

Министерство сельского хозяйства РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт Энергетики и природопользования

Безик В.А., Кубаткина О.В., Ковалев В.В.

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД**

Методические указания  
по выполнению лабораторных работ

Брянская область  
2019

УДК 62-83 (076)

ББК 31.291

Б 39

Безик, В. А. Электрический привод: методические указания по выполнению лабораторных работ / В. А. Безик, О. В. Кубаткина, В. В. Ковалев. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2019. – 76 с.

Методические указания содержат краткие теоретические сведения по изучаемому материалу, методические указания по выполнению работ, контрольные вопросы для проверки глубины усвоения материала. Приведенные теоретические сведения содержат основную информацию по изучаемым темам и помогают при подготовке и сдаче лабораторных работ студентам очной и заочной форм обучения направлений: 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств, 35.03.06 - Агроинженерия, 20.03.02 – Наземные транспортно-технологические комплексы.

Рецензент:

к.т.н., доцент заведующая кафедрой математики, физики и информатики Ракул Е.А. (ФГБОУ ВО Брянский ГАУ).

*Рекомендовано к изданию решением методической комиссии института энергетики и природопользования Брянского ГАУ, протокол № 7 от 04. 03. 2019 года.*

© Брянский ГАУ, 2019  
© Безик В.А., 2019  
© Кубаткина О.В., 2019  
© Ковалев В.В., 2019

## Содержание

1. Техника безопасности и общая методика выполнения лабораторных работ.....	4
1.1 Правила проведения лабораторных работ.....	4
1.2 Правила техники безопасности.....	5
2. Лабораторные работы.....	6
2.1 Лабораторная работа №1. Исследование приводных характеристик двигателей постоянного тока.....	6
2.2 Лабораторная работа №2 Исследование электропривода с асинхронным электродвигателем и редуктором.....	13
2.3 Лабораторная работа №3 Исследование средств защиты электроприводов.....	21
2.4 Лабораторная работа №4 Исследование электропривода сверлильного станка.....	35
2.5 Лабораторная работа №5 Аппаратура управления электроприводами	45
2.6 Лабораторная работа №6 Типовые узлы и схемы управления электроприводами с асинхронными двигателями.....	53
2.7 Лабораторная работа №7 Изучение процессов нагрева остывания электродвигателя.....	62
2.8 Лабораторная работа №8 Определение момента инерции электродвигателя.....	68
3. Литература.....	72
Приложение 1. Условные графические обозначения элементов на принципиальных электрических схемах.....	73
Приложение 2. Буквенные обозначения элементов на принципиальных электрических схемах.....	74

# **1. Техника безопасности и методика выполнения лабораторных работ**

Студенты направлений: 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств, 35.03.06 - Агроинженерия, 20.03.02 – Наземные транспортно-технологические комплексы – в соответствии с государственным образовательным стандартом изучают раздел «Электропривод». Основной целью проведения лабораторных работ по разделу «Электропривод» является приобретение экспериментальных навыков исследования электроприводов, закрепление и более глубокое изучение теоретического материала.

Все приводимые в данном пособии работы рассчитаны на выполнение в течении 2-х учебных часов.

## **1.1 Правила проведения лабораторных работ**

1. Студент должен явиться на лабораторные занятия подготовленным теоретически.
2. Перед началом проведения лабораторных работ получить инструктаж по технике безопасности, сделать соответствующие отметки в журнале проведения инструктажа. При нарушении правил безопасности, изменении лабораторного оборудования и др. случаях преподаватель может проверить усвоение правил техники безопасности.
3. Прежде чем приступить к работе, необходимо внимательно ознакомиться с заданием, оборудованием и измерительными приборами, литературой по теме работы.
4. Приступать к выполнению работы можно только после допуска преподавателя, который проверяет готовность студента к выполнению лабораторной работы.
5. Основные расчеты, построения согласно задания лабораторной работы производятся самостоятельно студентом после окончания выполнения работы в форме отчета.
6. По результатам выполнения работы сдается и защищается отчет, оформляемый согласно требований стандартов.
7. Графическая часть выполняется карандашом с применением чертежных принадлежностей.

8. Каждый отчет завершается выводами по работе.
9. К выполнению следующей работы допускается студент, успешно сдавший отчет по предыдущей работе.

## **1.2 Общие правила техники безопасности**

1. Без разрешения преподавателя или лаборанта лабораторные установки не включать.
2. При обнаружении неисправностей немедленно выключить установку и сообщить преподавателю или лаборанту. Нельзя оставлять включенной неисправную установку.
3. Не допускается загромождать рабочее место посторонними предметами, оборудованием и др. материалами, не относящимися к лабораторной установке.
4. Выполнять лабораторные работы только звеном в составе двух или более человек.
5. Лабораторную установку включать только после проверки и разрешения преподавателя.
6. Все изменения в электрической схеме проводить только при отключенной установке, после проверки на отсутствие напряжения измерительными приборами.
7. Не оставляйте схему под напряжением без наблюдения. По окончании измерений сразу отключайте установку.
8. По окончании выполнения лабораторных работ приведите в порядок рабочее место.

## 2. Лабораторные работы

### 2.1 Лабораторная работа №1

#### Исследование приводных характеристик двигателей постоянного тока

##### Цель работы:

- Приобретение практических навыков исследования электропривода постоянного тока.
- Исследование регулировочных и рабочих характеристик двигателей постоянного тока.

#### Теоретические сведения

Двигатели постоянного тока относятся к коллекторным двигателям. Их основной конструктивной особенностью является наличие коллектора, выполняющего роль преобразователя постоянного тока в переменный путем коммутации.

Преимущества двигателей постоянного тока:

- возможность простого и плавного регулирования скорости вращения в широком диапазоне;
- возможность получения повышенных скоростей вращения за счет изменения конструкции двигателей вне зависимости от параметров питающей сети;
- большая перегрузочная способность.

Для якорной цепи согласно второго закона Кирхгофа можно записать уравнения состояния двигателя постоянного тока независимо от типа возбуждения

$$U = E + IR, \quad (2.1.1)$$

где  $I$  и  $E$  - ток и э.д.с. якоря;

$R_{\text{я}} = R_{\text{я}} + R_{\text{доб}}$  - сопротивление цепи якоря;

$R_{\text{я}}$  - сопротивление якоря;

$R_{\text{доб}}$  - добавочное сопротивление.

Электромагнитный момент и ЭДС якоря двигателя постоянного тока определяются выражениями

$$\begin{aligned} M &= c_M \Phi I, \\ E &= c_E \Phi n, \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

где  $c_M$  и  $c_E$  - магнитная и электрическая постоянные двигателя;

$\Phi$  - магнитный поток возбуждения;

$n$  - частота вращения двигателя.

Из этих выражений можно получить зависимость частоты вращения от тока якоря, которая называется электромеханической характеристикой

$$n(I) = \frac{U - IR}{c_e \Phi} \quad (2.1.3)$$

При пуске двигателя постоянного тока  $n=0$ , следовательно ЭДС  $E=0$ , что ведет к появлению большого пускового тока  $I_{н.я.}$  через якорь (в 10 ... 20 раз больше номинального)

$$I_{н.я.} = \frac{U}{R_я} \quad (2.1.4)$$

Уменьшение пускового тока добиваются либо последовательным включением с обмоткой якоря пускового реостата  $R_n$ , либо снижением напряжения сети  $U$ . При форсированном пуске необходимо выполнять условие  $I_n \leq 2,5 I_n$ . Отсюда определяют сопротивление пускового реостата

$$R_n = \frac{U}{2,5 I_n} - R_я \quad (2.1.5)$$

или напряжение сети при пуске

$$U_n = 2,5 I_n R_я \quad (2.1.6)$$

Продолжительность пуска двигателя желательно уменьшать. Для этого магнитный поток  $\Phi$  двигателя должен быть максимальным для быстрого нарастания ЭДС  $E$  и вращающего момента  $M$ .

Реверсирование двигателя постоянного тока осуществляется изменением направления тока в одной из обмоток.

Свойства двигателей постоянного тока отражают характеристики:

1) рабочие - зависимости скорости вращения  $n(P_2)$ , тока якоря  $I(P_2)$ , вращающего момента  $M(P_2)$ , КПД  $\eta(P_2)$ , и потребляемой мощности  $P_1(P_2)$  от полезной мощности  $P_2$  на валу при условии постоянства напряжения  $U = const$ , тока возбуждения  $I_B = const$  и отсутствии добавочных сопротивлений. Рабочие характеристики двигателя снимают, изменения момент на валу от 0 до  $1,2 M_n$ , где  $M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n}$  Н•м;

2) механическая  $n(M)$ , аналитический вид которой получают из выражений (2.1.1) - (2.1.3):

$$n(M) = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{9,55 c_e^2} M \quad (2.1.7)$$

Механическая характеристика двигателя, полученная при номинальном напряжении, номинальном токе возбуждения и отсутствии добавочный сопротивлений называется естественной механической характеристикой. Все остальные механические характеристики, полученные при изменении какого-либо параметра ( $U$ ,  $\Phi$  или  $R_{\text{д}} \neq 0$ ), называются искусственными или регулировочными.

Значения полезной  $P_2$  и потребляемой  $P_1$  мощностей определяют из выражений

$$P_2 = \frac{M \cdot n}{9,55} \quad (2.1.8)$$

$$P_1 = U (I_{\text{я}} + I_{\text{в}}), \quad (2.1.9)$$

а КПД двигателя находят как отношение полезной мощности к потребляемой из сети:

$$\eta = P_2 / P_1. \quad (2.1.10)$$

Для всех типов двигателей постоянного тока характер изменения зависимостей  $I_{\text{я}}(P_2)$ ,  $M(P_2)$  и  $\eta(P_2)$  одинаков: ток якоря и момент нелинейно возрастают, а КПД, изменяясь от нуля, достигает максимума при  $P_2 \approx 0,75 P_{2\text{н}}$ . При дальнейшем увеличении нагрузки КПД уменьшается.

Характер зависимости  $n(P_2)$  и  $n(M)$  определяется типом возбуждения двигателя. При независимом и параллельном возбуждении магнитный поток двигателя постоянен ( $\Phi = \text{const}$ ) и зависимости имеют вид слабо падающих линейных графиков. Двигатели последовательного и смешанного возбуждения характеризуются переменным магнитным потоком  $\Phi_{\text{посл}} = \text{var}$ , пропорциональным (если сердечник не насыщен) току якоря, в связи с чем скорость вращения у них падает по гиперболическому закону, при приближении нагрузки к номинальной. При большей нагрузке и насыщении сердечника характеристики приближаются к линейным.

Двигатели постоянного тока выгодно отличаются от двигателей переменного тока возможностью простого и плавного регулирования скорости вращения. Из выражения (2.1.3) видно, что регулировать скорость вращения двигателей постоянного тока можно тремя способами:

1. Изменением сопротивления цепи якоря добавочным сопротивлением  $R_{\text{д}}$ :

$$n(M) = \frac{U}{c_E \Phi} - M \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{доб}}}{c_E^2 \Phi^2} \quad (2.1.11)$$



В этом случае семейство характеристик (при  $R_D = var$ ) выходит из одной точки – точки идеального холостого хода. Скорость идеального холостого хода

$$n_0 = \frac{U}{c_e \Phi}, \quad (2.1.12)$$

при условии  $\Phi = const, n_0 = const$  для двигателей независимого, параллельного и смешанного возбуждения. Для двигателя последовательного возбуждения магнитный поток - величина переменная, при пуске  $\Phi \rightarrow 0$  и

$$n_0 = \frac{U_{сети}}{c_e \Phi_{\rightarrow 0}} \rightarrow \infty, \quad (2.1.13)$$

поэтому регулировочные характеристики этого двигателя асимптотически приближаются к оси  $n$ . При увеличении  $R_D$  механическая характеристика приобретает больший наклон. Регулирование осуществляется только вниз от основной скорости и неэкономично. Момент двигателя при изменении  $R_D$  не изменяется, поэтому такое регулирование скорости двигателя постоянного тока называют регулированием с постоянным моментом.

2. Изменением магнитного потока двигателя за счет изменения тока возбуждения. Регулирование скорости этим способом возможно вверх от основной скорости путем уменьшения  $I_B$  и оно осуществляется при  $P_H = M \cdot n = const$ . Способ весьма экономичен, так как ток возбуждения незначителен по сравнению с током якоря (для двигателей независимого и параллельного возбуждения  $I_B = (0,01...0,07) I_A$ ). Регулирование магнитного потока в двигателях последовательного возбуждения производят путем шунтирования обмотки возбуждения.

3. Изменением напряжения, подводимого к обмотке якоря при  $U_{возб} = const$ . Способ технически сложный с высокой стабильностью скорости на регулировочных характеристиках.

### Программа работы

1. Снять и построить естественную механическую характеристику двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
2. Снять и построить искусственные механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения:
  - с добавочным сопротивлением в цепи якоря,
  - с уменьшенным магнитным потоком,
  - при уменьшенном напряжении питания.
3. Снять и построить естественную механическую характеристику двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.
4. Снять и построить искусственную механическую характеристику двигателя постоянного тока смешанного возбуждения с добавочным сопротивлением в цепи якоря.
5. Построить рабочие характеристики ( $n(P_2), I_A(P_2), M(P_2)$  и  $\eta(P_2)$ ) для всех случаев.

## Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания и литературу по теме работы.
2. Изучить схему лабораторной установки, конструкцию и принцип работы двигателя постоянного тока. Записать паспортные данные электродвигателя, приборов, автотрансформатора, коммутационных аппаратов.
3. Снять естественную механическую характеристику двигателя при параллельном возбуждении. Для этого установить переключатель QS1 в положение «параллельное», QS2 в положение «двигатель». Реостаты R1 и R2 полностью вывести (крайнее нижнее положение). Вывести влево до отказа правую ручку автотрансформатора T1 (соответствует моменту сопротивления на валу  $M_c = 0$ ) и левую ручку автотрансформатора T1 (соответствует напряжению питания  $U = 0$  В). Медленно вращая левую ручку автотрансформатора вправо, установить напряжение на двигателе  $U = 220$  В. Записать параметры схемы в режиме холостого хода. Изменяя с помощью правой ручки автотрансформатора момент сопротивления дискретно через  $0,5$  Н м, снять показания приборов. Занести полученные данные в таблицу 1. (Для параллельного возбуждения достаточно измерять  $M_c$  через  $1$  Н м. Наименьшее деление тормоза соответствует  $0,5$  Н м)

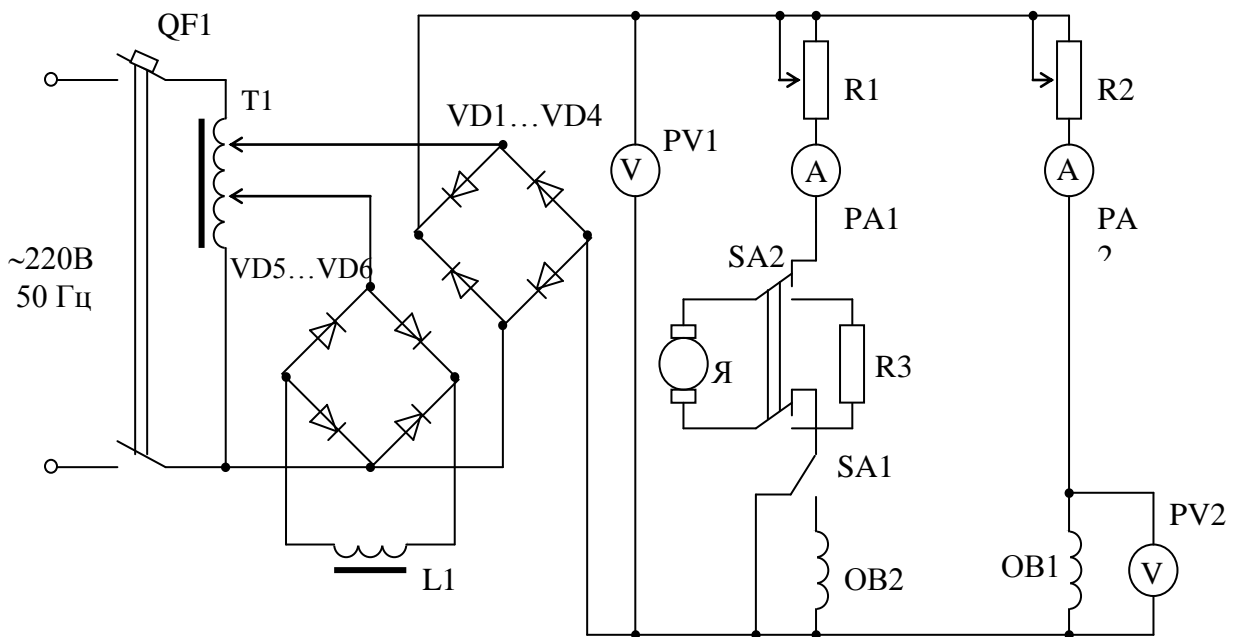


Рисунок 2.1.1 Схема лабораторной установки для исследования приводных характеристик двигателя постоянного тока

4. Снять естественную механическую характеристику двигателя при смешанном возбуждении. Для этого повторить измерения пункта 2 при положении переключатель QS1 «смешанное».
5. Снять искусственные механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при  $R_d \neq 0$  (введенном реостате R1),  $I_b < I_{bн}$  (введенном реостате R2) и  $U < U_n$ , а также искусственную механическую характери-

стику двигателя при смешанном возбуждении и  $R_d \neq 0$ . Измеренные данные занести в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты измерения естественных и искусственных характеристик двигателя постоянного тока ( $U_H = 220\text{В}$ ,  $I_H = 4,5\text{А}$ )

Тип возбуждения	$M_c$ , Нм	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$I_a$ А	$I_b$ А	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\eta$
Параллельное $U=U_H$ , $R_d=0$ , $I_b=I_{bH}$	0						
	1						
	2						
	3						
	4						
Параллельное $U=U_H$ , $I_b=I_{bH}$ $R_d=$	0						
	1						
	2						
	3						
	4						
Параллельное $U=U_H$ , $R_d=0$ , $I_b=$	0						
	1						
	2						
	3						
	4						
Параллельное $R_d=0$ , $I_b=I_{bH}$ $U=$	0						
	1						
	2						
	3						
	4						
Смешанное $U=U_H$ , $R_d=0$ , $I_b=I_{bH}$	0						
	0,5						
	1						
	1,5						
	2						
	3						
	4						
5							
Смешанное $U=U_H$ , $I_b=I_{bH}$ , $R_d=$	0						
	0,5						
	1						
	1,5						
	2						
	3						
	4						
5							

6. Построить механические характеристики двигателя отдельно для параллельного и смешанного возбуждения.

7. Построить рабочие характеристики  $n(P_2)$ ,  $I_a(P_2)$ ,  $M(P_2)$  и  $\eta(P_2)$  двигателя отдельно для параллельного и смешанного возбуждения.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы,
2. Схема лабораторной установки,
3. Таблица с измеренными и вычисленными данными,
4. Примеры вычислений,
5. Графики зависимостей  $n(P_2)$ ,  $I_a(P_2)$ ,  $M(P_2)$  и  $\eta(P_2)$  и механические характеристики. Все механические характеристики изображать на одном рисунке, так же на следующем рисунке изобразить все рабочие характеристики,
6. Марки и характеристики используемых установок и приборов,
7. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Какой вид имеют механические характеристики двигателей постоянного тока параллельного и смешанного возбуждений?
2. Какую роль выполняет коллектор в двигателях постоянного тока?
3. Как изменяется механическая характеристика двигателя постоянного тока при изменении напряжения якоря? Почему?
4. Как изменяется механическая характеристика двигателя постоянного тока при изменении магнитного потока? Почему?
5. Какие вы знаете способы регулирования скорости двигателя постоянного тока?
6. Какие вы знаете режимы торможения присущие двигателям постоянного тока?
7. Все ли типы двигателей постоянного тока допускают рекуперативный режим торможения?
8. Сравните тормозные режимы по их эффективности и экономичности.
9. Объясните назначение элементов в схеме лабораторной установки.
10. Как меняется жесткость механической характеристики двигателя постоянного тока при введении добавочного сопротивления в якорную цепь, в цепь обмотки возбуждения?
11. Какие показатели регулирования скорости Вы знаете?
12. Что такое реакция якоря? К каким последствиям она приводит?
13. С какой целью в мощных коллекторных двигателях устанавливают добавочные полюса?

## 2.2 Лабораторная работа №2

### Исследование электропривода с асинхронным электродвигателем и редуктором

#### Цель работы:

- освоение методики построения механических характеристик электродвигателя в установившемся режиме работы электропривода;
- исследование параметров электропривода с асинхронным электродвигателем и особенностей его работы.

#### Теоретические сведения

Асинхронные электродвигатели (АД) получили наибольшее применение в сельскохозяйственном электроприводе, так как имеют простую конструкцию, сравнительно невысокую стоимость, надежны и удобны в монтаже и эксплуатации. Они бывают двух типов: с короткозамкнутым ротором и фазным (с контактными кольцами). Последние имеют на роторе (как и на статоре) трехфазную обмотку, соединенную звездой, концы которой наглухо подсоединены к контактному кольцу вала электродвигателя. С внешней стороны к ним через металлографические щетки обычно подключается трехфазный реостат, с помощью которого управляют приводными свойствами АД. Чаще всего используются трехфазные АД и лишь при однофазном электропитании - однофазные или трехфазные в однофазном режиме включения.

Принцип работы АД заключается в следующем. Вращающееся магнитное поле, созданное трехфазной обмоткой статора, пересекает проводники обмотки ротора и в соответствии с законом электромагнитной индукции создает в них электродвижущую силу (ЭДС). Под действием ЭДС, если проводники замкнуты, по ним потечет ток, который, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем статора согласно правилу Ленца, создает вращающий момент, заставляющий ротор вращаться в сторону вращения магнитного поля статора.

При этом частота вращения магнитного поля  $n_1$ , называемая также синхронной частотой вращения ротора, равна

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \quad (2.2.1)$$

где  $f_1$  - частота тока питающей сети, Гц;  
 $p$  - число пар полюсов обмотки статора.

Так как " $p$ " может быть только целочисленным, то при общепринятой частоте 50 Гц синхронные частоты вращения АД могут принимать значения согласно таблице 2.2.1

Синхронные частоты асинхронных двигателей

p	1	2	3	4	5	6
$n_1, \text{мин}^{-1}$	3000	1500	1000	750	625	500

Момент на валу АД возникает только при различии частот вращения ротора  $n_2$  и магнитного поля статора  $n_1$ . Это различие оценивают в относительных единицах и называют скольжением:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}, \quad (2.2.2)$$

где  $n_1, \omega_1$  – синхронная частота и скорость вращения,  
 $n_2, \omega_2$  – частота и скорость вращения ротора.

Отсюда и название типа электродвигателя – асинхронный, т.е. не синхронный.

Для определения электромагнитного момента асинхронного двигателя часто используют простую формулу, которую в 1906 году предложил М. Клосс.

$$M = \frac{2M_k(1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k}, \quad (2.2.3)$$

где  $a = r_1'/r_2$ ,

$r_1', r_2$  – приведенное активное сопротивление вторичной обмотки и активное сопротивление первичной обмотки;

$M_k$  – максимальный (критический) момент АД;

$s_k$  – критическое скольжение.

Для оценочных расчетов и при мощностях АД свыше 15 кВт допустимо принять упрощенную формулу Клосса, пренебрегая малым критическим скольжением

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}. \quad (2.2.4)$$

Она дает достаточно точные результаты при скольжениях от 0 до критического. Характерный вид механической характеристики АД изображен на рисунке 2.1.1.

Используя паспортные данные: кратность критического момента –

$M_k^\circ = M_k/M_H$ , номинальное скольжение -  $s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1}$  из формулы Клосса можно получить выражения для нахождения критического скольжения

$$s_k = s_H \frac{M_k^i + \sqrt{M_k^{i2} - 1 + 2s_H(M_k^i - 1)}}{1 - 2s_H(M_k^i - 1)},$$

$$s_k = s_H M_k^i + \sqrt{M_k^{i2} - 1}. \quad (2.2.5)$$

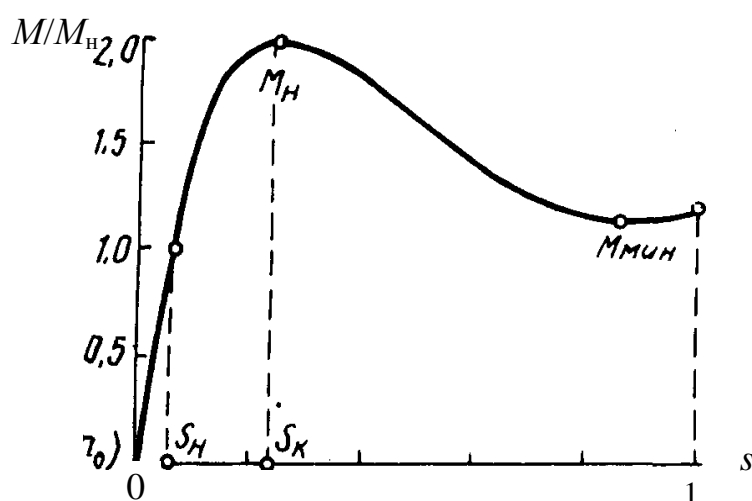


Рисунок 2.2.1. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Необходимо отметить, что пусковой ток АД с короткозамкнутым ротором значительно больше номинального и превышает его в 3,5...7,5 раз, а ток холостого хода составляет от 20% до 80% номинального. Большие значения тока холостого хода соответствуют двигателям тихоходным малой мощности.

Для улучшения пусковых свойств большинство современных АД выполняют с глубокими пазами ротора. Для АД с глубокопазным ротором, а таковыми являются все серийные АД с отлитым короткозамкнутым ротором из алюминия, из-за значительного изменения параметров цепи ротора с изменением скольжения, прежде всего по причине эффекта вытеснения тока к поверхности ротора, вращающие моменты в пусковой части механической характеристики АД для  $s > s_k$ , вычисленные по формулам Клосса, существенно занижаются. Кроме того из-за влияния высших гармоник поля при скольжении  $s = 0,8$  в механической характеристике наблюдается провал. Поэтому целесообразно механическую характеристику таких АД в пусковой части строить на основании расчета пускового и минимального вращающих моментов по их кратностям, приводимых в справочных данных на эти двигатели:  $M_{II}^\circ = M_{II}/M_H$  для  $s = 1$  и  $M_{мин}^\circ = M_{мин}/M_H$  - для  $s = 0,8$ .

В сельских сетях электроснабжения из-за их протяженности и малой пропускной способности напряжение питания АД нередко существенно отличается от номинального. В этом случае все вращающие моменты АД для фиксированных частот вращения следует пересчитать пропорционально квадрату относительного напряжения:  $M^0 = M (U/U)^2$ .

При потере электропитания одной из фаз трехфазный АД оказывается в непредусмотренном однофазном режиме. Он возникает при перегорании плавкой вставки предохранителя одной фазы, при обрыве одного из фазных проводов и т.д. В этом случае трехфазный АД оказывается в режиме однофазного на линейном напряжении двух оставшихся фаз. При пуске он не будет вращаться, так как не развивает пускового момента, а при работе его дальнейшее состояние зависит от нагрузки на валу.

В однофазных двигателях и при включении трехфазного в однофазную цепь на период пуска, пусковую обмотку однофазного АСД или часть обмоток трехфазного АСД, используемую в качестве пусковой обмотки, подключают к сети через фазосдвигающие элементы в виде резистора или конденсатора. Это необходимо для создания фазового сдвига тока в пусковой обмотке относительно тока в рабочей, в результате которого возникает пусковой вращающий момент. После пуска пусковую обмотку или ее часть отключают.

Наибольший угол фазового сдвига, а соответственно и большее значение пускового момента двигателя обеспечивается при использовании в качестве фазосдвигающего элемента конденсатора. Это отражено на механических характеристиках однофазного АД, представленных на рисунке 2.2.2а, а на рисунке 2.2.2б приведены основные схемы включения трехфазных АД напряжением 380/220 В в однофазную электрическую сеть напряжением 220 В.

Мощность АД в однофазном режиме по отношению к трехфазному обычно составляет  $P_1 = (0,5...0,6) P_3$ .

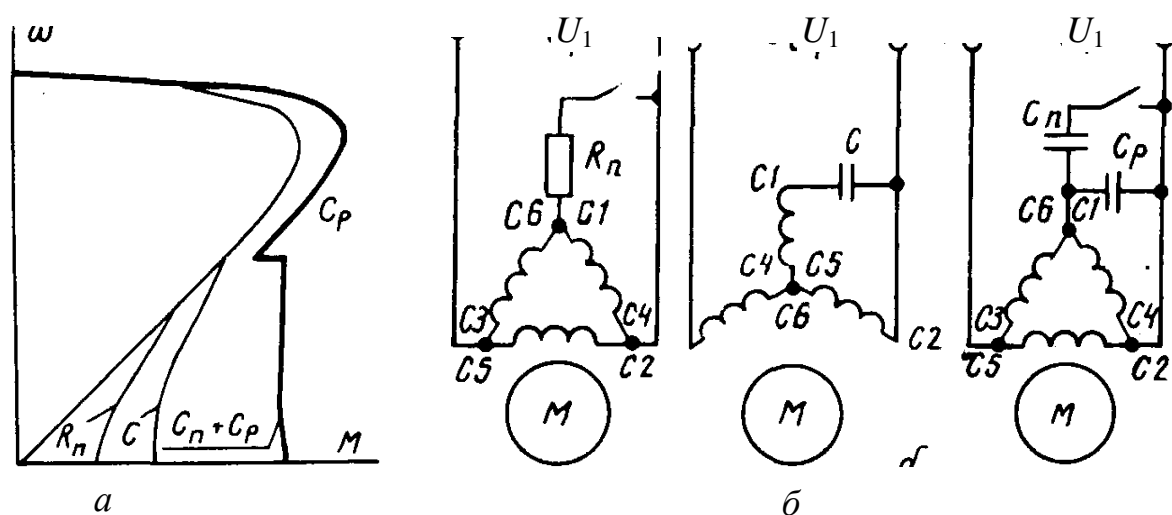


Рисунок 2.2.2. Механические характеристики однофазных АД (а) и возможные схемы включения трехфазных АД в однофазный режим (б)



Когда питающая сеть электропитания однофазная, то трехфазный АД можно использовать в предусмотренном режиме работы как однофазный. В этом случае по режиму работы он ничем не отличается от однофазного АД, который содержит на статоре помимо рабочей обмотки еще и пусковую, сдвинутую пространственно на 90 электрических градусов относительно рабочей.

