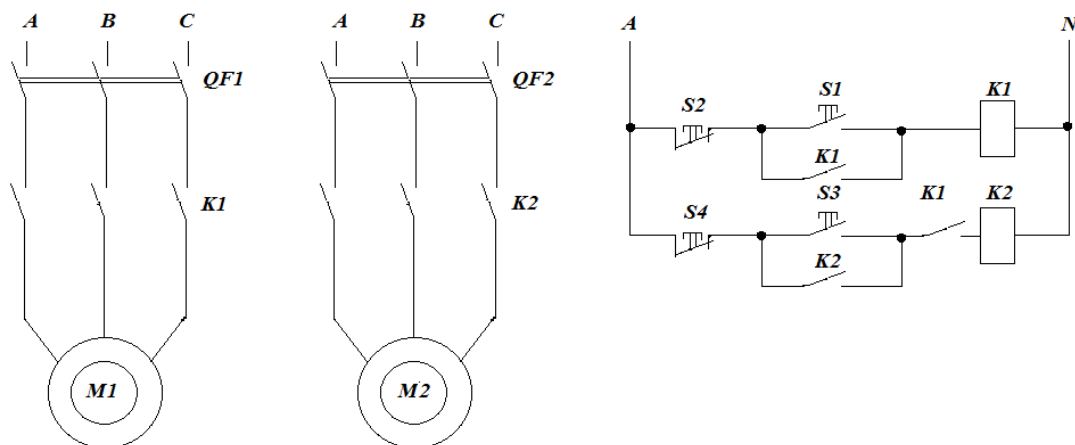


Рисунок 10.5.3 - Схема управления с блокировочной связью, предусматривающей включение второго электродвигателя только после первого

3. Убедиться в том, что двигатель №2 не включается, нажав кнопку S3 («пуск» двигателя №2).
4. Включить двигатель №1 в сеть с помощью кнопки S1 («пуск» двигателя №1) и затем включить в работу двигателя №2, нажав кнопку S3 («пуск» двигателя №2).
5. Остановить двигатель №2, нажав кнопку S4 («стоп» двигателя №2). Убедиться в том, что двигатель №2 отключился.
6. Включить двигатель №2 в сеть с помощью кнопки S3 («пуск» двигателя №2). Затем, нажав кнопку S2 («стоп»), убедиться в том, что оба двигателя остановились.
7. Собрать электрическую схему управления с блокировочной связью одновременной работы двух двигателей (рисунок 10.5.4).

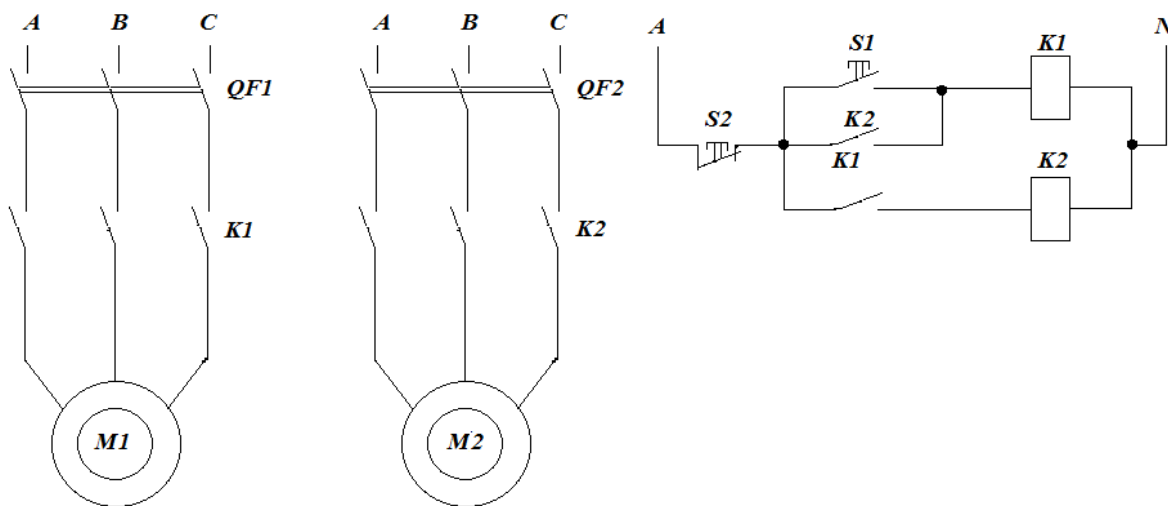


Рисунок 10.5.4 - Схема управления с блокировочной связью одновременной работы двух двигателей

8. Включить двигатели №№1,2 в сеть с помощью кнопки S1 («пуск») и убедиться в том, что оба двигателя работают.
9. Остановить двигатели №№1,2, нажав кнопку S2 («стоп»). Убедиться в том, что двигатели отключились.
10. Собрать реверсивную схему управления асинхронным двигателем с блокировочной связью, предотвращающей одновременное включение в двух направлениях (рисунок 10.5.5).

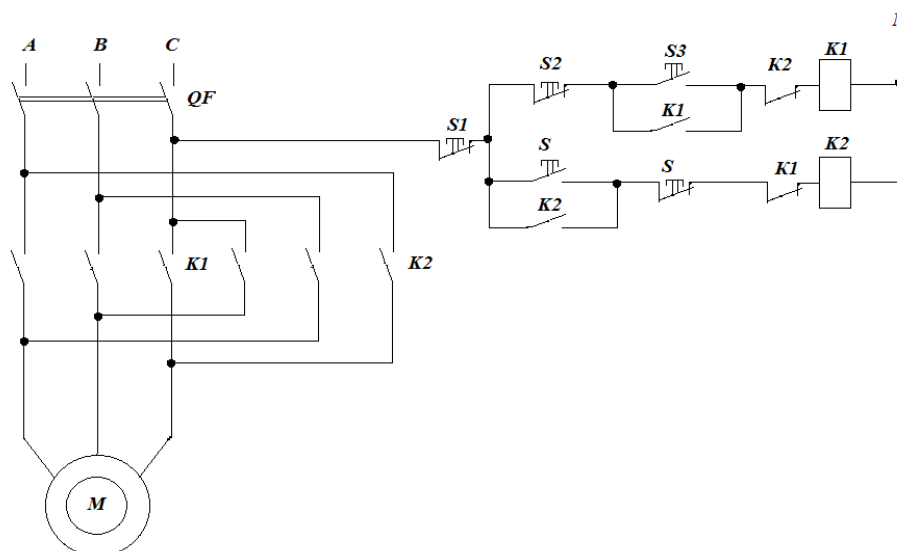


Рисунок 10.5.5 - Реверсивная схема управления асинхронным двигателем с блокировочной связью, предотвращающей одновременное включение в двух направлениях

11. Включить двигатель в сеть с помощью кнопки S3 («вперед») и убедиться в том, что двигатель работает. Нажав кнопку S4 («назад»), убедиться в том, что двигатель продолжает вращаться в прежнем направлении.
12. Остановить двигатель, нажав кнопку S1 («стоп») или кнопку S2 («стоп»). Убедиться в том, что двигатель отключился.
13. Включить двигатель в сеть с помощью кнопки S4 («назад») и убедиться в том, что двигатель работает. Нажав кнопку S3 («назад»), убедиться в том, что двигатель продолжает вращаться в прежнем направлении.
14. Остановить двигатель, нажав кнопку S1 («стоп») или кнопку S5 («стоп»). Убедиться в том, что двигатель отключился.

Контрольные вопросы

1. Назначение блокировочных связей?
2. Какие блокировки используют в нереверсивных схемах управления электродвигателем?
3. Какие блокировки используют в реверсивных схемах управления электродвигателем?
4. Какие устройства используют для ограничения перемещения рабочего органа машины?
5. Какие виды сигнализации существуют?
6. Каково назначение сигнализации?
7. Какие устройства позволяют выполнить световую сигнализацию?
8. Какие устройства позволяют выполнить звуковую сигнализацию?
9. Какие виды мнемосхем существуют?

Лабораторная работа №6

Тема: Исследование схемы управления пуском нереверсивным и реверсивным асинхронным электроприводом.

Цель работы: Изучить схему управления пуском асинхронным двигателем с к.з. ротором в нереверсивном и реверсивном режимах.

Теоретические сведения

Управление двигателями с короткозамкнутым ротором. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, как правило, управляются при помощи магнитных пускателей. Пуск электродвигателей осуществляется непосредственным включением на полное напряжение.

Простейшая схема управления двигателем с нереверсивным магнитным пускателем показана на рисунке 10.6.1. В этой схеме предусматривается питание силовых цепей и цепей управления от одного источника напряжения.

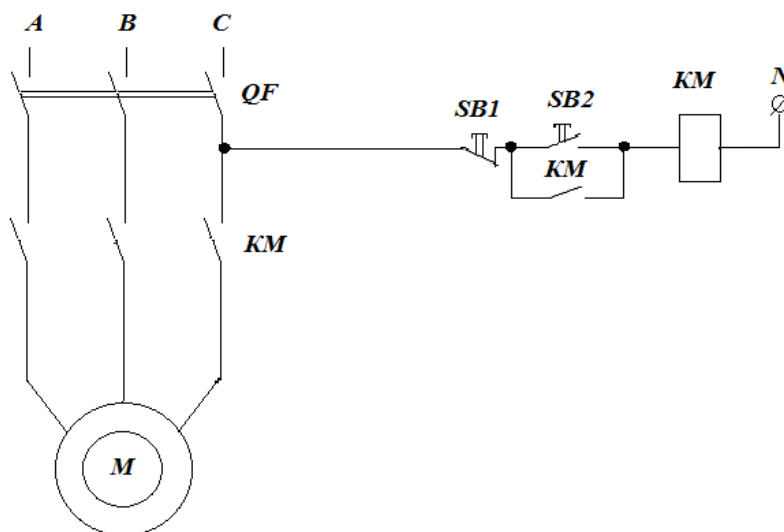


Рисунок 10.6.1- Нереверсивная схема управления пуском асинхронного двигателя с к.з. ротором

При включении автомата QF напряжение подается на силовые и вспомогательные цепи схемы. Нажатием кнопки S2 замыкается цепь катушки магнитного пускателя KM, при этом главные контакты KM замыкаются и включают двигатель в сеть. Одновременно блок-контакт KM шунтирует кнопку S2 и дальнейшее удержание кнопки в нажатом состоянии становится ненужным.