Мощность однофазных АД, как правило, не превышает 3 кВт. Их ротор короткозамкнутый. При больших мощностях используют трехфазные АД в однофазном включении.

### **Программа работы**

1. Снять механическую характеристику асинхронного двигателя,
2. Произвести расчеты электропривода и построить механическую характеристику двигателя, электропривода, рабочие характеристики
3. Произвести измерения времени полной остановки электропривода и рассчитать маховый момент привода,
4. Сделать выводы по работе.

### **Порядок выполнения работы**

1. Изучить методические указания и литературу по теме работы.
2. Ознакомиться со схемой лабораторного стенда и записать основные паспортные характеристики его элементов.

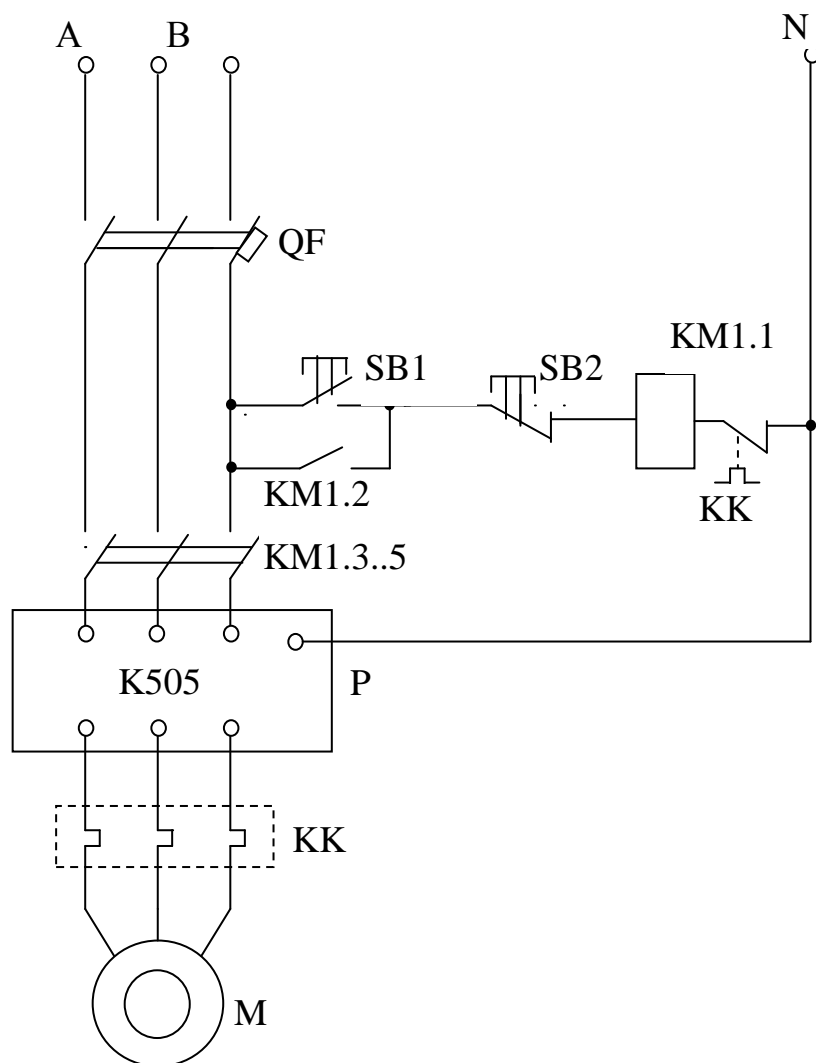


Рисунок 2.2.3 Схема лабораторной установки для исследования электропривода с асинхронным двигателем

3. Изменяя нагрузку редуктора с помощью фрикционного тормоза, измерить 5 значений момента сопротивления механизма  $M_p = F_p \cdot L$ , где  $F_p$  – показания динамометра,  $L = 0,115$  м – плечо силы, равное радиусу шкива тормоза. Одновременно фиксировать частоту вращения  $n_d$  вала двигателя и электрические параметры двигателя: ток  $I$  (А), потребляемую активную мощность  $P_{дэ}$  (Вт).

4. Измеренные данные занести в таблицу 2.2.2. На холостом ходу за счет трения в редукторе на валу двигателя момент  $M_{с0} = 0,5$  Н·м. Он добавляется к рассчитанному моменту по показаниям динамометра.

## Результаты измерений и вычислений при исследовании электропривода

№ п/п	Измерено				Вычислено						
	F <sub>p</sub> , Н	n <sub>д</sub> , мин <sup>-1</sup>	I <sub>д</sub> , А	P <sub>дэ</sub> , Вт	M <sub>p</sub> , Нм	n <sub>p</sub> , мин <sup>-1</sup>	P <sub>p</sub> , Вт	η <sub>p</sub>	M <sub>с</sub> , Н·м	P <sub>дм</sub> , Вт	η <sub>пр</sub>
1	0								0,5		
2	40										
3	80										
4	120										
5	160										
6	200										

5. Пользуясь измеренными данными вычислить мощность редуктора

$$P_p = \frac{M_p n_p}{9,55} \text{ , Вт,}$$

где  $n_p = n_d/i = n_d/19$  – частота вращения шкива редуктора,

$n_d$  – частота вращения вала двигателя,

$i$  - передаточное число редуктора ( $i = 19$ ).

6. Определив по графику КПД редуктора  $\eta_p$ , соответствующий данной мощности редуктора  $P_p$ , вычислить момент на валу двигателя

$$M_\delta = M_c = \frac{M_p}{i \cdot \eta_p},$$

где  $M_c$  – момент сопротивления механизма, приведенный к валу электродвигателя;

7. Вычислить механическую мощность  $P_{дм}$

$$P_{дм} = \frac{M_\delta n_\delta}{9,55} .$$

Далее КПД электропривода

$$\eta_{прив} = \frac{P_{дм}}{P_{дэ}} ,$$

где  $P_{\text{дм}}$  – механическая мощность на валу редуктора,  
 $P_{\text{дэ}}$  – электрическая мощность потребляемая двигателем из сети.

8. Построить механические характеристики электродвигателя и электропривода (двигателя и редуктора) в виде графиков зависимостей  $n_{\text{д}}(M_{\text{д}})$  и  $n_{\text{р}}(M_{\text{р}})$ , зависимость КПД электропривода от мощности на валу редуктора  $\eta(P_{\text{р}})$ .

9. Определить маховый момент электропривода, приведенный к валу двигателя. Для этого при  $M_{\text{с}} = 0,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$  (холостой ход) провести 3 опыта по измерению времени полной остановки электродвигателя и вычислить среднее время остановки  $t$ .

10. Используя уравнение

$$t = \frac{GD^2}{375} \frac{n_2 - n_1}{M_{\text{с}}},$$

Вычислить значение махового момента привода  $GD^2 = GD_{\text{д}}^2 + GD_{\text{м}}^2$  полагая  $n_1 = n_{\text{д}}$  в момент отключения электродвигателя, а  $n_2 = 0$ .

### Содержание отчета

1. Паспортные данные используемых приборов и оборудования,
2. Таблицы с измеренными и вычисленными параметрами. Примеры выполнения расчетов,
3. Графики механических характеристик двигателя  $n_{\text{д}}(M_{\text{д}})$  и электропривода  $n_{\text{р}}(M_{\text{р}})$ , зависимости  $\eta(P_{\text{р}})$ ,
4. Измеренные данные времени торможения и расчеты махового момента электропривода.

### Контрольные вопросы

1. Что такое естественная механическая характеристика асинхронного двигателя?
2. Изобразить на одном графике естественную и искусственную с добавочным сопротивлением в цепи ротора механические характеристики АД.
3. Как изменится вид механической характеристики АД при замене его короткозамкнутого медного ротора на алюминиевый?
4. Перечислить режимы торможения, реализуемые в АД?
5. Что такое динамический момент электропривода?
6. Как определить динамический момент электропривода:  
а) из каталожных данных; б) экспериментально?
7. Какое максимальное снижение напряжения на зажимах двигателя допустимо для данного электропривода ?
8. Как определить коэффициент мощности электропривода?

9. Как оценить достоверность экспериментального определения КПД электропривода?

10. Может ли механическая характеристика асинхронного двигателя пересекать ось частоты вращения ?

11. Обоснован ли выбор АД для данного механизма с точки зрения экологии?

## 2.3 Лабораторная работа №3

### Исследование средств защиты электроприводов

#### Цель работы:

1. Изучить устройство, принцип действия и основные параметры защитной аппаратуры электродвигателей.

2. Освоить методику снятия защитных характеристик и выбора средств защиты двигателей от аварийных режимов работы.

#### Теоретические сведения

Основными аварийными режимами для электродвигателей являются: короткое замыкание, перегрузка, неполнофазные режимы. Короткое замыкание характеризуется быстрым (доли секунд) и многократным превышением тока от рабочих значений. Перегрузка характерна относительно небольшим (десятки процентов) и чаще длительным (единицы минут) превышением тока рабочих значений. Неполнофазные режимы возникают при несимметрии питающего напряжения. При этом ток в фазе (фазах) с меньшим напряжением снижается, в остальных увеличивается. При обрыве фазы, в оставшихся ток возрастает в  $\sqrt{3}$  раз.

Рассмотрим аппараты используемые для защиты электроприводов.

**Предохранители** — самая простая и дешевая аппаратура защиты электроприемников от токов короткого замыкания. Они состоят из корпуса и плавкой вставки, изготовляемой из медной или цинковой проволоки (ленты), а также из свинца и его сплавов, алюминия и серебра.

При прохождении тока по плавкой вставке она нагревается и, когда сила тока превышает допустимый предел, вставка расплавляется, отключая электроприемник.

Выбор предохранителя основывается на его время-токовой характеристике (зависимости времени срабатывания от протекающего тока). Т.к. двигатель обладает повышенными пусковыми токами, способными привести к перегоранию плавкой вставки, то именно по пусковому току проводится выбор предохранителей. Ток плавкой вставки должен удовлетворять условию

$$I_{\text{вс}} \geq \frac{I_n}{\alpha} = \frac{k_i I_n}{\alpha} \quad (2.3.1)$$

где  $I_n$  — номинальный ток электродвигателя,  
 $k_i$  — коэффициент кратности пускового тока;  
 $I_n$  — пусковой ток электродвигателя,  
 $\alpha$  - коэффициент, учитывающий длительность пуска,  
 $\alpha = 2,5$  — при редких пусках с продолжительностью до 2,5 с;  
 $\alpha = 2,5$ —2,0 — при нечастых пусках длительностью от 2,5 до 10 с;  
 $\alpha = 1,6$ —2,0 — при частых пусках длительностью более 10 с.

Для осветительной нагрузки и электроприемников с небольшими пусковыми токами плавкие вставки выбирают, исходя из условия

$$I_{вс} \geq I_n \quad (2.3.2)$$

где  $I_n$  — расчетный ток нагрузки.

Для электродвигателей ответственных механизмов с целью особо надежной отстройки предохранителей от бросков тока допускается принимать  $\alpha = 1,6$  независимо от условий пуска электродвигателя.

При защите предохранителями участка цепи с несколькими потребителями в расчете берется вместо пускового тока максимально возможный ток цепи (с учетом повышенных пусковых токов потребителей).

Во всех случаях номинальный ток плавкой вставки должен быть равен или больше расчетного тока цепи.

Найденное расчетное значение номинального тока плавкой вставки округляется до ближайшего большего значения согласно.

Для защиты цепи с несколькими электродвигателями номинальный ток плавкой вставки выбирают из условия:

$$I_B \geq \frac{\sum I_{Hi} + k_i I_H}{\alpha}, \quad (2.3.3)$$

где  $\sum I_{Hi}$  — сумма номинальных токов одновременно работающих электродвигателей (без учета тока двигателя с наибольшим пусковым током);

$I_n$  — номинальный ток электродвигателя с наибольшим пусковым током в этой группе двигателей;

$k_i$  — кратность пускового тока,

$\alpha$  — коэффициент, характеризующий условия пуска этого двигателя.

Все последовательно установленные предохранители должны по возможности работать селективно (избирательно), т.е. каждый предохранитель должен срабатывать (перегорать) только тогда, когда повреждение произойдет на за-

щищаемом им участке. Для этого номинальные токи плавких вставок предохранителей, установленных в сети один за другим (в направлении от источника электрической энергии к потребителю), должны различаться между собой не менее, чем на одну ступень при небольших токах предохранителей и на 2 ступени при больших токах.

Плавкие вставки для предохранителей выпускают на номинальные токи от 0,15 до 1000 А.

Для сокращения размеров распределительных устройств выпускаются блоки предохранитель—выключатель (БПВ), обеспечивающие отключение номинальных токов и защиту от коротких замыканий. Трехполюсные блоки изготовляют с боковым приводом и боковой рукояткой. В стальном корпусе помещена пластмассовая траверса, на которой укреплены три патрона трубчатых предохранителей. Замена предохранителей возможна лишь в отключенном положении аппарата. При вращении рукоятки траверса с предохранителями перемещается и контакты аппарата замыкаются или размыкаются. Блоки предохранитель—выключатель изготовляют на токи до 350 А.

Таблица 2.3.1

Паспортные данные предохранителей

Тип	Номинальный ток предохранителя, А	Номинальный ток плавкой вставки, А
ПР-2	15	6, 10, 15
	60	5, 20, 25, 35, 45, 60
	100	6, 80, 100
	200	100, 125, 150, 200
	250	200, 225, 260, 300, 350
	600	350, 430, 500, 600
НПН-15	15	6, 10, 15
НПН-60	60	15, 20, 25, 35, 45, 60
НПР-100	100	60, 80, 100
НПР-200	200	100, 125, 160, 200
ПНР-250	250	80, 100, 120, 150, 200, 250
ПНР400	400	200, 250, 300, 350, 400

Серьезный недостаток плавких предохранителей в том, что плавкая вставка расплавляется при токе, превышающем номинальное значение на 30...60%, и электродвигатель, который она защищает, может длительное время работать при значительных перегрузках. Эти перегрузки создают опасность для его изоляции.

Кроме того, при аномальных режимах, как правило, перегорает только один предохранитель, создавая неполнофазный режим работы, приводящий к выходу из строя трехфазного электродвигателя.

По конструкции плавкие предохранители бывают резьбового типа и трубчатые. Предохранители резьбовые типа ПРС выпускаются на номинальные токи 6; 20; 63; 100 А. Более совершенные трубчатые предохранители с трубками из фибры. При коротком замыкании цинковая плавкая вставка сгорает, фибра под воздействием высокой температуры разлагается и выделяет большое количество газов, давление внутри трубки возрастает, что приводит к уменьшению времени, горения дуги. Промышленностью выпускает трубчатые предохранители с закрытыми фибровыми патронами без наполнителя типа ПР-2 с разборными или неразборными стеклянными патронами с наполнителем типа НИР. В качестве наполнителя применяется кварцевый песок, который способствует интенсивному охлаждению и деионизации газов, образующих при возникновении электрической дуги.

Существенными недостатками предохранителей являются большой разброс токов срабатываний, определяемых наличием малозаметных дефектов и старением плавкой вставки.

Для защиты от токовых перегрузок наиболее часто используют *тепловые реле*, состоящие из последовательного нагревателя, биметаллической пластины и механически связанного с ней подвижного контакта. При превышении номинального тока реле за счет нагрева биметаллическая пластина изгибается и приводит к размыканию контактов.

Таблица 2.3.2

Технические данные тепловых реле серий ТРН, ТРП

Тип реле	$I_n$ реле, А	Номинальный ток нагревателей, А	Тип пускателя
ТРН-10	10	0,5;0.63;0.8;1.0;1.25;1.6	ПМЕ-011
		2.0;2.5;3.2;4.5;6.3; 8.0;10.0	ПМЕ-111
ТРН-25	25	5.0;6.3;8.0;10.0;12.5;16.0;25	ПМЕ-211
ТРН-40	40	12.5;16.0;20.0;25.0; 32.0;40.0	ПА-311
ТРП-60	60	20;25;30;40;50;60	ПА-411
ТРП-150	150	50;60;80;100;125; 150	

По способу нагрева различают реле прямого нагрева (ток проходит по пластине) и косвенного (используется специальный нагреватель). По числу контролируемых фаз тепловые реле выпускаются одно, двух и трехполюсными. Нагревательные элементы включаются в цепь питания двигателя, а нормально замкнутый контакт последовательно с катушкой магнитного пускателя. Большинство реле имеет регулировку тока срабатывания и кнопку возврата, приводящую реле в рабочее состояние после срабатывания.



## Технические данные тепловых реле серии РТЛ

Тип реле	Диапазон регулирования номинального тока несрабатывания, А
Номинальный ток 25 А	
РТЛ-1002	0,16...0,26
РТЛ-1003	0,24...0,40
РТЛ-1004	0,38...0,65
РТЛ-1005	0,61...1,00
РТЛ-1006	0,95...1,60
РТЛ-1007	1,50...2,60
РТЛ-1008	2,4...4,0
РТЛ-1010	3,8...6,0
РТЛ-1012	5,5...8,0
РТЛ-1014	7,0...10,0
РТЛ-1016	9,5...14,0
РТЛ-1021	13...19
РТЛ-1022	18...25
Номинальный ток 80 А	
РТЛ-2053	23...32
РТЛ-2055	30...41
РТЛ-2057	38...52
РТЛ-2059	47...64
РТЛ-2061	54...74
РТЛ-2063	63...86

Номинальный ток теплового реле  $I_{н.расц.}$  должен быть больше или равен номинальному току защищаемого двигателя  $I_{н.двиг.}$ , по возможности токи должны совпадать

$$I_{н.расц.} \geq I_{н.дв.} \quad (2.3.4)$$

Тепловое реле – инерционный элемент, его срабатывание происходит в течении единиц или десятков минут. Поэтому оно не может эффективно защитить от коротких замыканий, которые могут даже вывести тепловое реле из строя.

**Автоматические выключатели (автоматы)** предназначены для коммутации цепей и защиты электрических установок от перегрузок и коротких замыканий, для нечастых оперативных коммутаций силовых электрических цепей (до 30 коммутаций в час).

В конструкции автоматических выключателей имеются электромагнитные и

тепловые расцепители. Электромагнитные расцепители срабатывают мгновенно, а тепловые с выдержкой времени, зависящей от значения протекающего тока нагрузки.

*Электромагнитный расцепитель* служит для защиты электроприемников от токов короткого замыкания. *Тепловой расцепитель* служит для защиты электроприемников от перегрузок.

Некоторые типы автоматических выключателей имеют расцепители минимального напряжения, которые обеспечивают нулевую защиту.

Тепловые расцепители регулируют на различные токи перегрузки, электромагнитные расцепители не регулируют. Шкала номинальных токов расцепителей максимального тока имеет следующие ступени: 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0 А.

Автоматические выключатели выбираются из условий:

$$500B \geq U_H \geq U_P \quad I_H \geq I_P \quad (2.3.5)$$

где  $U_H, I_H$  – номинальное напряжение и номинальный ток аппарата, В и А.  
 $U_P, I_P$  – рабочее напряжение и рабочий ток коммутируемой цепи, В и А.

Таблица 2.3.4

Автоматические воздушные выключатели

Тип	Номинальный ток, А	Напряжение, В	Число полюсов	Ток уставки, А	Предельный ток отключения, кА		Время отключения, с	Габариты, мм
					постоянный	переменный		
АС-25	25	220, 380	2, 3	1...20	1,252	0,3...2	-	73x90x109
АП-50	50	220, 380	2, 3	1,6...50	3,2	2	-	210x160x143
A3160	50	110, 220	1, 2, 3	15...50	1,6..3,6	2,5..4,5	0,025	158x105x89
A3110	100	220	2, 3	15...100	5	2,5...10	0,015	237x105x112
A3120	200	220	2, 3	15...100	20	18	0,015	258x153x105
A3130	200	220	2, 3	100..200	17...28	14...25	0,015	300x199x106
A3140	600	220	2, 3	100..200	17...28	14...25	0,015	561x217x141
A3710	160...630	440, 660	2, 3	250...600	25...50 110	32...40 40...60	0,03	225x500x190

Номинальный ток теплового расцепителя выбирают из условия:

$$I_{H.PACЦ} \geq I_{H.ДВ} \quad (2.3.6)$$

Ток уставки электромагнитного расцепителя выбирается исходя из условия недопустимости срабатывания расцепителя при пусковых токах электродвигателя:

$$I_{УСТ.ЭМ} \geq 1,5I_{ПУС} \quad (2.3.7)$$

Ток уставки электромагнитного расцепителя для группы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором выбирается исходя из:

$$I_{УСТ.ЭМ} \geq 1,5 \left[ \sum_1^n I_{H.ДВ.} + (I_{ПУСК.ДВ.} - I_{H.ДВ.}) \right] \quad (2.3.8)$$

где  $(I_{пуск. дв.} - I_{ном. дв.})$  - разность пускового и номинального токов наиболее мощного электродвигателя, А.

Кроме того, следует учитывать, что номинальный ток теплового расцепителя для электродвигателей с длительным режимом работы ( $S_1$ ) и тяжелыми условиями пуска выбирается из условия  $I_{H.PACЦ} \geq 1,5I_{H.ДВ}$

При исчезновении напряжения на одной из фаз на зажимах работающего трехфазного двигателя, двигатель может продолжать работать. При неизменной нагрузке на вал двигателя ток в двух обмотках неповрежденных фаз возрастает в  $\sqrt{3}$  раза, что приводит к перегреву двигателя. Если же нагрузка на валу двигателя переменная или превышает номинальную (например, двигатель выбран на кратковременный режим работы), то возможна остановка вала двигателя без отключения его от сети. В случае неисправности или неправильного выбора тепловой защиты двигателя (что на практике встречается довольно часто), двигатель выходит из строя из-за повреждения изоляции в результате перегрева. Поэтому, целесообразно в схемах управления электроприводом применять защиту от неполнофазных режимов, обеспечивающую отключение электродвигателя при несимметрии питающего напряжения или исчезновении напряжения в одной или двух фазах.

Существуют различные схемы управления, позволяющие обеспечить быстрое отключение двигателя от сети при исчезновении напряжения на одной из двух фаз сети, питающих двигатель.

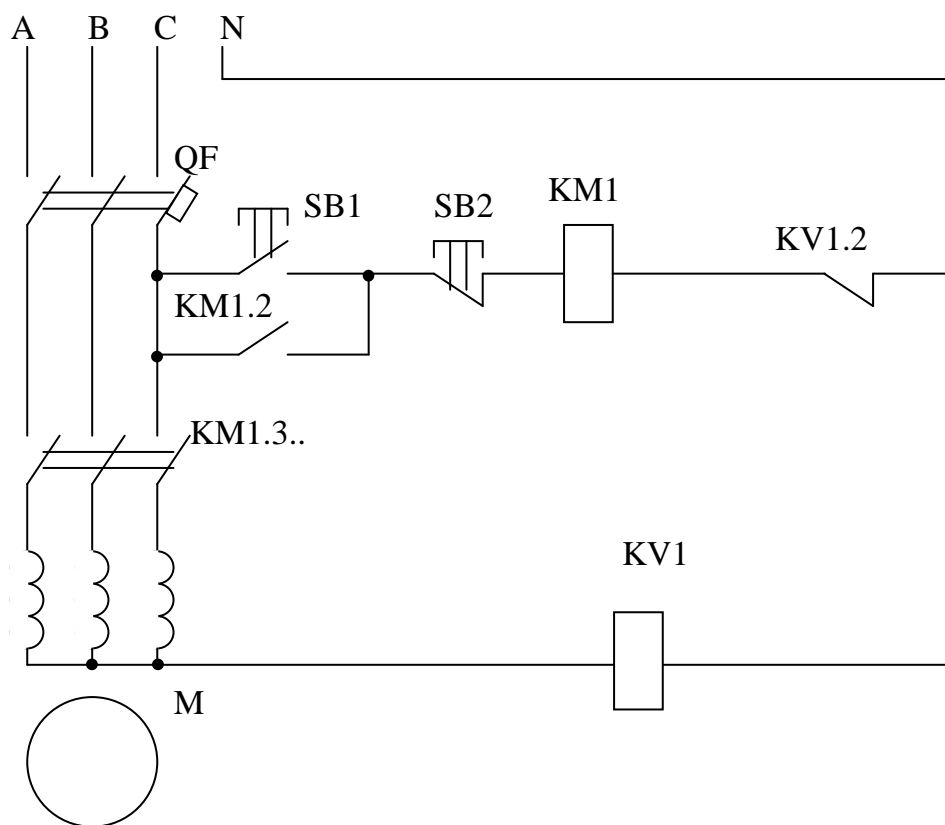


Рисунок 2.3.1 Схема защиты электродвигателя от неполнофазных режимов с реле в нулевом проводе

Работа схемы с реле нейтрали звезды обмоток двигателя основана на нарушении симметрий питающего двигатель напряжения при исчезновении напряжения на одной фазе. При этом на нулевой точке звезды двигателя появляется напряжение, что приводит к срабатыванию реле KV, которое своим размыкающим контактом разрывает цепь питания магнитного пускателя. Магнитный пускатель обесточивает двигатель. Восстановление рабочего режима двигателя возможно только при появлении питающего напряжения на всех фазах.

На рисунке 2.3.2 представлена схема защиты двигателя от исчезновения напряжения использующая для контроля напряжения реле (контроль фаз A, B) и обмотку пускателя (контроль фаз B, C).

При исчезновении напряжения на фазах B или A обесточивается реле, при этом нормально разомкнутые контакты реле разрываются цепь питания магнитного пускателя и двигатель обесточивается. При исчезновении напряжения на фазах B или C обесточивается обмотка пускателя, двигатель обесточивается.

Для защиты двигателей от неполнофазных режимов работы находят применение промышленно выпускаемые реле обрыва фаз. На рисунке 2.3.3 изображена схема защиты двигателей с использованием реле типа E-51

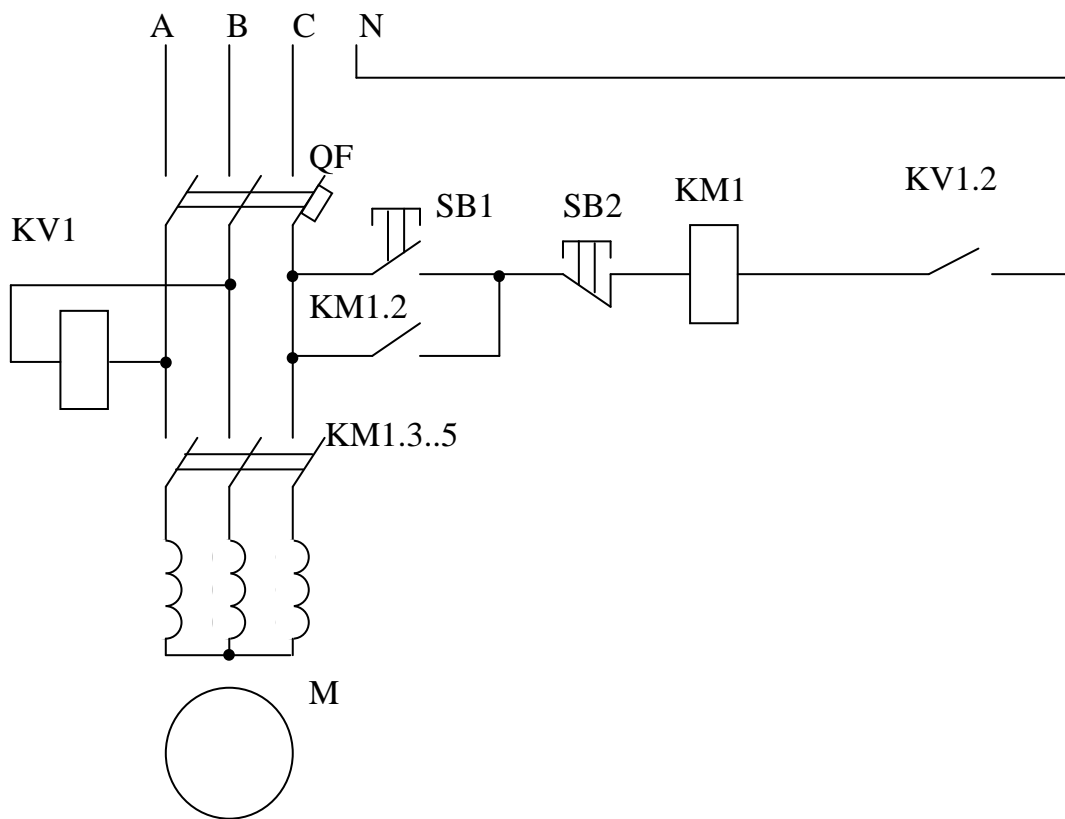


Рисунок 2.3.2 Схема защиты электродвигателя от неполнофазных режимов с дополнительным реле