Отключение двигателя от сети выполняется нажатием кнопки S1. Цепь питания катушки КМ разрывается, что приводит к размыканию всех контактов магнитного пускателя.

В схеме предусмотрена защита электродвигателя от коротких замыканий и перегрузки при помощи автоматического выключателя, который для этой цели содержит комбинированный расцепитель.

Схема магнитного пускателя с кнопочными выключателями осуществляет также защиту от самопроизвольных включений электродвигателя (нулевая защита) при восстановлении напряжения питания после кратковременного его исчезновения. Повторный пуск электродвигателя возможен только после вторичного нажатия кнопки S2.

В тех случаях, когда необходимо изменять направление вращения, управляют электродвигателем реверсивным магнитным пускателем, схема которого показана на рисунке 10.6.2.

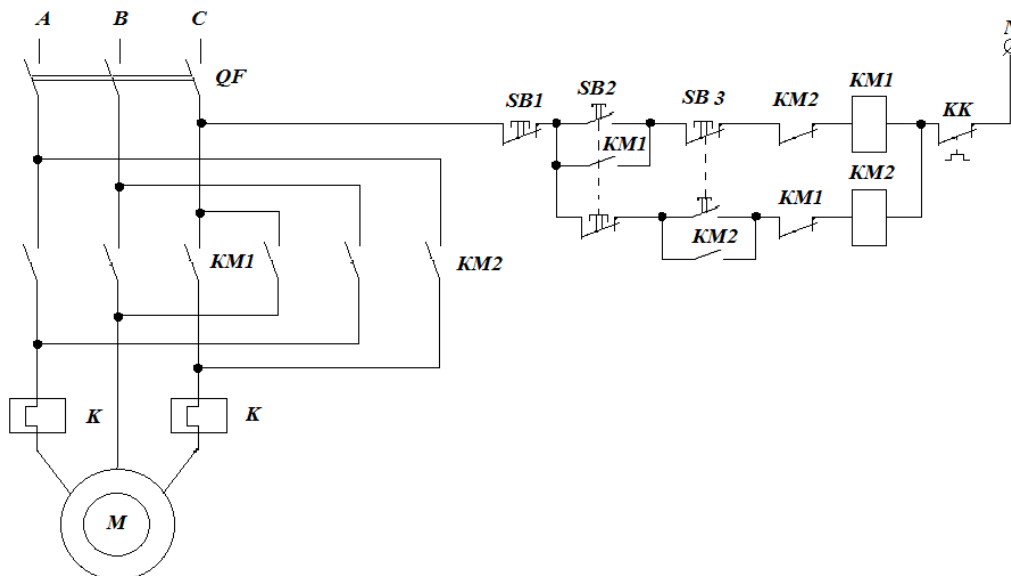


Рисунок 10.6.2 - Реверсивная схема управления пуском асинхронного двигателя с к.з. ротором

При нажатии кнопки S1 получает питание катушка КМ1 магнитного пускателя, замыкаются силовые контакты в главной цепи и статор двигателя присоединяется к сети при прямом чередовании фаз.

При нажатии кнопки S2 ее размыкающий контакт, установленный в цепи катушки КМ1, размыкается, благодаря чему реверс электродвигателя может быть произведен без предварительного нажатия кнопки S3. Чередование фаз при этом меняется на обратное.

Отключение двигателя от сети выполняется нажатием кнопки S1. Цепь питания катушек КМ1 и КМ2 разрывается, что приводит к размыканию всех контактов магнитного пускателя.

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал:

- управление пуском асинхронными электродвигателями;
- устройство и принцип действия реверсивного и нереверсивного магнитного пускателя и с трехкнопочным постом;
- изучить действие электрических и механических блокировок, выполненных в магнитных пускателях.

Работа в лаборатории

Лабораторная установка. Лабораторная установка состоит из асинхронного двигателя с к.з. ротором, магнитного пускателя и кнопочной станции.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с оборудованием электроприводов, записать основные паспортные данные и технические характеристики электродвигателя и аппаратуры управления в таблицу 10.6.1.
2. Собрать нереверсивную электрическую схему управления асинхронным двигателем (рисунок 10.6.1).
3. Включить двигатель в сеть с помощью кнопки S2 («пуск») и проверить работу пускателя и электродвигателя.
4. Остановить двигатель, нажав кнопку S1 («стоп»).
5. Собрать реверсивную электрическую схему управления асинхронным двигателем (рисунок 10.6.2).

Таблица 10.6.1-Технические характеристики электродвигателя и аппаратуры управления

Двигатель		Магнитный пускатель		Автоматический выключатель	
Тип двигателя		Тип магнитного пускателя		Тип автомата	
Номинальная частота вращения двигателя n_2 , об/мин		Номинальный ток, А		Ток, А	
Номинальная мощность двигателя $P_{ном}$, кВт		Максимальная мощность, кВт		Вид расцепителя	
КПД двигателя η		Величина		Ток расцепителя, А	
Коэффициент мощности $\cos\varphi_2$		Вид расцепителя			
		Номинальный ток расцепителя, А			

6. Включить двигатель в сеть с помощью кнопки S2 («вперед») и проверить работу пускателя и электродвигателя. Заменить направление вращения электродвигателя. Нажать кнопку S3 («назад») и убедиться, что команда выполняется (электродвигатель вращается в обратном направлении).

7. Остановить двигатель, нажав кнопку S1 («стоп»).

Контрольные вопросы

1. Какова роль магнитного пускателя в схеме управления электродвигателем?
2. Какие кнопки и кнопочные станции существуют, в чем их особенности?
3. Почему необходимо блокировать контакты кнопки пуск?
4. Какой аппарат защищает двигатель от перегрузок?
5. Какой аппарат защищает двигатель от коротких замыканий?
6. Какой аппарат защищает двигатель от самопроизвольного пуска?
7. Какой аппарат защищает двигатель от обрыва фазы?
8. В чем отличие схемы управления реверсивной от нереверсивной?
9. Какие блокировки предусмотрены в нереверсивной схеме управления?
10. Какие блокировки предусмотрены в реверсивной схеме управления?

Лабораторная работа №7

Тема: Исследование схем торможения асинхронного двигателя с к.з. ротором.

Цель работы: Изучить схемы динамического торможения, торможения противовключением и магнитного торможения асинхронного двигателя с к.з. ротором в функции времени.

Теоретические сведения

Тормозные режимы работы асинхронных двигателей. Для сокращения времени остановки приводов используется принудительное торможение.

Для торможения асинхронных короткозамкнутых электродвигателей применяется:

- рекуперативное (генераторное) торможение;
- торможение противовключением;
- динамическое торможение (электродинамическое или торможение с независимым возбуждением);
- конденсаторное торможение (динамическое торможение с самовозбуждением);
- магнитное торможение.

Торможение с рекуперацией энергии в сеть. При отсутствии внешнего статического момента на валу двигатель, подключенный к сети будет вращаться со скоростью, близкой к синхронной. При этом из сети потребляется энергия, необходимая для покрытия потерь. Если за счет внешней силы ротор вращается с синхронной скоростью, то сеть будет покрывать только потери в статоре, а потери в роторе (механические и в стали) будут покрываться внешней силой.

В двигательном режиме, когда вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмоток статора и ротора в одинаковом направлении, ЭДС статора E_1 и ротора E_2 совпадают по фазе. При равенстве частот вращения магнитного поля статора и ротора $w=w_0$ ЭДС в роторе не наводится, т. е. равна 0. Если частота вращения ротора превышает частоту вращения магнитного поля статора $w>w_0$, то проводники обмотки статора пересекаются вращающимся полем в прежнем направлении, а проводники ротора – в противоположном.

ЭДС ротора E_2 меняет свой знак на обратный, машина переходит в генераторный режим с рекуперацией энергии. Что касается тока, то изменяет свое направление только его активная составляющая. Реактивная составляющая при отрицательном скольжении сохраняет свое направление.

Активная мощность меняет направление (передается в сеть), а реактивная мощность сохраняет свой знак независимо от режима работы машины.

Это значит, что асинхронная машина как в двигательном, так и в генераторном режиме потребляет реактивную мощность, необходимую для создания магнитного поля.

Торможение с отдачей энергии в сеть используется в подъемно-транспортных установках при спуске тяжелых грузов (лифты, подъемники, экскаваторы). Под действием груза ротор машины будет вращаться со скоростью больше скорости магнитного поля статора $w > w_0$, машина переходит в генераторный режим и начинает создавать тормозной момент (рисунок 10.7.1). При равенстве моментов $M = M_c$ груз будет опускаться с установившейся скоростью w_c .

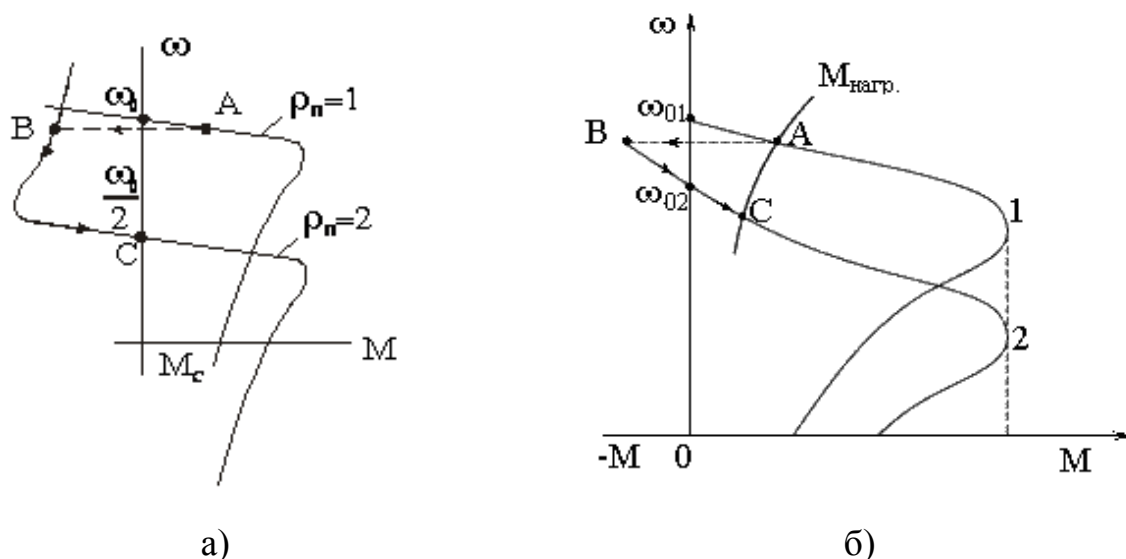


Рисунок 10.7.1-Механические характеристики при генераторном торможении за счет опускания груза (а) и понижении частоты источника питания (б)

Необходимо иметь в виду, что для обеспечения нормального спуска груза момент статический M_c не должен превышать критический момент M_k в генераторном режиме. При реактивном моменте сопротивления кратковременно режим с рекуперацией энергии в сеть можно получить, если асинхронный двигатель допускает переключение обмотки статора с одной пары полюсов на другую, как показано на приведенном графике (рисунок 10.7.1, а).

Режим с рекуперацией имеет место на участке «BC» (рисунок 10.7.1, а) после переключения обмотки статора с числа пар полюсов $p=1$ на $p=2$. Допустим, что в начальный момент времени двигатель работал на характеристике 1 в точке А, после переключения скорости на более низкую, он перешел на характеристику 2 в точку В, а затем под действием тормозного момента достиг точки С, с меньшей частотой оборотов.

Рекуперативное торможение применяется в основном в качестве подтормаживания перед основным торможением, либо при спуске груза, например в лифтах.

Чтобы наступило рекуперативное торможение, нужно чтобы частота вращения ротора превысила синхронную частоту вращения. В таком случае двигатель начнет отдавать энергию в сеть, то есть станет *асинхронным*

генератором. При этом электромагнитный момент двигателя становится отрицательным, и оказывает тормозной эффект.

Добиться генераторного торможения можно несколькими способами. Например, в двухскоростных двигателях, при переключении с большей скорости на меньшую. Для этого двигатель включается в направлении спуска груза. При этом ротор вращается по инерции с частотой, выше, чем новая синхронная частота. Возникнет тормозной момент, который уменьшит скорость до новой номинальной (рисунок 10.7.1, а).

Генераторное торможение можно осуществить, если уменьшать частоту питания двигателя. Это возможно, если двигатель питается от тиристорного преобразователя частоты (рисунок 10.7.1,б). При уменьшении частоты напряжения, уменьшается синхронная частота вращения. Частота вращения ротора, который вращается по инерции, снова окажется выше, возникнет тормозной момент, который будет снижать частоту вращения ротора. Таким образом, двигатель можно довести до полной остановки.

Пусть двигатель работает с заданной нагрузкой на валу в точке А характеристики 1 (рисунок 10.7.1,б). При снижении частоты источника питания рабочая точка должна перейти в точку С характеристики 2. Но если ω_A окажется больше новой пониженной частоты вращения магнитного поля ω_{02} , то машина из точки А переходит в точку В, работая на участке В– ω_{02} в режиме генератора. За счет этого происходит быстрое снижение частоты вращения. На участке ω_{02} –С машина работает в режиме двигателя, но происходит дальнейшее уменьшение частоты вращения ротора, пока вращающий момент не станет равным моменту нагрузки (т. С). Новое состояние равновесия с заданной нагрузкой наступает в точке С.

Рекуперативное торможение является наиболее экономичным видом торможения, т.к. происходит преобразование механической энергии в электрическую и возврат энергии в сеть. Одним из достоинств этого тормозного режима является его самопроизвольное появление, т.е. не требуется никакая контролирующая аппаратура.

Торможение противовключением. Торможение противовключением применяется для быстрой остановки двигателя.

Оно может быть осуществлено несколькими способами.

В *первом способе*, в работающем двигателе, меняют две фазы местами, с помощью выключения контактора К1 и включения К2. При этом направление вращения магнитного поля статора меняется на противоположное (рисунок 10.7.2). По сути, торможение противовключением осуществляется по схеме реверса двигателя.

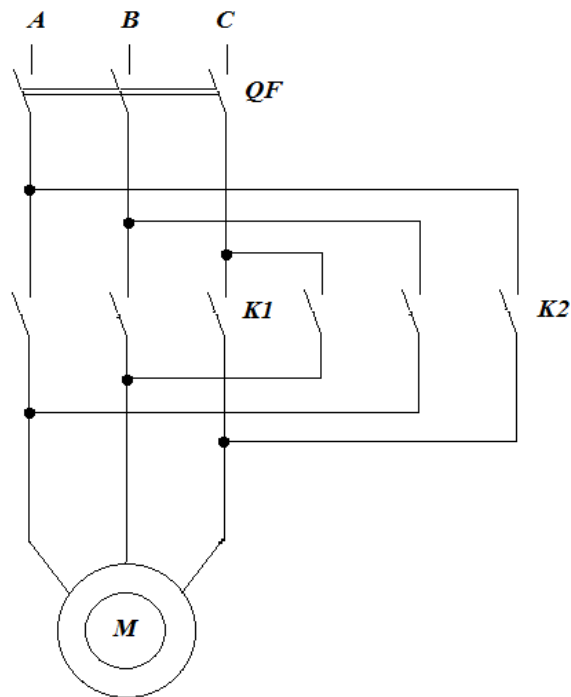


Рисунок 10.7.2 - Схема торможение противовключением асинхронного двигателя с к.з. ротором

Возникает большой тормозной момент, и двигатель быстро останавливается. Но для того чтобы ограничить большие токи в момент увеличения тормозного момента, необходимо вводить в обмотку статора или ротора дополнительное сопротивление.

При противовключении скольжение асинхронного двигателя изменяется от $S = 2$ до $S = 1$.

Допустим, что двигатель работает на характеристике 1 (рисунок 10.7.3 а) при чередовании фаз напряжения ABC. Тогда при переключении двух фаз (например, B и C) он переходит на характеристику 2, участок *аб* которой соответствует торможению противовключением.

Ротор при этом вращается против направления движения поля и постоянно замедляется. Когда скорость спадает до нуля, двигатель должен быть отключен от сети, иначе он может перейти в двигательный режим, причем ротор его будет вращаться в направлении, обратном предыдущему.

При торможении противовключением токи в обмотке двигателя могут в 7–8 раз превышать соответствующие номинальные токи. Заметно уменьшается коэффициент мощности двигателя. О КПД в данном случае говорить не приходится, т.к. и преобразуемая в электрическую механическая энергия и энергия, потребляемая из сети, рассеиваются в активном сопротивлении ротора, и полезно используемой энергии в данном случае нет.

Короткозамкнутые двигатели кратковременно перегружаются по току. Однако, у них при ($S > 1$) вследствие явления вытеснения тока заметно возрастает активное сопротивление ротора. Это приводит к уменьшению тока и увеличению момента.

С целью увеличения эффективности торможения двигателей с фазным ротором в цепи их роторов вводят добавочные сопротивления, что позволяет ограничить токи в обмотках и увеличить момент.

Величину добавочного сопротивления можно подсчитать по выражению:

$$r_{доб} = \frac{E_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}} \cdot (S_{НИ} - S_H) = r^2 \cdot \frac{S_{НИ} - S_H}{S_H} \quad (10.7.1)$$

где E_{20} - номинальная ЭДС ротора при $S=1$;

S_H – номинальное скольжение;

$S_{НИ}$ – скольжение при номинальной нагрузке на искусственной характеристике.

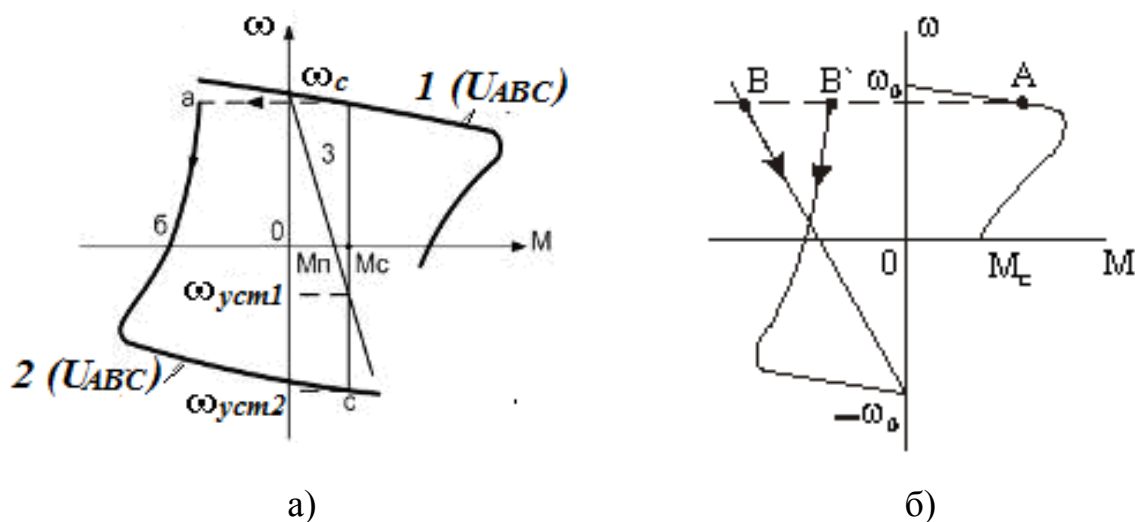


Рисунок 10.7.3 - Механические характеристики при торможении противовключением при реверсе (а) при спуске груза (б)

Во втором способе двигатель используют как тормоз для груза. То есть, если груз спускается вниз, то двигатель должен работать, наоборот, на подъем. Для этого в цепь ротора двигателя вводится большое добавочное сопротивление. Но его пусковой момент оказывается меньше чем момент нагрузки, и двигатель работает при некоторой небольшой скорости, тем самым обеспечивая плавный спуск.

Допустим, что требуется осуществить спуск груза, обеспечивая его торможение с помощью асинхронного двигателя. Для этого двигатель путем включения в цепь ротора добавочного резистора (сопротивления) переводится на искусственную характеристику (прямая 3 на рисунке 10.7.3,а).