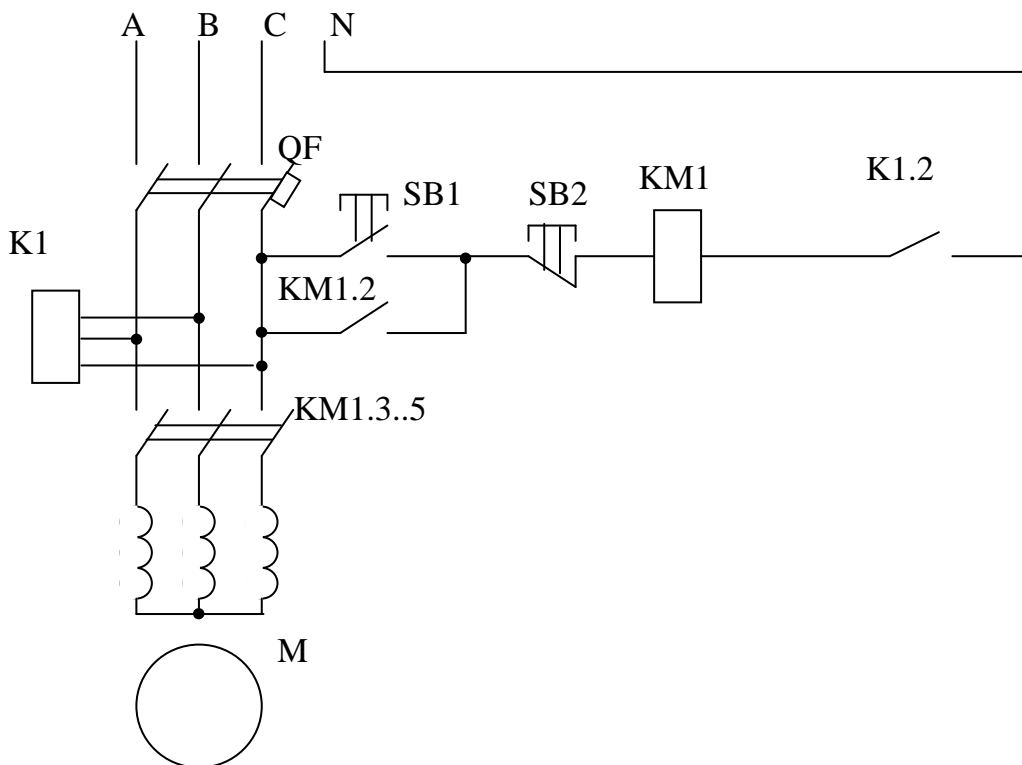


Рисунок 2.3.3 Схема защиты электродвигателя от неполнофазных режимов с реле контроля фаз

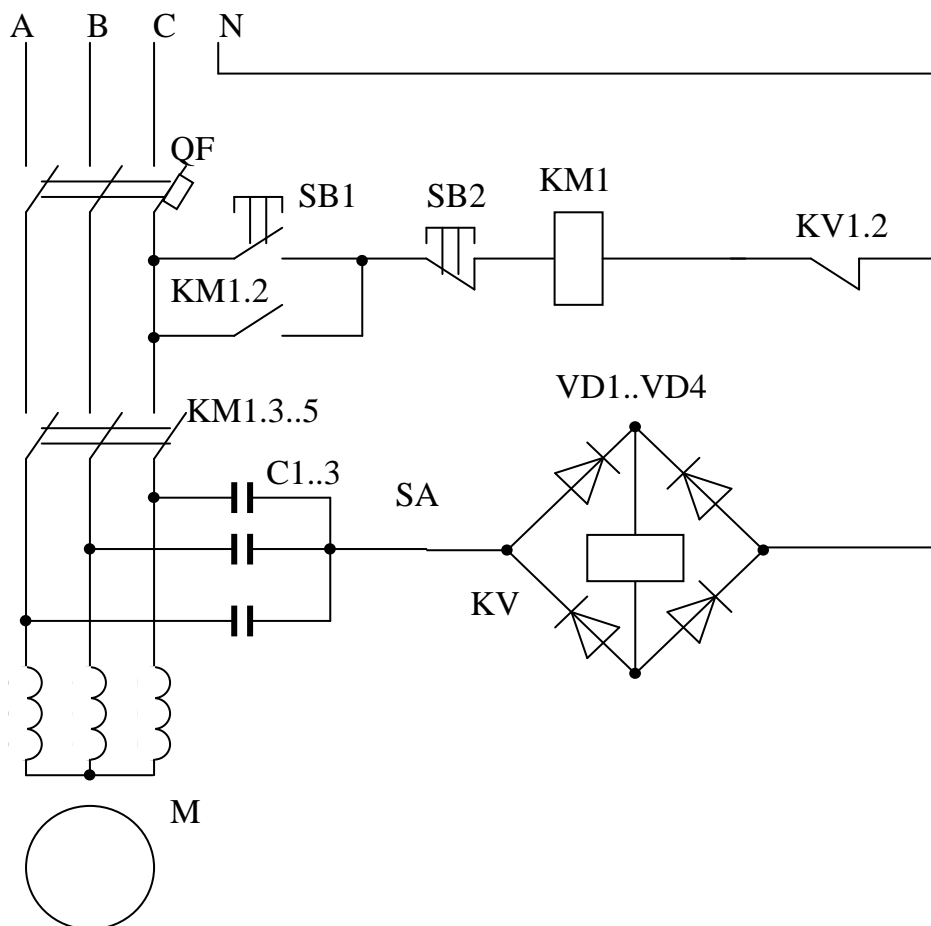


Рисунок 2.3.4 Схема защиты электродвигателя от неполнофазных режимов с созданием искусственной нулевой точки

При исчезновении напряжения на одной из фаз нарушается симметрия питания, реле срабатывает, размыкая цепь питания КМ-1. Использование нормально разомкнутого контакта реле в цепи питания обмотки магнитного пускателя позволяет защитить двигатель от неполно фазных режимов.

При включении обмоток двигателя по схеме на рисунке 2.3.4 защиту его от неполнофазного включения можно выполнить созданием искусственной нулевой точки с помощью батареи конденсаторов. При исчезновении напряжения на одной из фаз между искусственной нулевой точкой и нулем возникает разность потенциалов (смещение  $0$ ). Включив между  $0$  и  $0'$  обмотку реле, можно управлять цепью питания магнитного пускателя в зависимости от симметрии питающего напряжения. Для повышения чувствительности защиты часто используют реле постоянного тока на более низкое напряжение, включенное в диагональ диодного моста.

Для комплексной защиты электродвигателей широко используются устройства фазовой защиты ФУЗ-М, УЗУД, РДЦ и др., которые включаются в разрыв питающей сети и производят защиту от неполнофазных режимов, коротких замыканий и перегрузки.

В последнее время для защиты людей и электрооборудования применяют устройства защитного отключения (УЗО) которые предназначены:

- для защиты людей от поражения электрическим током при различных неисправностях электрооборудования, а также при прямом прикосновении к токоведущим частям электроустановки,
- для предотвращения возгорания и пожаров вследствие протекания токов утечки на землю.

Для защиты персонала от поражения электрическим током и оборудования от токов утечки на землю применяют **устройства защитного отключения (УЗО)**. В основе действия защитного отключения как электротехнического средства лежит принцип ограничения (за счет быстрого отключения) продолжительности протекания тока через тело человека или непреднамеренном прикосновении его к элементам электроустановки, находящимся под напряжением.

Другим не менее важным свойством УЗО является его способность осуществлять защиту от возгорания и пожаров, возникающих на объектах вследствие неисправности электрооборудования. Известно, что более трети всех пожаров происходит именно из-за нагрева проводников токами короткого замыкания. Короткие замыкания, как правило, развиваются из дефектов изоляции, замыканий на землю, утечек тока на землю. УЗО, реагируя на ток утечки на землю или защитный проводник, заблаговременно, до развития в короткое замыкание, отключает электроустановку от источника питания, предупреждая тем самым недопустимый нагрев проводников и последующее возгорание.

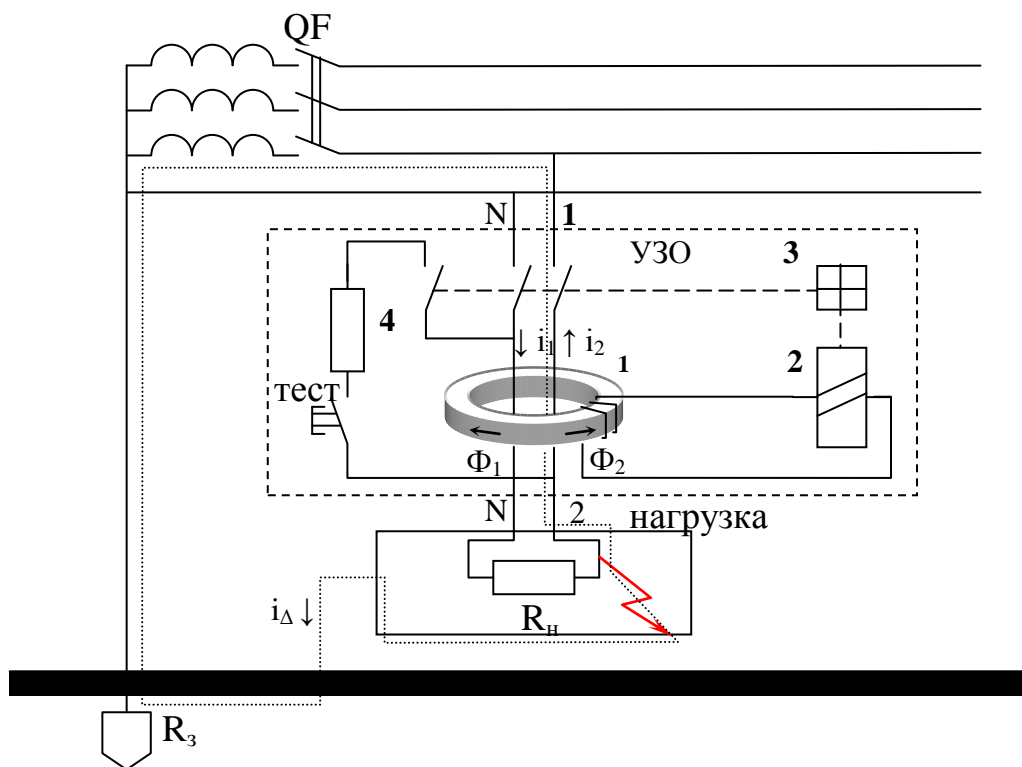


Рисунок 2.3.5 Схема УЗО

Функционально УЗО можно определить как быстродействующий защитный выключатель, реагирующий на дифференциальный ток в проводниках, подводящих электроэнергию к защищаемой электроустановке.

Основные функциональные блоки устройства представлены на рисунке 2.3.5. Важнейшим функциональным блоком УЗО является дифференциальный трансформатор тока – 1. В абсолютном большинстве устройств, применяемых в настоящее время, в качестве датчика дифференциального тока используется трансформатор тока.

Пороговый элемент 2 выполняется, как правило, на чувствительных магнитоэлектрических реле или электронных компонентах. Исполнительный механизм 3 включает в себя силовую контактную группу с механизмом привода.

В нормальном режиме, при протекании в силовой цепи рабочего тока нагрузки и отсутствии дифференциального (разностного) тока - тока утечки, токи в прямом и обратном проводниках, образующих встречноключенные первичные обмотки дифференциального трансформатора тока 1, равны по модулю ( $I_1 = I_2$ ) и наводят в магнитном сердечнике трансформатора тока равные, но векторно встречно-направленные магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . При этом ток во вторичной обмотке трансформатора равен нулю и срабатывание порогового элемента 2 не происходит.

При возникновении дифференциального тока  $I_{\Delta}$  – например, при пробое изоляции на корпус электроприемника или землю, а также при прикосновении человека к открытым токопроводящим частям – баланс токов, а, следовательно, и магнитных потоков нарушается и во вторичной обмотке появляется трансформированный дифференциальный ток (ток разбаланса), который вызывает срабатывание порогового элемента 2, воздействующего на исполнительный механизм 3. Исполнительный механизм приводит в действие контактную группу и защищаемая цепь обесточивается.

Цепь тестирования 4, искусственно создающая дифференциальный ток, предназначена для осуществления периодического контроля исправности устройства в целом путем нажатия кнопки «тест».

### **Программа работы**

1. Ознакомится с конструкцией, паспортными и каталожными данными защитной аппаратуры измерительных приборов.
2. Выписать паспортные данные применяемых в работе элементов.
3. Изучить схемы защиты двигателя от неполнофазных режимов.
4. Произвести измерения напряжения и токов срабатывания защиты от неполнофазных режимов, сравнить их с нормальными значениями,
5. Построить векторные диаграммы для момента срабатывания защит,
6. Рассчитать необходимую емкость конденсаторов для построения схемы защиты с искусственной нулевой точкой,
7. Выбрать защитную аппаратуру для предложенного преподавателем электродвигателя.



## Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания и литературу по теме работы.
2. Ознакомится с конструкцией, паспортными и каталожными данными защитной аппаратуры измерительных приборов.
3. Выписать паспортные данные применяемых в работе приборов и устройств.
8. Изучить схемы защиты от неполнофазных режимов работы электродвигателей.
9. Измерьте токи и напряжения при нормальной работе электродвигателя – отсутствие неполнофазного режима (реостат R полностью выведен).
10. Измеренные данные занесите в таблицу 1.
11. Измерьте токи и напряжения при срабатывании защиты с искусственной нулевой точкой. Для этого переведите выключатель SA в верхнее по схеме положение.
12. Медленно вводите реостат до тех пор, пока не сработает защита и двигатель не отключится.