Вследствие превышения моментом нагрузки M_c пускового момента M_p двигателя и его активного характера груз может опускаться с установившейся

скоростью $-\omega_{уст2}$. В этом режиме торможение скольжения асинхронного двигателя может изменяться от $S = 1$ до $S = 2$.

Динамическое торможение асинхронного двигателя. Динамическое торможение осуществляется путем отключения обмоток статора электродвигателя от сети переменного тока и подачи в них постоянного тока на период торможения (рисунок 10.7.4).

Обмотка статора, при протекании постоянного тока, создаст неподвижное магнитное поле. При вращении в таком поле, в роторе будет наводиться ЭДС, под действием которой будет протекать ток. Этот ток будет взаимодействовать с неподвижным полем статора и создавать тормозной момент, который будет направлен против направления вращения ротора. В итоге двигатель будет постепенно останавливаться, причем скорость его остановки будет зависеть от силы постоянного тока, протекающего по статору, и, конечно же от запасенной кинетической энергии электропривода. Эта энергия, преобразовываясь в электрическую, рассеивается в виде тепла на роторе.

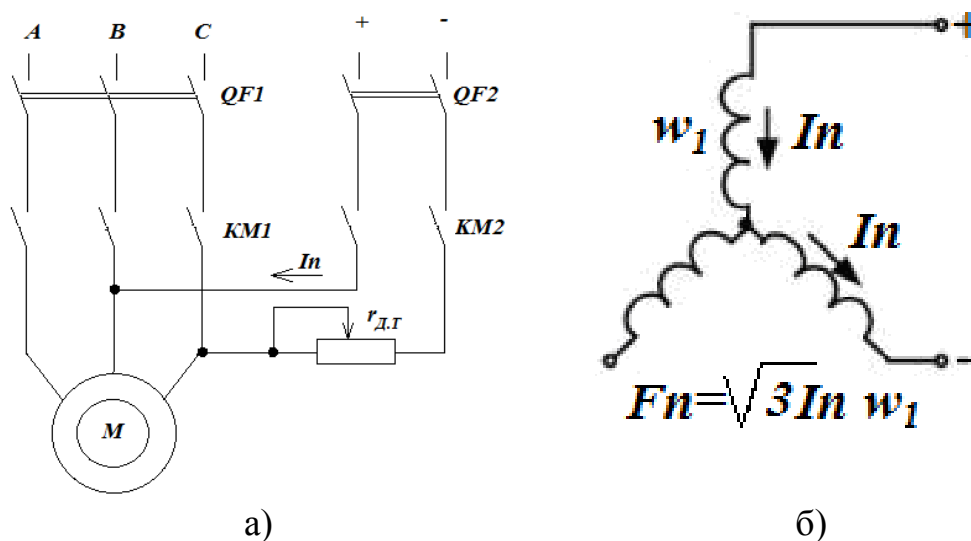


Рисунок 10.7.4 Схема динамического торможения асинхронного двигателя с к.з. ротором Схема динамического торможения асинхронного двигателя (а) и схема включения обмоток статора (б)

В двигателе с фазным ротором, величину тормозного момента, а следовательно, скорость торможения, можно изменять, изменяя величину добавочных сопротивлений в цепи ротора.

Постоянный ток I_p , значение которого может регулироваться резистором $r_{д.т.}$, протекает по обмоткам статора и создает относительно статора неподвижное магнитное поле. При вращении ротора в нем наводится ЭДС, частота, которой пропорциональна скорости. Эта ЭДС, в свою очередь, вызывает появление тока в замкнутом контуре обмотки ротора, который создает магнитный поток, также неподвижный относительно статора.

Взаимодействие тока ротора с результирующим магнитным полем асинхронного двигателя создает тормозной момент, за счет которого достигается эффект торможения. Двигатель в этом случае работает в режиме генератора независимо от сети переменного тока, преобразовывая кинетическую энергию движущихся частей электропривода и рабочей машины в электрическую, которая рассеивается в виде тепла в цепи ротора.

На рисунке 10.7.4 б показана наиболее распространенная схема включения обмоток статора при динамическом торможении. Система возбуждения двигателя в этом режиме является несимметричной.

Для проведения анализа работы асинхронного двигателя в режиме динамического торможения несимметричную систему возбуждения заменяют симметричной. С этой целью принимается допущение, что статор питается не постоянным током I_p , а некоторым эквивалентным трехфазным переменным током, создающим такую же МДС (магнитодвижущую силу), что и постоянный ток.

Электромеханическая и механические характеристики представлены на рисунке 10.7.5.

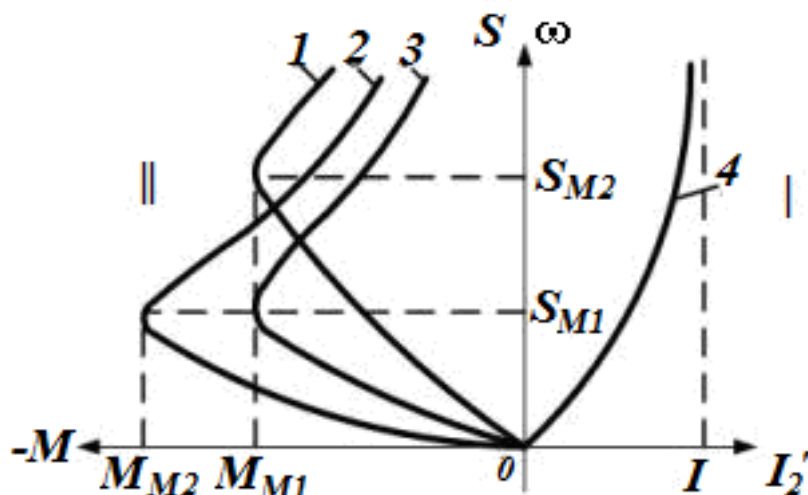


Рисунок 10.7.5 –Электромеханическая и механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором

Характеристика расположена на рисунке в первом квадранте I, где $s = \omega/\omega_0$ – скольжение асинхронного двигателя с фазным ротором в режиме динамического торможения. Механические характеристики двигателя расположены во втором квадранте II.

Различные искусственные характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения можно получить, изменяя сопротивление добавочных резисторов в цепи ротора или постоянный ток I_p , подаваемый в обмотку статора.

Варьируя значения добавочных резисторов и постоянный ток, можно получить желаемый вид механических характеристик асинхронного двигателя в режиме динамического торможения и, тем самым, соответствующую интенсивность торможения асинхронного электропривода.

При отключении обмотки статора асинхронный двигатель от сети, сохраняется лишь незначительный магнитный поток от остаточного намагничивания стали статора. ЭДС наводимая во вращающемся роторе и ток в роторе будут весьма малы. Взаимодействие тока ротора с потоком от остаточного намагничивания не может создать сколько-нибудь значительного электромагнитного момента. Поэтому для получения должного тормозного момента необходимо искусственно создать надлежащий магнитный поток статора. Это может быть достигнуто подачей в обмотку статора постоянного тока или подключением к ним конденсаторов или тиристорного преобразователя частоты, обеспечивающего протекание по обмоткам статора емкостного тока, т. е. опережающего тока, создающего эффект емкости. В 1-м случае будет иметь место режим *динамического торможения с независимым возбуждением*, во 2-м—с *самовозбуждением*.

При динамическом торможении с независимым возбуждением обмотки статора отключаются от сети трехфазного тока и подключаются к источнику постоянного тока. Этот ток создает неподвижный в пространстве магнитный поток, который при вращении ротора наведет в последнем ЭДС. Под действием ЭДС в обмотках ротора потечет ток, от взаимодействия которого с неподвижным потоком возникает тормозной момент. Двигатель превращается в синхронный генератор с неявновыраженными полюсами, работающий при переменной скорости.

Симметричное включение 3-х обмоток статора в сеть постоянного тока невозможно без их переключений. Обычно используется одна из схем, приведенных на рисунке 10.7.6.

Поскольку при питании постоянным током обмотки обладают только активным сопротивлением, для получения нужного значения тока достаточно небольшого по величине напряжения. В качестве источника постоянного тока для двигателей небольшой и средней мощности используются полупроводниковые выпрямители, а для крупных двигателей могут использоваться специальные генераторы постоянного тока низкого напряжения.

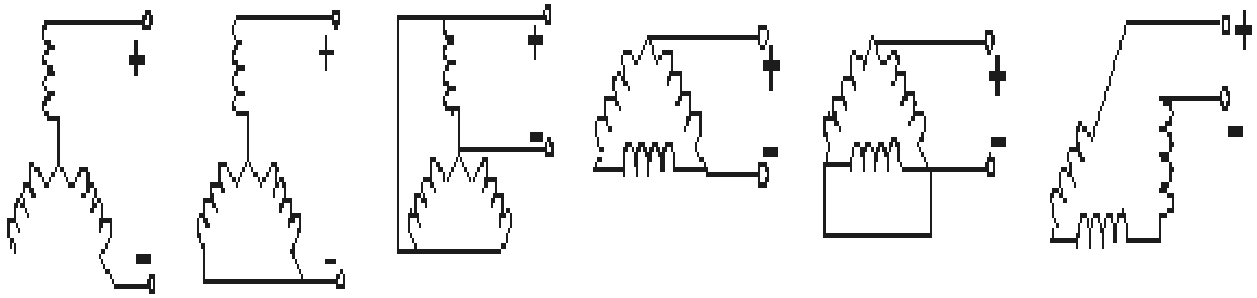


Рисунок 10.7. 6 –Схемы включения 3-х обмоток статора в сеть постоянного тока при динамическом торможении

Для вывода уравнения механической характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения режим синхронного генератора, в который превращается асинхронный двигатель после подключения к источнику постоянного тока, целесообразно заменить эквивалентным режимом асинхронного двигателя, полагая, что его статор вместо постоянного питается переменным током. При такой замене МДС создается совместно обмотками статора и ротора и должно быть соблюдено равенство МДС для обоих случаев, т. е. $F_{\text{ПОСТ}}=F_{\text{ПЕР}}$. Определение МДС, создаваемой постоянным током $I_{\text{ПОСТ}}$:

$$F_{\text{пост}} = 2 \cdot I_{\text{пост}} \cdot W_1 \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} \cdot I_{\text{пост}} \cdot W_1 \quad (10.7.2)$$

где $I_{\text{ПОСТ}}$ – постоянный ток, А;

W_1 – число витков фазной обмотки.