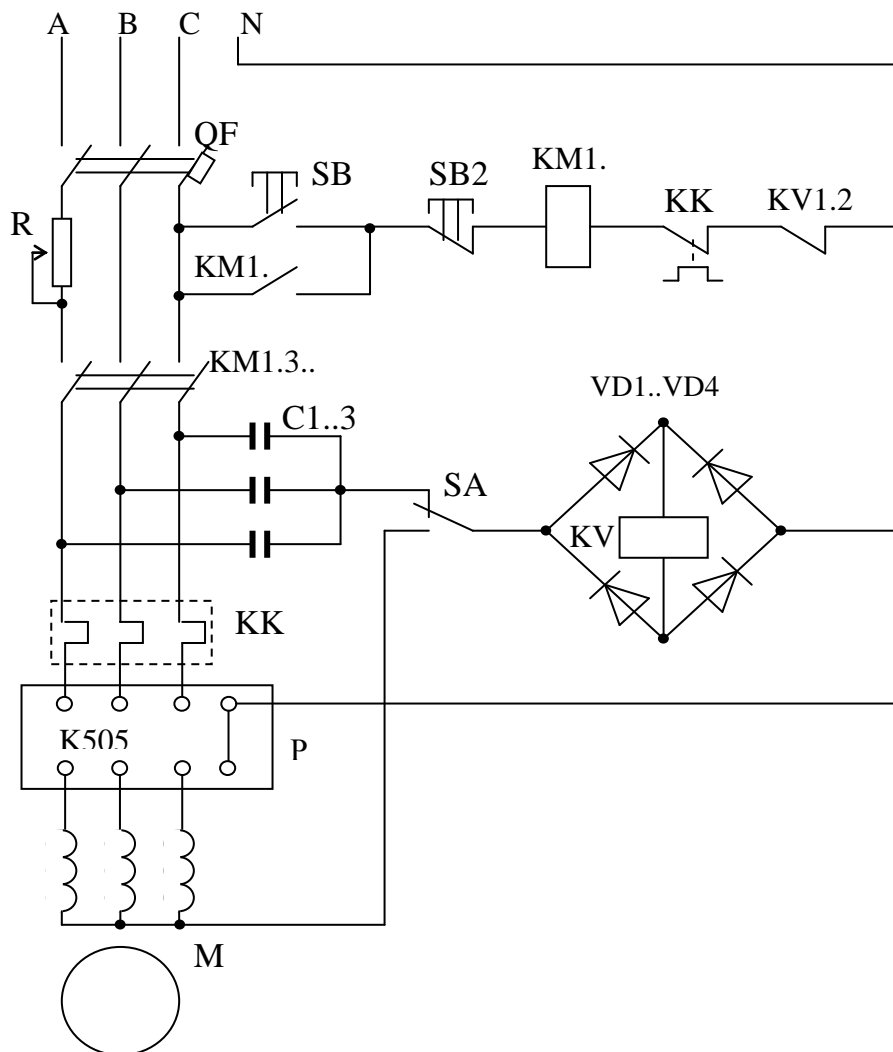


Рисунок 2.3.6 Схема лабораторной установки для исследования средств защиты электродвигателей

13. Отключите защиту (SA в среднем положении), и не меняя положения реостата включите двигатель и измерьте его токи и напряжения в фазах.
14. Повторите измерения еще два раза.
15. Измеренные данные занесите в таблицу 1.
16. Измерьте токи и напряжения при срабатывании защиты с реле в нулевом проводе.
17. Медленно вводите реостат до тех пор, пока не сработает защита, и двигатель не отключится.
18. Отключите защиту (SA в среднем положении) и, не меняя положения реостата, включите двигатель и измерьте его токи и напряжения в фазах.
19. Повторите измерения еще два раза.
20. Измеренные данные занесите в таблицу 2.3.5.

Таблица 2.3.5

Результаты измерений схем защиты от неполнофазных режимов

Режим работы	Токи в фазах, А			Напряжения в фазах, В		
	А	В	С	А	В	С
Нормальная работа						
Срабатывание защиты с искусственной нулевой точкой						
Средние значения						
Срабатывание защиты с реле в нулевом проводе						
Средние значения						

21. Постройте векторные диаграммы для обоих видов защит. На них изобразите вектора токов в фазах, напряжений в фазах, токи и напряжения конденсаторов, ток реле.
22. Из векторных диаграмм найдите ток и напряжение срабатывания реле.
23. Для указанного преподавателем тока и напряжения срабатывания реле найдите необходимую емкость конденсаторов для схемы и искусственной нулевой точкой и минимальное падение напряжения в фазе для срабатывания реле в схеме защиты с реле в нулевом проводе.
24. Для указанного преподавателем двигателя выберите элементы защиты: тепловое реле, плавкую вставку, автоматический выключатель.
25. Сделайте выводы по работе.

## Содержание отчета

1. Название и цель работы,
2. Паспортные данные используемых в работе аппаратов и приборов.
3. Таблицы с измеренными данными,
4. Примеры вычислений,
5. Векторные диаграммы,
6. Расчеты для выбора аппаратуры защиты и марки выбранных аппаратов,
7. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Перечислите основные виды защит электродвигателя.
2. Какие средства используют для защиты от коротких замыканий и перегрузки?
3. Что происходит с потребляемыми токами двигателя при нарушении симметрии питающего напряжения?
4. Каким образом осуществляют защиту от неполнофазных режимов работы?
5. В чем отличие режимов короткого замыкания и перегрузки электрической цепи?
6. Что такое неполнофазный режим работы двигателя?
7. Какие преимущества и недостатки имеют исследуемые в работе схемные решения защиты от неполнофазных режимов?
8. В каких случаях невозможно применять защиту с реле в нулевом проводе?
9. С какой целью используются УЗО?
10. Объясните принцип работы УЗО.
11. Как производится выбор теплового реле?
12. Как производится выбор предохранителей для защиты двигателя?
13. Каковы функции автоматического выключателя?
14. Почему необходимо одновременно устанавливать предохранители и тепловые реле в схему управления двигателем?

## 2.4 Лабораторная работа №4

### Исследование электропривода сверлильного станка

#### Цель работы:

- Изучить методику расчета мощности двигателя для привода сверлильного станка.
- Освоить методику опытного определения мощности рабочей машины.

#### Теоретические сведения

Необходимая мощность двигателя для привода рабочей машины напрямую зависит от характера изменения нагрузки и ее величины, что отражается нагрузочной диаграммой привода – изменение мощности на валу (момента, тока) в течении времени. Нагрев электродвигателя является основным критерием при выборе мощности двигателя, поэтому различают 8 режимов нагрузки привода, которые определяются характером изменения нагрузки с учетом протекания тепловых процессов в двигателе:

S1 – длительный,

S2 – кратковременный,

S3 – повторно-кратковременный,

S4 – повторно-кратковременный с частыми пусками,

S5 – повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением,

S6 – перемежающийся,

S7 – перемежающийся с частыми реверсами,

S8 – перемежающийся с двумя или более угловыми скоростями.

Основные режимы - S1, S2, S3, S6. Остальные дополнительные (производные).

Режим работы, предназначенный для двигателя заводом изготовителем указывается на табличке двигателя. Паспортные данные двигателей приводятся для работы в этом режиме.

Повторно-кратковременные режимы характеризуются продолжительностью включения

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_o} 100\% = \frac{t_p}{t_u} 100\% \quad (2.4.1)$$

где  $t_p$ ,  $t_o$ ,  $t_u$  – продолжительности работы, остановки, цикла.

Стандартные значения ПВ: 15, 25, 40, 60 %.

Перемежающийся режим характеризуется продолжительностью нагрузки ПН.

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_{x.x.}} 100\% = \frac{t_p}{t_u} 100\% \quad (2.4.2)$$

где  $t_p$ ,  $t_{x.x.}$ ,  $t_u$  – продолжительности работы, холостого хода, цикла.

Стандартные значения ПН: 15, 25, 40, 60 %.

Кратковременный режим характеризуется длительностью работы. Ее стандартные значения 10, 30, 60 и 90 минут.

В длительном режиме при постоянной нагрузке на валу номинальная мощность используемого двигателя должна быть не меньше мощности сопротивления на валу двигателя.

Для режимов с изменяющейся нагрузкой (S3, S6 и их производных) необходимую мощность приводного двигателя наиболее часто определяют методами эквивалентных величин, которые предполагают нахождение эквивалентной величины нагрузки (тока, момента, мощности двигателя) из нагрузочной диаграммы с учетом рабочих характеристик двигателя.

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}, \quad M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}, \quad P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad (2.4.3)$$

где  $I_i$ ,  $M_i$ ,  $P_i$  – ток момент и мощность на  $i$ -том участке диаграммы,  $t_i$  – длительность  $i$ -того участка.

При совпадении ПВ (ПН) со стандартной для выбираемого двигателя, номинальный ток (момент, мощность) двигателя должны быть не меньше рассчитанного эквивалентного

$$I_n \geq I_{\text{э}}, \quad M_n \geq M_{\text{э}}, \quad P_n \geq P_{\text{э}} \quad (2.4.4)$$

При несовпадении ПВ

$$I_n \geq I_{\text{э}} \sqrt{\frac{ПВ_{\text{рас}}}{ПВ_{\text{ст}}}}, \quad M_n \geq M_{\text{э}} \sqrt{\frac{ПВ_{\text{рас}}}{ПВ_{\text{ст}}}}, \quad P_n \geq P_{\text{э}} \sqrt{\frac{ПВ_{\text{рас}}}{ПВ_{\text{ст}}}} \quad (2.4.5)$$

где  $ПВ_{\text{рас}}$  – рассчитанная по нагрузочной диаграмме продолжительность включения,

$ПВ_{\text{ст}}$  – стандартная продолжительность включения выбираемого двигателя.

При использовании двигателей предназначенных для длительного режима их стандартную продолжительность включения считают 100%.

Для более точного выбора двигателя учитывают их различную теплоотдачу при работе и остановке, а также в переходных процессах, рассчитывая время цикла по формуле

$$t_{\text{ц}} = \beta_o t_o + \beta_{\omega} t_{\omega} + t_p, \quad (2.4.6)$$

где  $t_o$ ,  $\beta_o$  – продолжительность и коэффициент теплоотдачи остановки двигателя,

$t_{\omega}$ ,  $\beta_{\omega}$  – продолжительность и коэффициент теплоотдачи в переходных процессах,

$t_p$  – продолжительность работы двигателя.

Для кратковременного режима работы двигатель обычно выбирают прямым методом по нагреву.

При совпадении длительности работы по нагрузочной диаграмме со стандартной длительностью работы выбираемого двигателя, его номинальная мощность  $P_n$  должна быть не меньше мощности по нагрузочной диаграмме  $P_p$ .

$$P_n \geq P_p. \quad (2.4.7)$$

Если длительности работы не совпадают

$$P_n \geq P_p \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_{cm}}{T_n}}}}, \quad (2.4.8)$$

где  $T_n$  – постоянная времени нагрева двигателя,

$t_p$  – продолжительность работы двигателя по нагрузочной диаграмме,

$t_{cm}$  – стандартная продолжительность нагрева выбираемого двигателя.

При использовании двигателей предназначенных для работы в длительном режиме их стандартную длительность работы считают бесконечной.

Выбранный двигатель (для любого режима работы) необходимо проверить на перегрузочную способность. Т.е. проверить, чтобы на любом участке нагрузочной диаграммы момент сопротивления на валу не превышал максимально допустимого для выбранного двигателя (критического для асинхронного).

Для асинхронного двигателя это условие

$$\frac{M_{\max}}{M_n} < \frac{M_k}{M_n}, \quad (2.4.9)$$

где  $M_{\max}$  – максимальный момент по нагрузочной диаграмме,  
 $M_n, M_k$  – номинальный и критический моменты двигателя.

Если частота вращения практически не меняется (это характерно для АД с короткозамкнутым ротором) отношение моментов можно заменить отношением мощностей

$$\frac{P_{\max}}{P_n}.$$

Для двигателей постоянного тока общепромышленного исполнения

$$\frac{M_{\max}}{M_n} < 2,5. \quad (2.4.10)$$

При невыполнении условия по перегрузочной способности необходимо взять двигатель большей мощности.

Обычно большую перегрузочную способность имеют двигатели, предназначенные для работы в кратковременном режиме S2, но их не рекомендуется использовать в других режимах из-за повышенных потерь.

### Методика расчета потерь сверлильного станка

Полную мощность электродвигателя для привода сверлильного станка расчетным путем можно определить в том случае, если будут известны мощность на сверле и мощность холостого хода станка.

Мощность на сверле (кВт)

$$P_{CB} = \frac{\pi n M_{CB}}{30 * 1000} \quad (2.4.11)$$

где  $n$  – скорость вращения сверла, об/мин.

$M_{CB}$  -крутящий момент на сверле, Н. М.

Таблица 2.4.1

Значения коэффициентов  $C_M, X, Y$  в зависимости от рода обрабатываемого материала

Коэффициент	Обрабатываемый материал						
	сталь углеродистая, кг/мм <sup>2</sup>				чугун серый, кг/мм <sup>2</sup>		
	30...40	40...50	50...60	60...70	мягкий	средний	твердый

$C_M$	37.00	44.00	50.00	58	9.0	11.6	14.6
X	1.80	1.80	1.80	1.80	2.0	2.0	2.0
Y	0.78	0.78	0.78	0.78	0.6	0.6	0.6

Крутящий момент на сверле

$$M_{св} = \frac{C_M D^X S^Y}{102} \quad (2.4.12)$$

где  $D$ -диаметр сверла, мм|;

$S$ -подача (в мм) на один оборот сверла;

$C_M, X, Y$ , -берутся из таблицы 2.4.1,

Подачу  $S$  (мм/об) можно определить, зная глубину сверления  $h$  (мм), продолжительность сверления  $t$  (с) и скорость вращения сверла  $n$  (об/мин):

$$S = \frac{60 * h}{t * n} \quad (2.4.13)$$

Полную мощность, потребляемую для привода станка, можно определить, складывая мощность на сверле  $P_{св}$  с мощностью холостого хода станка  $P_{х.х.}$ , или зная к. п. д. станка ,по формуле:

$$P = \frac{P_{св}}{\eta_c} \quad (2.4.14)$$

Полученную расчетную мощность электродвигателя нужно сравнить с действительной.

С помощью ваттметра можно определить мощность  $P_I$ , потребляемую электродвигателем из сети. Мощность на валу электродвигателя находят, вычитая из потребляемой мощности потери в электродвигателе.

Потери мощности в электродвигателе складываются из потерь в обмотках статора и ротора, потерь в стали и механических (трение в сопряжениях движущихся деталей и деталей о воздух).

Потери в обмотке статора

$$P_{OC} = 3I_{\phi}^2 R \quad (2.4.15)$$

где  $I_{\phi}$  – фазный ток, А;

$R$ - сопротивление фазы статора при рабочей температуре, Ом.



Из опыта холостого хода двигателя находим мощность холостого хода  $P_{x.x.}$ , а затем сумму потерь в стали и механических потерь:

$$P_0 = P_{x.x.} - P_{oc} = P_{mex} + P_{cm} \quad (2.4.16)$$

Разделить потери в стали и механические относительно сложно: поэтому для малых двигателей (до 5 кВт) механические потери можно принимать равными 15% от потери в стали.

Потери в обмотке ротора  $P_{OP}$  определяется через электромагнитную мощность и скольжение:

$$\begin{aligned} P_{ЭМ} &= P - P_{oc} - P_{СТ} \\ P_{OP} &= P_{ЭМ} * \frac{s}{100} \end{aligned} \quad (2.4.17)$$

где  $s$  - скольжение, %.

Таким образом, мощность на валу асинхронного электродвигателя

$$P_2 = P - (P_{oc} + P_{СТ} + P_{MEX} + P_{OP}) \quad (2.4.18)$$

Полные потери в двигателе при нормальном режиме могут быть определены по приближенной формуле:

$$\sum P_{ПОТ} = \frac{P_H}{\eta_H} - P_H = P_H \left( \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \right) \quad (2.4.19)$$

Потери в двигателе разделяют на постоянные  $\Delta P_C$  и переменные  $\Delta P_V$ . Для асинхронного двигателя обычно отношение потерь равно

$$\frac{\Delta P_C}{\Delta P_V} = 0,5 \quad (2.4.20)$$

Таким образом,  $\sum P_{ном} = \Delta P_C + \Delta P_V = 3\Delta P_C$  откуда при номинальной

нагрузке постоянные потери  $\Delta P_C = \frac{\sum P_{ПОТ}}{3}$  и переменные потери  $\Delta P_V = \frac{2\sum P_{ПОТ}}{3}$ .