Однако, работа асинхронного двигателя в режиме динамического торможения существенно отличается от работы в нормальном двигательном режиме. В двигательном режиме намагничивающий ток и магнитный поток при изменении скольжения практически не изменяются. При динамическом торможении магнитный поток при изменении скольжения меняется вследствие непрерывного изменения результирующей МДС, складывающейся из неизменной МДС статора (постоянного тока) и меняющейся МДС ротора (переменного тока переменной частоты).

Из выражения для момента критического $M_k = \frac{m_1 I_1^2 x_\mu^2}{2\omega_0 (x_\mu + x'_2)}$ следует, что

критический момент двигателя в режиме динамического торможения не зависит от активного сопротивления цепи ротора.

Конденсаторное торможение (торможение с самовозбуждением). Если питание двигателя отключить, то его магнитное поле затухнет только через небольшой промежуток времени. Если в этот момент подключить к статорной обмотке двигателя батарею конденсаторов (рисунок 10.7.7,а), то энергия

магнитного поля будет переходит сначала в заряд конденсаторов, а затем снова возвращаться в обмотку статора. При этом возникнет тормозной момент, который остановит двигатель.

Величина тормозного момента будет зависеть от емкости конденсаторов, чем больше емкость, тем больше тормозной момент.

Конденсаторы могут быть включены постоянно, а могут отключаться во время работы двигателя с помощью контактора К2.

Этот способ торможения применяется в установках с асинхронными двигателями с к.з. ротором. Суть его заключается в том, что статор двигателя отключается от сети и к его обмоткам подключается батарея конденсаторов. Машина будет работать самовозбужденным асинхронным генератором с отрицательным скольжением по отношению к магнитному полю, созданному в статоре свободными токами низкой частоты. Поэтому на валу двигателя возникает тормозной момент, величина которого тем больше, чем больше начальное значение отрицательного скольжения.

Толчок для самовозбуждения создает ЭДС, индуктируемая в обмотках статора потоком остаточного намагничивания вращающегося ротора. При вращении ротора со скоростью (50-100%) от ω_0 поток остаточной индукции наводит в обмотках статора ЭДС порядка 0,5-1,5 В.

Время переключения двигателя с момента отключения от сети и до присоединения емкости составляет 0,05-0,1 С. За это время поток ротора не успевает затухнуть окончательно. Поэтому самовозбуждение асинхронного двигателя после присоединения емкости развивается за сотые доли секунды. Поскольку конденсаторы в данном случае находятся под напряжением весьма короткое время, оказывается возможным использование конденсаторов с номинальным напряжением, меньшим, чем если бы конденсаторы были подключены «наглухо», т. е. всегда. Да и срок службы их значительно больше, чем при глухоподключенной емкости.

ЭДС от остаточного намагничивания E_0 , приложенная к конденсаторам, обеспечивает протекание по обмоткам статора емкостного тока I_0 . Он создает вращающееся магнитное, которое увеличивает ЭДС и напряжение на статоре. Напряжение на конденсаторах возрастает до величин E_{01} (рисунок 10.7.7,б). Это вызовет увеличение тока через конденсаторы до $I_{\mu 1}$ и т. д. Процесс самовозбуждения протекает аналогично процессу самовозбуждения генератора постоянного тока.

Он будет продолжаться до тех пор, пока не наступит равновесие ЭДС генератора и напряжения на зажимах конденсаторов (точка А), т. е. рост тока и ЭДС будет продолжаться до тех пор, пока не наступит насыщение магнитной системы двигателя. Так же, как и машина постоянного тока, асинхронная машина возбуждается лишь при некотором конечном значении скорости, которая зависит от параметров машины и емкости конденсаторов и при выполнении условия $\omega_{\text{ротора}} > \omega_0$ – угловой скорости поля статора, созданного токами низкой частоты. Следовательно, существует нижняя граница конденсаторного самовозбуждения, которой соответствует угловая частота ω_p ,

скольжение S , угловая частота свободных колебаний тока в статоре, которые называются *нижними критическими*.

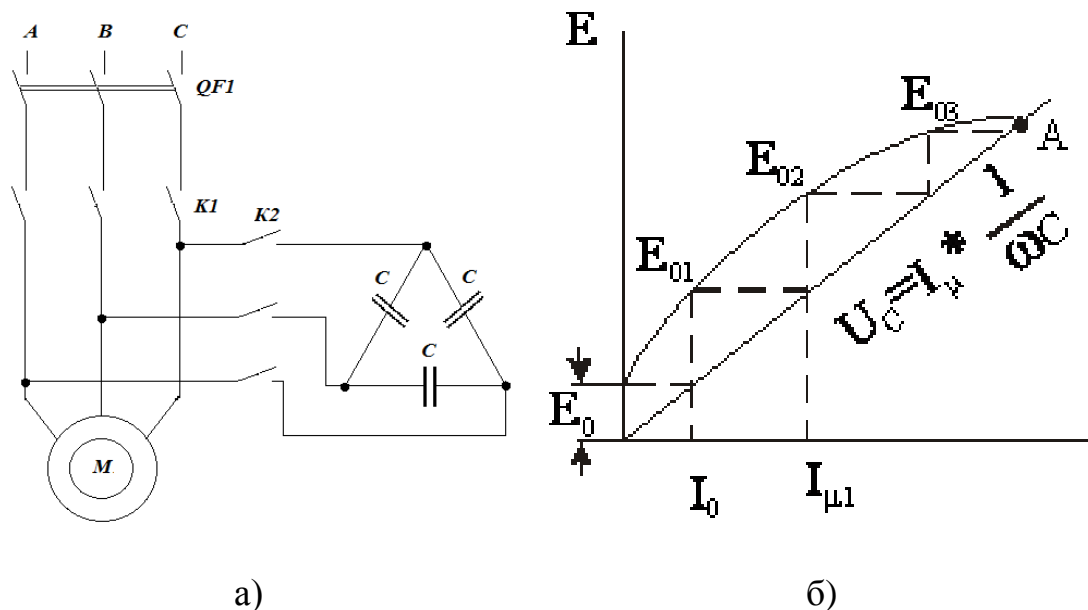


Рисунок 10.7.7 - Принципиальная схема конденсаторного торможения асинхронного двигателя с к.з. ротором (а), график процесса самовозбуждения в асинхронном двигателе (б)

Вся реактивная мощность, генерируемая конденсаторами «потребляется» индуктивностями рассеяния. Иначе говоря, будет иметь место обмен реактивной энергией между конденсаторами и индуктивными полями рассеяния. При этом основной контур намагничивания в этом обмене энергии участия не принимает, что приводит к прекращению самовозбуждения. Т. о., имеется и верхняя граница существования режима самовозбуждения. Соответствующие ей параметры называются *верхними критическими*.

При $I_m=0$ ЭДС в обмотках статора и ротора, следовательно, и сумма падений напряжения будут равны 0.

Механические характеристики асинхронной машины в режиме торможения с самовозбуждением для различных значений емкости приведены на рисунке 10.7.8,а. Максимум тормозного момента при уменьшении емкости перемещается в область более высоких скоростей, причем он может в 5-8 раз превышать номинальный момент двигателя.

Недостатком является возникновение тормозного момента только при $\omega > 30-50\%$ от ω_0 , срыв тормозного момента при $\omega > \omega_k$, необходимость большой емкости для обеспечения тормозного эффекта при малых скоростях, ограниченность зоны торможения при каждой данной емкости. Эти недостатки могут быть существенно уменьшены при вентильном возбуждении двигателей, когда он будет работать в режиме автономного самовозбужденного генератора.

Магнитное торможение. Можно обойтись и без конденсаторов (рисунок 10.7.8,б), просто замкнув контакты К2, т.е. замкнув обмотку статора по схеме “звезда”, предварительно отключив ее от сети с помощью контактора К1. Тогда торможение произойдет значительно быстрее, за счет остаточного магнетизма двигателя. Такое торможение еще называется магнитным торможением.

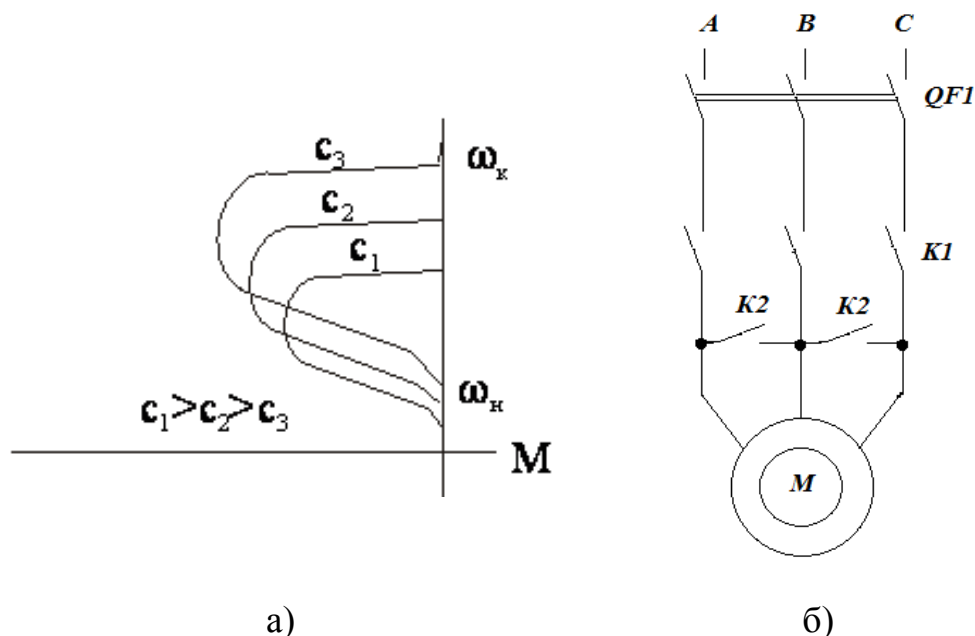


Рисунок 10.7.8 - Механические характеристики асинхронной машины в режиме торможения с самовозбуждением для различных значений емкости (а), принципиальная схема магнитного торможения асинхронного двигателя с к.з. ротором (б)

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал:

- принципы управления схем электропривода;
- устройство и принцип действия реле времени;
- динамическое торможение асинхронным двигателем с к.з. ротором;
- конденсаторное и магнитное торможения;
- торможение противовключением асинхронным двигателем с к.з. ротором.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения графика.