При изменении нагрузки переменные потери изменяются пропорционально квадрату тока статора. Поэтому переменные потери при нагрузке, отличающейся от нормальной, определяются из соотношения

$$\Delta P_{\nu x} = \Delta P_{\nu} \left( \frac{I_x}{I_H} \right)^2 \quad (2.4.21)$$

где  $I_x$  - ток статора при данной нагрузке.  
Полные потери

$$\sum P_x = \Delta P_C + \Delta P_{\nu} \left( \frac{I_x}{I_H} \right)^2 \quad (2.4.22)$$

Мощность на валу двигателя

$$P_2 = P_1 - \sum P_x. \quad (2.4.23)$$

## Программа работы

1. Ознакомится с конструкцией, паспортными и каталожными данными аппаратуры измерительных приборов,
2. Выписать паспортные данные применяемых в работе аппаратов,
3. Произвести измерения характеристик привода на холостом ходу и при работе под нагрузкой,
4. Рассчитать энергетический баланс двигателя предложенными в методике способами,
5. Сравнить полученные результаты, сделать вывод о погрешностях и причинах их появления,
6. Рассчитать необходимую мощность привода по предложенной нагрузочной диаграмме и измеренных данных станка. Сделать вывод о целесообразности применения имеющегося электродвигателя,
7. Сделать выводы по работе.

## Порядок выполнения работы

1. Изучите методические указания и литературу по теме работы, ознакомьтесь с оборудованием рабочего места.
2. Измерьте сопротивление фазы статора двигателя.

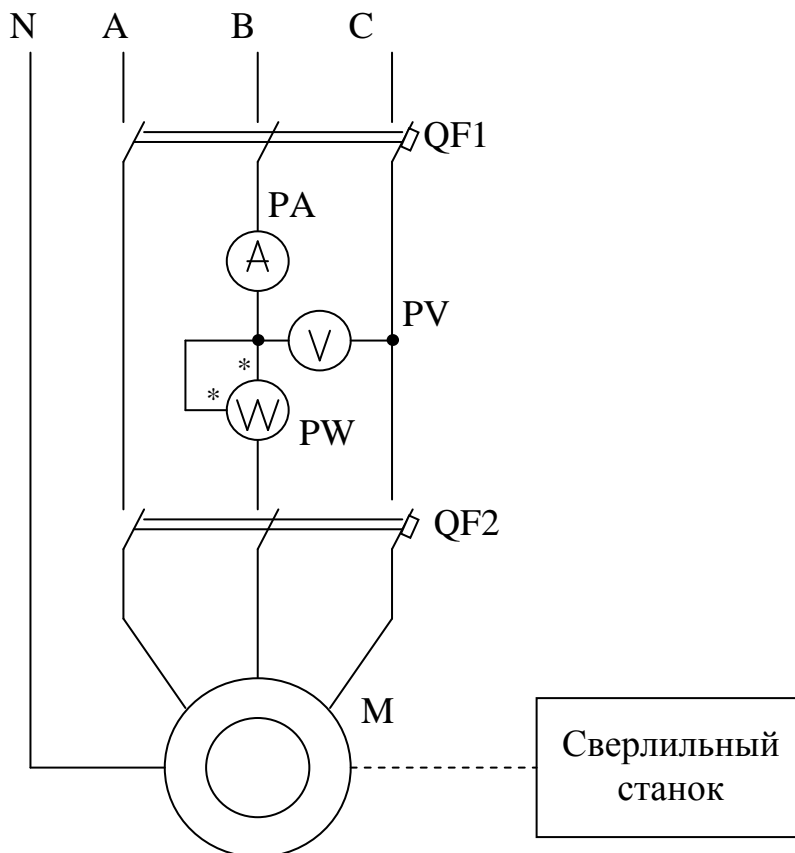


Рисунок 2.4.1 Схема лабораторной установки для исследования электропривода сверлильного станка

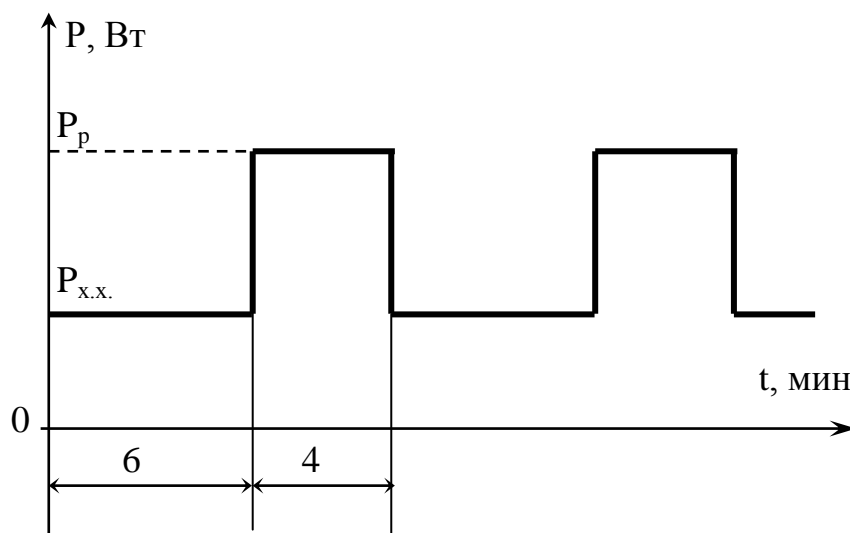


Рисунок 2.4.2 Нагрузочная диаграмма привода

3. Включите сверлильный станок и измерьте напряжение, ток, мощность и скорость вращения при холостом ходе двигателя.
4. Определите опытным путем мощность сверлильного станка при сверлении одного из материалов. При сверлении измерить, кроме электрических величин, диаметр, глубину и продолжительность сверления, скорость вращения.
5. Определить расчетным путем мощность сверлильного станка и сравнить ее с опытными данными.
6. Определить среднеквадратическую мощность электродвигателя при нагрузочной диаграмме работы станка, показанной на рисунке 2.4.2. В качестве мощностей холостого хода и нагрузки использовать измеренные данные.
7. Выберите асинхронный короткозамкнутый двигатель по полученному значению среднеквадратичной мощности.
8. Рассчитайте мощности потерь двигателя, используя измеренные данные.
9. Рассчитайте среднюю мощность потерь двигателя при нагрузочной диаграмме, указанной на рисунке.
10. Сделайте выводы по работе.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы,
2. Схема лабораторной установки, нагрузочная диаграмма.
3. Каталожные данные использованной в схеме аппаратуры, приборов и оборудования.
4. Данные замеров и расчетов, произведенных в работе,
5. Выводы по работе

## Контрольные вопросы

1. Как определяются момент и мощность на сверле?
2. Как определяется мощность на валу асинхронного электродвигателя?
3. Как определить полные потери мощности в электродвигателе?
4. Как определить полную мощность двигателя?
5. В каком режиме работает сверлильный станок?
6. Перечислите основные режимы работы электроприводов. Какими параметрами они характеризуются?
7. Для чего используют специальные двигатели с повышенным скольжением в механизмах, работающих в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками?
8. Чем объясняются повышенные потери в двигателе во время пуска?
9. Какими методами производится выбор электродвигателя по мощности?
10. В чем сущность метода эквивалентной мощности?
11. В чем сущность проверки двигателя на перегрузочную способность?
12. Что называется постоянной времени нагрева?

### 5 Лабораторная работа №5

#### Аппаратура управления электроприводами

##### Цель работы:

1. Изучить устройство и работу электрических аппаратов ручного и автоматического управления, их технические характеристики.

#### Теоретические сведения

##### Электрические аппараты ручного управления

К аппаратам ручного управления относятся командные маломощные устройства – кнопки и ключи управления, командоаппараты и силовые коммутационные аппараты (рубильники, пакетные выключатели и силовые контроллеры).

**Кнопки управления** предназначены для подачи оператором управляющего воздействия на ЭП. Они различаются по размерам: нормальные и малогабаритные, числу замыкающих и размыкающих контактов, форме толкателя. Две, три или более кнопок, смонтированных в одном корпусе, образуют кнопочную станцию. Одноцепные кнопки управления выпускают с замыкающим и размыкающим контактами. Двухцепные кнопки имеют обе пары контактов с единым приводом. Выпускаются кнопки серий КУ 120 и КЕ, предназначенные для работы в цепях переменного тока с напряжением до 500 В и постоянного тока с напряжением до 220 В и токами до 4 А.

**Ключи управления (универсальные переключатели)** предназначены для подачи управляющего воздействия на ЭП и имеют два или более фиксиро-

ванных положений рукоятки и несколько замыкающих и размыкающих контактов.

Ключи управления серии ПЕ рассчитаны на те же напряжения и токи, что и кнопки управления КЕ. Универсальные переключатели серий УП 5300, УП 5400 и ПКУ 3 используются для коммутации цепей катушек контакторов, масляных выключателей, управления многоскоростными АД и в ряде других случаев. Они могут коммутировать до 32 цепей и иметь до восьми положений (позиций) рукоятки управления.

**Командоконтроллеры** служат для коммутации нескольких маломощных (ток нагрузки до 16 А) электрических цепей. Эти аппараты, имеющие ручное управление от рукоятки или педали с несколькими положениями, находят широкое применение в схемах управления ЭП крановых механизмов, металлургического оборудования, на транспорте. Командоаппараты классифицируются по числу коммутируемых цепей, виду привода контактной системы, числу рабочих положений рукоятки (педали), диаграммам включения и выключения контактов.

Командоаппараты общепромышленного назначения серий КА 410 А, КА 420 А, КА 4000, КА 4100, КА 4200, КА 4500, КА 4600, КА 11 предназначены для коммутации цепей постоянного тока напряжением до 440 В и переменного тока напряжением до 500 В. Командо-контроллеры серий ККП 1000 и ККП 423 используются для управления ЭП крановых механизмов и металлургического оборудования.

**Рубильники** - это простейшие силовые коммутационные аппараты, которые в основном предназначены для неавтоматического нечастого замыкания и размыкания силовых электрических цепей двигателей постоянного и переменного тока напряжением до 500 В и током до 5000 А. Они различаются по силе коммутируемого тока, числу полюсов (коммутируемых цепей), виду привода рукоятки и числу ее положений (два или три). Рубильники серий Р и РА рассчитаны на токи 100...600 А, напряжения 220...660 В и имеют 1...3 полюса.

**Пакетные выключатели** - это разновидность рубильников. Их контактная система набирается из отдельных пакетов. Пакет состоит из изолятора, в пазах которого находятся неподвижный контакт с винтовыми зажимами для подключения проводов и пружинный подвижный контакт с устройством искрогашения.

Выпускаемые пакетные выключатели серий ПВМ, ППМ, ПУ, УП, ОКП, ПВП 11 предназначены для коммутации электрических цепей постоянного тока до 400 А напряжением до 220 В и переменного тока до 250 А напряжением до 380 В.

### **Электрические аппараты дистанционного управления**

К аппаратам дистанционного управления относятся контакторы, магнитные пускатели и реле, коммутация контактов которых осуществляется при подаче на их катушки электрического сигнала (напряжения или тока) и снятии этого сигнала. Это двухпозиционные коммутационные аппараты с самовозвратом, включение и выключение которых осуществляется электрическим сигналом.

**Контактор** представляет собой электромагнитный аппарат, предназначенный для частых дистанционных коммутаций силовых цепей двигателей. Контакторы различаются по роду тока коммутируемой цепи, числу главных контактов (одно-, двух- и многополюсные), роду тока цепи катушки (управление постоянным или переменным токами), номинальному току и напряжению коммутируемых цепей, конструктивному исполнению и другим признакам.

Основными элементами контактора (рисунок 2.5.1) являются: втягивающий электромагнит (катушка 1, железный сердечник 2, подвижный якорь 3), главные контакты 4, блок-контакты 7, 8, возвратная пружина 5. При нажатии на пусковую кнопку SB1 включается катушка 1, которая притягивает якорь 3. При этом переключаются контакты: главные контакты 4 замыкаются, присоединяя двигатель М к сети; блок-контакты 8 (замыкающие) замыкаются, а блок-контакты 7 (размыкающие) размыкаются. Для остановки двигателя нажимают кнопку SB2. Катушка контактора обесточивается, якорь под действием пружины 5 и собственного веса отпадает, главные контакты 4 размыкаются, двигатель отключается от сети.

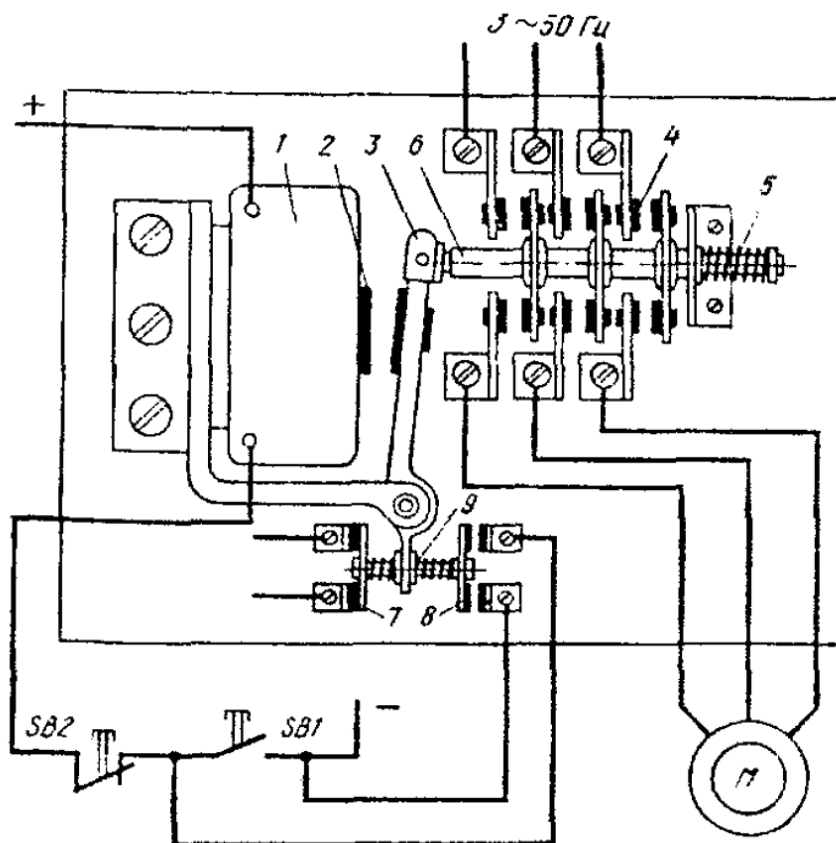


Рисунок 2.5.1. Схема контактора

Контакторы постоянного тока изготавливаются с одним или двумя полюсами на номинальные токи главных контактов от 4 до 2500 А. Главные контакты способны отключать токи перегрузки 7...10 - кратные номинальному току. Катушки контакторов постоянного тока имеют большое количество витков и обладают значительной индуктивностью, что затрудняет размыкание их цепей.

Мостиковые блокировочные контакты могут отключать токи до 20 А при напряжении до 500 В в цепях катушек аппаратов переменного тока, а в цепях катушек аппаратов постоянного тока - токи до 2,5А при 110 В, до 2 А при 220 В и до 0,5 А при 440 В.