Работа в лаборатории

Лабораторная установка. Лабораторная установка состоит из асинхронного двигателя с к.з. ротором, магнитных пускателей, кнопочных станций и реле управления. Время самоторможения измеряется секундомером.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с оборудованием электроприводов, записать основные паспортные данные и технические характеристики электродвигателя и аппаратуры управления в таблицу 10.7.1.

Таблица 10.7.1-Технические характеристики электродвигателя и аппаратуры управления

	Тип	Номинальная мощность	Номинальная частота	Номинальный ток, А
Двигатель				
Магнитный пускатель				

2. Собрать электрическую схему управления динамическим торможением асинхронным двигателем с к.з. ротором (рисунок 10.7.9).

3. Включить двигатель в сеть с помощью кнопки S2 («пуск») и разогнать до номинальной частоты вращения.

4. Остановить двигатель без торможения, нажав кнопку S1 («стоп») и измерить время самоторможения двигателя. Результаты измерений записать в таблицу 10.7.2.

5. Включить двигатель в сеть с помощью кнопки S2 («пуск») и разогнать до номинальной частоты вращения. Остановить двигатель с торможением, нажав кнопку S3 («тормоз») и измерить время самоторможения двигателя. Результаты измерений записать в таблицу 10.7.2.

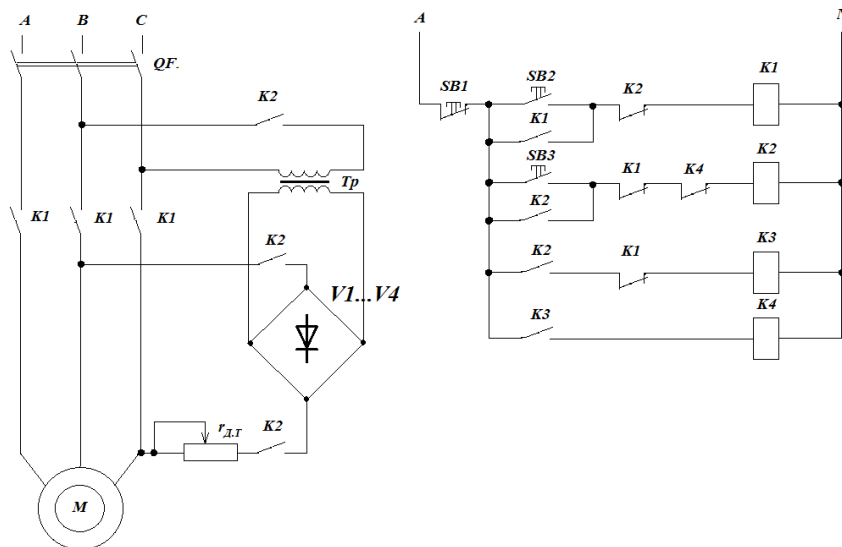


Рисунок 10.7.9 - Схема управления динамическим торможением асинхронного двигателя с к.з. ротором

Таблица 10.7.2 –Результаты измерений

Вид торможения	Время выбега, (сек)	
	Без торможения	В режиме торможения
Динамическое торможение		
Торможение противовключением		
Конденсаторное торможение		
Магнитное торможение		

6. Собрать электрическую схему управления торможением противовключением асинхронным двигателем с к.з. ротором (рисунок 10.7.10).

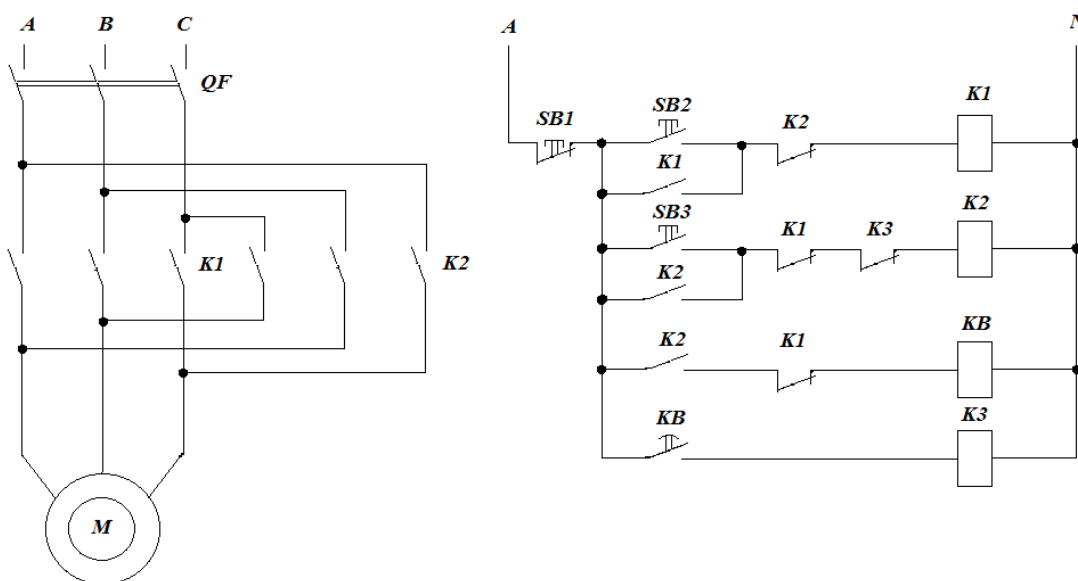


Рисунок 10.7.10 - Схема управления торможением противовключением асинхронного двигателя с к.з. ротором

7. Включить двигатель в сеть с помощью кнопки S2 («пуск») и разогнать до номинальной частоты вращения.

8. Остановить двигатель с торможением, нажав кнопку S3 («тормоз») и измерить время самоторможения двигателя. Результаты измерений записать в таблицу 10.7.2.

9. Собрать электрическую схему управления конденсаторным торможением асинхронным двигателем с к.з. ротором (рисунок 10.7.11).

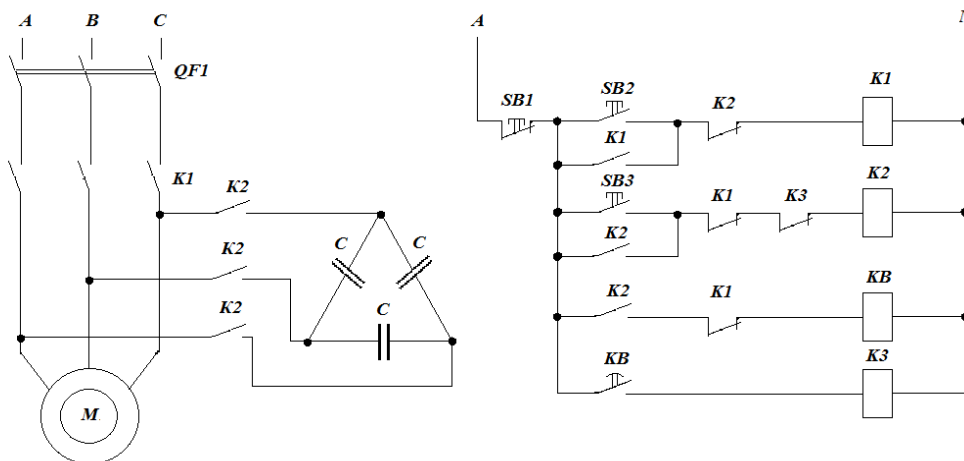


Рисунок 10.7.11 - Схема управления конденсаторным торможением асинхронного двигателя с к.з. ротором

10. Включить двигатель в сеть с помощью кнопки S2 («пуск») и разогнать до номинальной частоты вращения.
11. Остановить двигатель с торможением, нажав кнопку S3 («тормоз») и измерить время самоторможения двигателя. Результаты измерений записать в таблицу 10.7.2.
12. Собрать электрическую схему управления конденсаторным торможением асинхронным двигателем с к.з. ротором (рисунок 10.7.12).

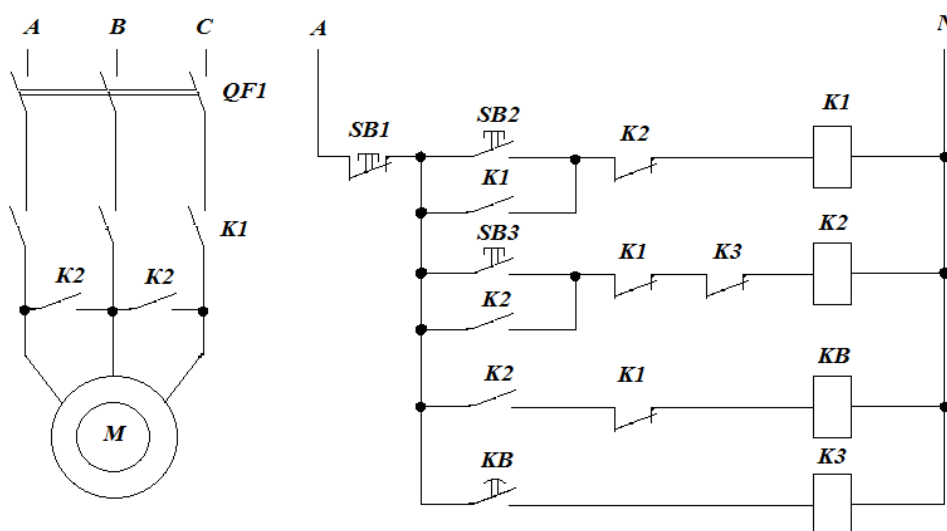


Рисунок 10.7.12 - Схема управления конденсаторным торможением асинхронного двигателя с к.з. ротором

13. Включить двигатель в сеть с помощью кнопки S2 («пуск») и разогнать до номинальной частоты вращения.
14. Остановить двигатель с торможением, нажав кнопку S3 («тормоз») и измерить время самоторможения двигателя. Результаты измерений записать в таблицу 10.7.2.
15. Сравнить результаты измерений при различных способах торможения асинхронного двигателя.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначено торможение двигателей?
2. Какие виды торможения асинхронных двигателей существуют?
3. В каких случаях используют рекуперативное торможение?
4. Достоинства рекуперативного торможения?
5. Как осуществляется динамическое торможение асинхронных двигателей?
6. Какими особенностями обладает динамическое торможение асинхронных двигателей с к.з. ротором и фазным ротором?
7. Конденсаторное торможение, достоинства, недостатки.
8. Магнитное торможение, достоинства и недостатки.

Лабораторная работа №8

Тема: Исследование схемы управления трёхфазным асинхронным электродвигателем с фазным ротором

Цель работы: Практически изучить схему автоматического управления пуска и динамического торможения трехфазного асинхронного электродвигателя с фазным ротором и приобрести навыки сборки и регулировки этой схемы.

Теоретические сведения

Схема автоматического управления. Предлагаемая для исследования схема автоматического управления (рисунок 10.8.1) обеспечивает автоматическое неререверсивное управление пуском и динамического торможения трёхфазным асинхронным электродвигателем в функции времени. Силовая часть схемы включает в себя электродвигатель и три пусковых сопротивления (по одному на фазу ротора), соединённые звездой. Каждое из этих сопротивлений состоит из трёх элементов: r_1 , r_2 , и r_3 .

Напряжение из сети подводится через рубильник P1, а подключение обмотки статора к сети происходит через силовые контакты линейного контактора Л. В один из линейных проводов включён амперметр А1 для контроля за значением пускового тока.

Переключение ступеней пускового сопротивления осуществляется замыкающими контактами контакторов ускорения У1, У2 и У3. Для осуществления динамического торможения электродвигателя силовой части

схемы имеется электрическая цепь для подключения обмотки статора и к источнику постоянного тока через сопротивление $r_{д.т}$. Подключения этой цепи к сети постоянного тока выполняется через рубильник Р2 и замыкающие контакты контактора торможения Т. Для контроля за величиной тока в цепи динамического торможения в указанной цепи имеется амперметр А2.

Управляющая часть схемы электрически не связана с силовой частью и получает питание из сети постоянного тока через рубильник Р3. Возможно, питание управляющей части схемы и переменным током. Но при этом желательно, чтобы питания осуществлялось через

понижительный трансформатор при напряжении не более 127 В. Управляющая часть схемы состоит из нескольких контакторов и реле, выполняющих управление пуском и торможения электродвигателя по заданной программе. Программа пуска (число ступеней пуска и время включения на каждой из них) определяется тремя реле времени и установками на продолжительность замедления при срабатывании.

Управление динамическим торможением электродвигателя осуществляется контактором торможения Т и реле времени РДТ, на котором задаёте продолжительность динамического торможения.

Схема работает следующим образом. Предварительно необходимо включить рубильник Р1, Р2 и Р3. Рубильник Р4 должен быть разомкнут. При кратковременном нажатии кнопки "Пуск" замыкается цепь обмотки линейного контактора Л и его блок-контакты шунтируют кнопку "Пуск", предотвращая размыкание этой цепи при отпущенной кнопки. Одновременно замыкаются силовые контакты Л, подключающие к сети обмотку статора электродвигателя М. При этом начинается пуск электродвигателя на первой ступени пускового сопротивления $r_1+r_2+r_3$. Контакты 21-23 линейного контактора Л размыкаются, что предотвращает случайное включение контактора Т, а контакты 7-2 замыкаются, подключив катушку ускоряющего реле РУ1, которое с установленным замедлением срабатывает и своими контактами 9-7 замыкает цепь катушки контактора У1. При срабатывании этого контактора замыкаются контакты У1, шунтирующие элементы r_3 пускового сопротивления. При этом процесс пуска электродвигателя М переходит на следующую ступень r_1+r_2 . Срабатывания контактора У1 сопровождается также замыканием контактов 11-7, включающих реле времени РУ2. С заданной выдержкой времени это реле закрывает свои контакты 13-7 в цепи обмотки контактора У2, который своими контактами зашунтирует элементы r_2 пускового сопротивления. В итоге электродвигатель перейдёт на третью ступень пуска r_1 . И наконец, контакты 15-7 включают реле времени РУ3, которое с установленной выдержкой времени работает и своими контактами 17-7 включит контактор У3. При этом пусковое сопротивление в цепи ротора окажется полностью зашунтированным и обмотка ротора электродвигателя будет замкнута накоротко. На этом процесс пуска электродвигателя заканчивается и он начинает работать в режиме своей естественной механической характеристики.

Остановка электродвигателя осуществляется кратковременным нажатием кнопки "Стоп", что приводит к отключению линейного контактора Л. В

результате, размыкаются силовые контакты Л, отключающие обмотку статора электродвигателя от сети, и контакты 7-2, отключающие все группу реле и контакторов, управляющих контактами в цепи пускового сопротивления. Это приводит к размыканию всех контакторов У1, У2 и У3 и подготавливаем электродвигатели к следующему пуску.

Одновременно нажатия кнопки "Стоп" и отключения линейного контактора Л приводит к включению контактора торможения Т, который своими блок-контактами шунтирует контакты кнопки "Стоп", контактами 27-2 включает реле РДТ и силовыми контактами подключает к сети постоянного тока цепь динамического торможения с сопротивлением $r_{д.т.}$. В результате начинается динамическое торможение электродвигателя М. Но по истечении некоторого времени, определяемого установкой замедления срабатывания на реле РДТ, это реле сработает и своими размыкающими контактами 23-25 разомкнёт цепь контактора торможения Т. Это приведёт к отключению цепи динамического торможения, отключению реле РДТ и размыканию блок-контактов, шунтирующих кнопку "Стоп".

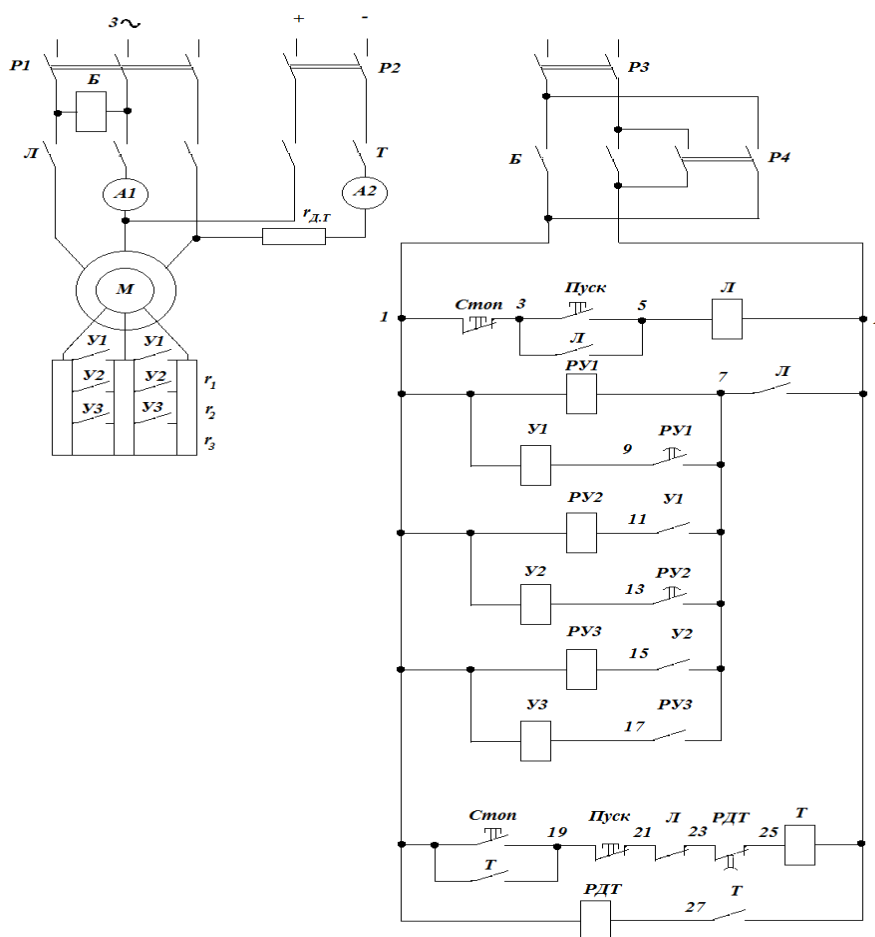


Рисунок 10.8.1 –Схема нереверсивного управления пуском трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором в функции времени с динамическим торможением

Наличие нормально замкнутой кнопки "Пуск" в цепи контактора Т исключает одновременное срабатывание контакторов Т и Л при нажатии кнопки "Пуск", что привело бы к возникновению аварийного режима электродвигателя М.

В схеме применена блокировка, исключающая "самоспуск" электродвигателя при случайном исчезновении и возникновения напряжения на обмотки статора электродвигателя. Эта блокировка обеспечивается контактором блокировки Б, обмотка которого подключена к двум линейным проводам трёхфазной сети, питающий цепь статора электродвигателя. Замыкающие контакты этого контактора включены в цепь питания управляющего участка схемы. Таким образом, при случайном исчезновении напряжения в трёхфазной сети, питающей электродвигатель, контактор Б своими контактами отключает цепь управления, что приводит к отключению всех реле и контакторов; при появлении напряжения в трёхфазной сети процесс пуска приходится начинать вновь включением кнопки "пуск".

Подготовка к работе.

1. Повторить теоретический материал: принципы релейно-контакторного управления электроприводами переменного тока; схемы управления трёхфазными асинхронными электродвигателями с фазным ротором; управление пуском и торможением асинхронного электродвигателя с фазным ротором в функции времени; схемы включения пусковых сопротивлений; мероприятия снижающие опасность заземления в цепях управления.
2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов.

Работа в лаборатории

Настройка времени срабатывания реле. Настройку времени замедления при срабатывании реле времени РУ1, РУ2, РУ3 выполняют с помощью электросекундомера ЭС по схеме показанной на рисунке 10.8.2. Настройку времени замедления реле динамического торможения РДТ проводят по схеме, данной на рисунке 10.8.3, где размыкающие контакты этого реле включены последовательно в цепь электросекундомера ЭС и при срабатывании РДТ цепь ЭС размыкается.

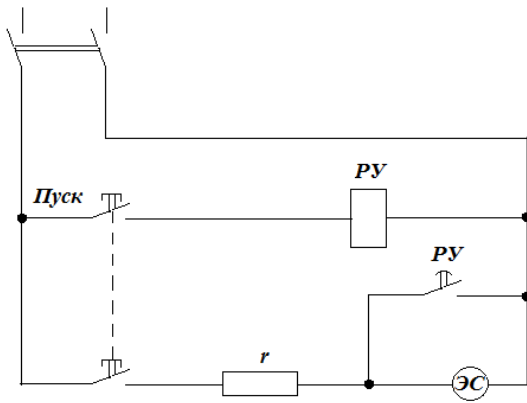


Рисунок 10.8.2 – Схема включения электросекундомера для проверки времени замедления при срабатывании реле ускорения РУ

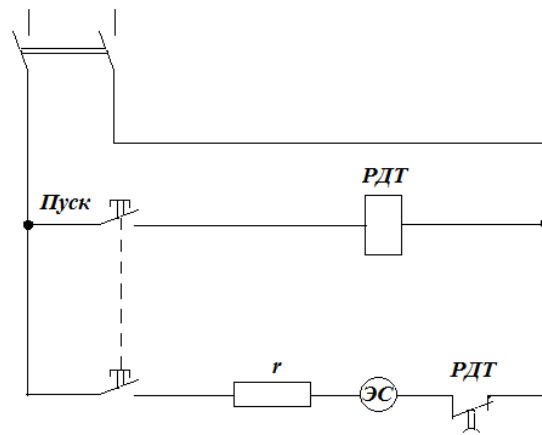


Рисунок 10.8.3 – Схема включения электросекундомера для проверки времени замедления при срабатывании реле динамического торможения РДТ

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой записать паспортные данные электродвигателя и данные релейных контакторных устройств.
2. Собрать схему по рисунку 10.8.1 и после проверки её преподавателем установить требуемое время замедления при срабатывании реле времени РУ1, РУ2, РУ3, и РДТ.
3. Произвести пуск установки и измерить параметры, характеризующие пуск и остановку электродвигателя.

Пуск и остановка электродвигателя. Для пуска электродвигателя следует включить рубильники Р1, Р2 и Р3 (рубильник Р4 разомкнут) и кратковременно нажать кнопку "Пуск". Для остановки электродвигателя необходимо нажать кнопку "Стоп". Пуск электродвигателя повторить три раза, наблюдая за бросками пускового тока в цепи статора и временем включения цепи ротора на каждой ступени пуска.

Эффективность динамического торможения проверяют сравнением продолжительности времени вращения ротора по инерции при разомкнутом рубильнике Р2 с продолжительностью при замкнутом рубильнике Р2. Измерение времени торможения начинают с момента нажатия на кнопку "Стоп" до момента полной остановки ротора.

Все параметры, характеризующие пуск и остановку электродвигателя, заносят в таблицу 10.8.1, затем определяют средние значения параметров как сумму трёх измерений, деленную на три.

В выводах о проделанной работе следует изложить свойства исследованной схемы управления, а также указать средние параметры, характеризующие процессы пуска и остановки электродвигателя.

Таблица 10.8.1 –Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Пуск			Остановка		
	Время пуска, с	Пусковой ток (А) для трех ступеней			Время выбега, с	
		первой	второй	третьей	без торможения	в режиме динамического торможения
1						
2						
3						
Среднее значение						

4. Составить отчёт и сделать заключение о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Изложите последовательность срабатывания контакторов и реле при нажатии на кнопку "Пуск".
2. Будет ли работать схема управления, если кнопку "Пуск" не шунтировать контактами Л?
3. Каково назначение контактов линейного контактора Л в цепи контактора торможения 21-23?
4. Объясните Назначение контактора Б и рубильник Р4.
5. Какие изменения необходимо внести в схему управления для того, чтобы пуск электродвигателя происходил на четырёх ступенях?

Заключение

В данной работе обобщен опыт и достижения стран мирового сообщества в области электропривода. Как следует из представленного материала, за этим направлением будущее развития человечества, связанное не только с работой и развитием современной промышленности, сельского хозяйства и транспорта. Работа промышленности будущего невозможна без автоматизированного электропривода.

В настоящее время основная масса эксплуатируемых в производстве регулируемых электроприводов выполнена на электрических двигателях постоянного тока. Однако, несмотря на то, что в большинстве развитых стран мира массовый выпуск регулируемых электроприводов постоянного тока прекращен с начала XXI века, установленные электроприводы постоянного тока еще долгие годы будут применяться в промышленности, так как их замена требует больших капитальных затрат.

Учебный курс «Электропривод и автоматизация» входит в учебный план специальности электроэнергетика. При подготовке бакалавров электроэнергетики изучением курса электропривод и автоматизация создается теоретическая база для изучения последующих прикладных учебных курсов, которые вместе составляют содержание специальности, а также для изучения дисциплин магистратуры по специальности «Электроэнергетика».

Список использованных источников

1. Фираго Б.И., Теория электропривода / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2007.
2. Чиликин М.Г., Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981.
3. Москаленко В.В. Электрический привод – М.: Высш. школа, 1991.
4. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Васин В.М. Электрический привод. - М.: Высшая школа, 1984.
6. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: Учебное пособие для ВУЗов. – М.: МЭИ, 2000.
7. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт - Петербургское отд-ние, 2000.
8. Онищенко Г.Б. Электропривод. - М.:РАСХН, 2003.
9. <http://rutracker.org/forum/viewtopic.php?t=4380914>
10. <http://mexalib.com/view/20370>
11. <http://electrichelp.ru/osnovy-elektroprivoda/>

Приложение А

Таблица 1 - Асинхронные двигатели серии 4А

Тип двигателя	n_2 , об/мин	$P_{\text{НОМ}}$, кВт	КПД, η	$\cos\varphi_2$	$I_{\text{П}}/I_{\text{НОМ}}$	$M_{\text{П}}/$ $M_{\text{НОМ}}$	$M_{\text{МАКС}}/$ $M_{\text{НОМ}}$
4А90L2У3	2880	3	0,85	0,88	6,5	2	2,2
4А100S2У3	2880	5,5	0,88	0,91	7,5	2	2,2
4А112М2У3	2900	7,5	0,88	0,88	7,5	2	2,2
4А132М2У3	2900	11	0,88	0,9	7,5	1,6	2,2
4А160S2У3	2930	15	0,88	0,91	7,5	1,4	2,2
4А160М2У3	2900	18,5	0,89	0,92	7,5	1,4	2,2
4А180S2У3	2940	22	0,89	0,89	7,5	1,4	2,2
4А180М2У3	2920	30	0,9	0,92	7,5	1,4	2,2
4А200М2У3	2940	37	0,9	0,89	7,5	1,4	2,2
4А200L2У3	2940	45	0,91	0,9	7,5	1,4	2,2
4А225М2У3	2950	55	0,91	0,92	7,5	1,2	2,2
4А250S2У3	2960	75	0,91	0,89	7,5	1,2	2,2
4А250М2У3	2960	90	0,92	0,9	7,5	1,2	2,2
4А100S4У3	1425	3	0,82	0,83	6,5	2,0	2,2
4А100L4У3	1425	4	0,84	0,84	6,5	2,2	2,2
4А112М4У3	1450	5,5	0,86	0,85	7,0	2,0	2,2
4А132S4У3	1450	7,5	0,88	0,86	7,5	2,0	2,2
4А132М4У3	1450	11	0,88	0,87	7,5	2,0	2,2
4А160S4У3	1460	15	0,89	0,88	7,0	1,4	2,2
4А160М4У3	1460	18,5	0,9	0,88	7,0	1,4	2,2
4А180S4У3	1470	22	0,9	0,9	7,0	1,4	2,2
4А180М4У3	1470	30	0,91	0,9	7,0	1,4	2,2
4А200М4У3	1475	37	0,91	0,9	7,0	1,4	2,2
4А200L4У3	1475	45	0,92	0,9	7,0	1,4	2,2
4А225М4У3	1470	55	0,93	0,9	7,0	1,2	2,2
4А250S4У3	1480	75	0,93	0,9	7,0	1,2	2,2
4А250М4У3	1480	90	0,93	0,91	7,0	1,2	2,2
4А112М6У3	950	3	0,81	0,76	6,0	2,0	2,2
4А112L6У3	950	4	0,82	0,81	6,0	2,0	2,2
4А132S6У3	960	5,5	0,85	0,8	7,0	2,0	2,2

Приложение Б

Таблица 2 - Коэффициент полезного действия передаточных устройств

Тип передачи	КПД
Зубчатая одноступенчатая	0,8...0,9
двухступенчатая	0,75...0,8
Червячная однозаходная	0,4...0,7
двухзаходная	0,75...0,82
Плоскоременная	0,94...0,96
клиноременная	0,92...0,94
Цепная с зубчатой цепью	0,95...0,98
с втулочно-роликовой	0,94...0,97

Приложение В

Таблица 3- Значение опытного коэффициента транспортера K_T

Длина транспортера L, м	Производительность Q, т/ч					
	10	20	50	100	200	400
10	2	1,4	0,92	0,67	0,5	0,37
50	0,66	0,5	0,35	0,27	0,22	0,18
125	0,35	0,28	0,21	0,17	0,14	0,12

Приложение Г

Таблица 4- Значение опытного коэффициента транспортера K_C

Тип материала	K_C
Неабразивные материалы (зерно, опилки, щепа)	1,85...2,0
Малоабразивные материалы (каменный уголь, земля, глина)	2,5
Абразивные материалы (песок, гравий, мел)	3,2
Сильноабразивные материалы (зола, известь)	4,0

Приложение Д

Таблица 5 - Удельный вес перекачиваемой жидкости

Жидкость	γ , Н/м ³
Вода	9810
Бензин	6671-7259
Мазут	8731- 9221
Масло машинное	8809
Молоко цельное	10094
Пиво	10202
Спирт этиловый	7750
Хлористый натрий	11870
Серная кислота	17658
Патока	14224