В настоящее время выпускается несколько серий контакторов постоянного тока. Для тяжелых условий работы, в частности для крановых ЭП, предназначаются контакторы серий КПВ 600 и КПВ 62с одним главным контактом, рассчитанным на токи от 100 до 630 А. Для применения в ЭП постоянного тока общепромышленного назначения выпускаются контакторы серий КП и КПД с одним и двумя главными контактами, рассчитанными на токи от 25 до 250 А. Контактors этих серий имеют магнитную систему клапанного типа. Главные контакты пальцевого типа и вспомогательные контакты мостикового типа. Контактors снабжены также дугогасительной системой.

Контактors переменного тока по принципу своего действия и основным элементам конструкции не отличаются от контакторов постоянного тока. Особенностью их работы является питание катушки переменным током, что определяет повышение тока в ней при срабатывании в несколько раз по сравнению с током при втянутом якоре. По этой причине для контакторов переменного тока ограничивается число их включений в час (обычно не более 600). Кроме того, пульсирующий магнитный поток, создаваемый переменным током катушки, вызывает вибрацию и гудение магнитопровода, а также его повышенный нагрев. Для уменьшения этих нежелательных факторов магнитопровод набирают из тонколистовой трансформаторной стали, а на сердечник или якорь помещают короткозамкнутый виток. В контакторах переменного тока проще условия гашения дуги, которая в этом случае менее устойчива и может погаснуть при прохождении переменного тока нагрузки через ноль.

Контактors переменного тока серий КТ 6000, КТ 7000, КТП 600, рассчитанные на токи от 63 до 1000 А, имеют от двух до пяти главных контактов. Их катушки выполняются на напряжение переменного тока от 36 до 500 В частотой 50 Гц. Модификацией этих серий являются контакторы серий КТ 64, КТП 64, КТ 65 и КТП 65, в которых бездуговая коммутация осуществляется шунтированием главных контактов тиристорами во время их размыкания. Отсутствие дуги при отключении контакторов повышает их надежность, износостойкость главных контактов и взрывобезопасность, что позволяет, в частности, увеличить допустимое число их включений до 2000 в час.

Универсальными, т. е. служащими для коммутации силовых цепей как постоянного, так и переменного тока, являются контакторы серии МК. Такие контакторы обеспечивают коммутацию тока до 63 А в цепях постоянного тока напряжением до 440 В и в цепях переменного тока напряжением до 660 В частотой 50 и 60 Гц, имея число главных контактов от 1 до 3. Втягивающие катушки их рассчитаны на постоянный ток напряжением 24, 48, 110 и 220 В.

Магнитный пускатель представляет собой специализированный комплексный аппарат, предназначенный главным образом для управления трехфазными асинхронными двигателями, т. е. для их подключения к сети, отключения, обес-



печения тепловой защиты и сигнализации о режимах работы. В соответствии с функциями пускателя в него могут входить контактор, кнопки управления, тепловые реле защиты, сигнальные лампы, размещаемые в одном корпусе. Магнитные пускатели различаются по назначению (неревверсивные и реверсивные), наличию или отсутствию тепловых реле и кнопок управления, степени защиты от воздействия окружающей среды, уровням коммутируемых токов, рабочему напряжению главной цепи.

Пускатели серии ПМЛ выпускаются на токи от 10 до 200 А, допустимое число включений пускателя 1...5 габаритов составляет 3600 в час, а для 6...7 габаритов - 2400.

Пускатели серии ПМС предназначены для управления АД серии 4А и имеют шесть типоразмеров на токи от 10 до 160 А. Для обеспечения требуемых функций они могут иметь разделительный трансформатор, кнопки управления, амперметр, сигнальную лампу. Их механическая износостойкость составляет  $(10...16) \cdot 10^6$  циклов, а частота включений в час - 6000 для пускателей первого габарита и 2400 - для пускателей пятого и шестого габаритов.

Таблица 2.5.1

Магнитные пускатели серий ПМЕ, ПА

Величина пускателя	Тип пускателя	$P_{\max}$ управляемого двигателя при $U_n, В$		$I_n$ главной цепи пускателя
		220	380	
0	ПМЕ-000	0,6	1,1	3
1	ПМЕ-100	2,2	4,0	10
2	ПМЕ-200	5,5	10,0	25
3	ПА-300	10,0	17,0	40
4	ПА-400	14,0	28,0	56
5	ПА-500	30,0	55,0	115
6	ПА-600	40,0	75,0	140

**Электромагнитное реле** представляет собой аппарат, предназначенный для коммутации слаботочных цепей управления ЭП в соответствии с электрическим сигналом, подаваемым на его катушку. Область применения реле очень широкая. Они выполняют самые разнообразные функции управления, контроля, защиты и блокировок в автоматизированном ЭП.

Поскольку контакты реле коммутируют небольшие (5...10 А) токи, они обычно имеют простую конструкцию без использования дугогасительных камер.

Электромагнитные реле постоянного тока серий РЭВ 800 применяются в схемах управления в качестве реле тока, напряжения, времени и промежуточных реле, а серия РЭВ 310 - в качестве реле тока и напряжения. Реле этих серий имеют катушки на напряжение от 12 до 220 В и от одного до четырех контактов.

В качестве промежуточных применяются также реле серий РП-250, РП-321, РП-341, РП-42 и ряд других, которые также могут использоваться и как реле напряжения.

Герконовые электромагнитные реле имеют герметизированные контакты, что повышает их износостойкость и надежность в работе. Износоустойчивость реле с герконами, способных коммутировать токи до 5 А при напряжении до 100 В, достигает нескольких десятков миллионов срабатываний.

Реле серий РЭС 42, РЭС 43, РЭС 44, РЭС 55 на базе герконов типа КЭМ допускают коммутацию токов до 1 А при напряжении до 220 В.

### **Датчики времени, скорости, тока и положения**

Для управления электроприводом, в том числе и разомкнутым, необходима информация о текущих значениях скорости, тока, момента и координат, а также о времени.

**Датчики времени.** При построении схем управления ЭП по принципу времени в качестве датчиков используются различные реле времени - электромагнитные, моторные, электронные, анкерные и механические.

*Электромагнитное реле времени* серии РЭВ 811...РЭВ 818, обеспечивающие выдержку времени от 0,25 до 5,5 с, изготавливаются с катушками на напряжение постоянного тока 12, 24, 48, 110 и 220 В. Реле времени серии РЭВ 81 обеспечивают выдержку времени от 0,15 до 4 с.

*Моторное (электромеханическое) реле времени* состоит из специального низкоскоростного двигателя и редуктора с большим передаточным числом, на выходном валу которого имеется рычаг, начальное положение которого устанавливается по шкале уставок времени. Рычаг управляет работой вспомогательных контактов, которыми включается выходное электромагнитное реле.

Моторные реле времени серий Е 510 и РБ 4 обеспечивают выдержку времени до нескольких минут.

*В электронных реле времени* обычно используются различные полупроводниковые элементы (чаще всего транзисторные) и конденсаторы, время разряда или заряда которых и определяет выдержку времени.

Электронные реле времени серии ВЛ обеспечивают выдержку времени от 0,1 с до 10 мин.

*В пневматических реле* выдержка времени обеспечивается воздушным (пневматическим) замедлителем (демпфером), управляемым с помощью электромагнита.

Серийные пневматические реле времени РВП 72 обеспечивают диапазон выдержки времени от 0,4 до 180 с.

*Механическое реле времени* имеет замедлитель в виде анкерного механизма, управляемого электромагнитом. При подаче напряжения на электромагнит (начало отсчета времени) его якорь заводит пружину анкерного механизма аналогично часовому. Последний, начав работать, перемещает подвижный контакт реле. По истечении заданного времени, определяемого положением (уставкой) неподвижного контакта реле, происходит замыкание контактной системы, что и определяет конец отсчета времени. Данные реле обеспечивают выдержку времени до нескольких десятков секунд.

Электромеханическое реле контроля скорости (РКС) работает по принципу асинхронного двигателя. Ротор такого реле (рисунок 2.5.2) представляет собой постоянный магнит 1, соединенный с валом двигателя, скорость которого измеряется. Постоянный магнит помещен внутри алюминиевого цилиндра 5, имеющего обмотку в виде беличьей клетки. Этот цилиндр может поворачиваться вокруг оси на небольшой угол и переключать с помощью упора 3 контакты 4 и 6. При неподвижном двигателе упор занимает среднее положение и контакты реле находятся в нормальном положении.

При вращении двигателя, а следовательно, и магнита 1 даже с небольшой скоростью создается вращающий момент, под действием которого цилиндр 5 поворачивается и обеспечивает с помощью упора 3 переключение контактов 4. При скорости двигателя, близкой к нулю, цилиндр возвращается в среднее положение и контакты 4 переходят в свое нормальное состояние. Скорость, при которой переключаются контакты реле, определяется положением настроечных винтов 2.

Реле контроля скорости удобно использовать при автоматизации процесса торможения, когда требуется обеспечить отключение двигателя от сети после снижения его скорости до нуля.

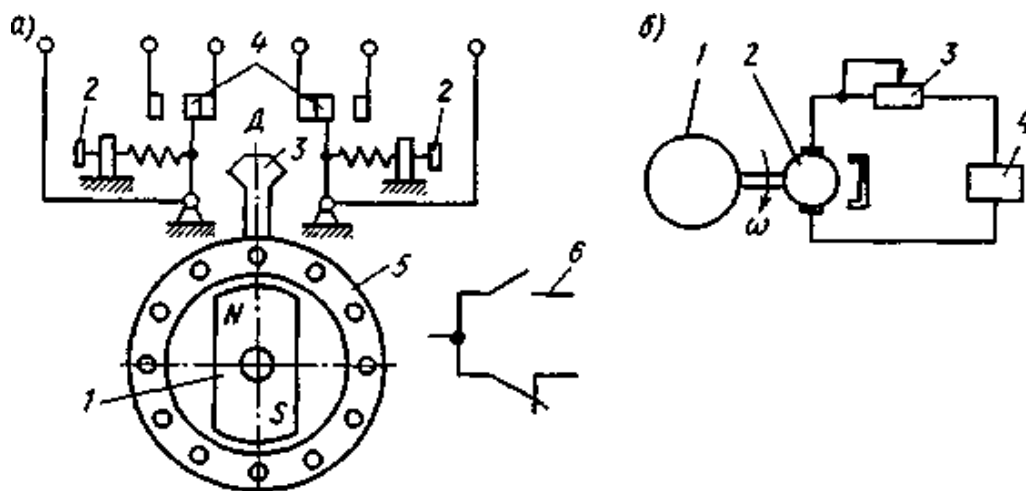


Рисунок 2.5.2 Схема электромеханического реле скорости

Тахогенератор (ТГ) как датчик скорости двигателя обычно применяется в различных схемах управления. Наибольшее применение в автоматизированных ЭП нашли тахогенераторы постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов серий ЭТ 4 и ЭТ 7; ТМГ-ЗОП; ТД 103-ПМ и ТД 201-ПМ; МЭТ 8155 и с обмоткой возбуждения серий ТГ, СЛ, ТД, а также асинхронные и синхронные тахогенераторы.

**Датчики положения.** К датчикам положения, которые широко используются в разомкнутых схемах управления ЭП, относятся путевые и конечные выключатели различных типов. При достижении ЭП или исполнительным органом рабочей машины определенных положений эти выключатели выдают сигналы, которые затем поступают в цепи управления, защиты и сигнализации.

Конечные выключатели применяются для предотвращения выхода исполнительных органов из рабочей зоны. Путевые выключатели используются для подачи команд управления в схему в определенных точках пути исполнительных органов.

Путевые и конечные выключатели могут быть бесконтактными и контактными. Последние в зависимости от вида привода их контактной системы делятся на вращающиеся, рычажные и нажимные.

Вращающиеся путевые и конечные выключатели имеют привод от валика, соединенного с валом двигателя непосредственно или через редуктор. На валике располагаются кулачковые шайбы, воздействующие на контактную систему выключателя при достижении валиком определенного положения. При вращении вала двигателя в определенном его положении кулачковые шайбы осуществляют переключение контактов выключателя.

Рычажные конечные и путевые выключатели имеют привод своей контактной системы от поворотного рычага, соединенного с движущейся частью ЭП или исполнительного органа. Возврат рычага и контактов в исходное положение осуществляется с помощью пружины.

В нажимном выключателе переключение контактов происходит при нажатии на его шток, возврат которого в исходное положение осуществляется под действием пружины. В качестве нажимных выключателей применяются также микропереключатели, у которых при воздействии на шток происходит переключение упругого контакта.

Выпускаемые контактные путевые и конечные выключатели серий КУ 700; ВУ 150 и ВУ 250; ВК 200 и ВК 300; ВПК 1000, 2000, 3000 позволяют коммутировать одну или две цепи переменного тока до 10 А и напряжении до 500 В и постоянного тока до 1,5 А при напряжении до 220 В.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с конструкцией, назначением и паспортными данными приборов ручного управления.
2. Ознакомиться с устройством аппаратуры автоматического управления электродвигателем: пускателями серий П, ПМЕ, ПА; промежуточными реле ЭП-41, МКУ-48, РПМ, ПЭ-6, РПТ-100, РВП, РВЭ, РВМ, РВС.
3. Описать устройство, принцип действия и характерные особенности одного из аппаратов управления (по заданию преподавателя).
4. Для указанной преподавателем электрической цепи произвести выбор аппаратов управления.
5. Изучить дистанционное управление асинхронных короткозамкнутым двигателем с помощью электрических аппаратов.
6. Сделать выводы по работе.

## Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Исследуемые схемы и паспортные данные используемых приборов.
3. Изучаемая схема. Расчеты для выбора аппаратуры и марки выбранных аппаратов.
4. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Каково назначение и устройство автоматов, контакторов, магнитных пускателей и электромагнитных реле?
2. Как производится выбор пускателей, реле и автоматов?
3. Объясните работу аппаратов управления в исследуемой схеме.
4. Чем отличаются силовые цепи от цепей управления?
5. Назовите известные Вам бесконтактные элементы, используемые в схемах автоматизации управления электроприводом?
6. Что понимают под отключающей способностью коммутационного аппарата?
7. С какой целью часть якоря контакторов переменного тока охватывается короткозамкнутым витком?

## 2.6 Лабораторная работа №6

### Типовые узлы и схемы управления электроприводами с асинхронными двигателями

#### Цель работы:

1. Изучить принципы управления асинхронных короткозамкнутым двигателем с помощью электрических аппаратов.

## Теоретические сведения

В практике управления электроприводами машин и механизмов, установок, агрегатов и поточных линий с применением асинхронных электродвигателей известно большое количество схем автоматизации пуска, остановки, реверсирования, регулирования скорости вращения и т.д.

Однако при всем их разнообразии они, как правило, основываются на нескольких типовых схемах.

На рисунке 2.6.1а приведена принципиальная схема прямого пуска и остановки асинхронного электродвигателя с короткозамкнутого ротором при помощи нереверсивного магнитного пускателя.

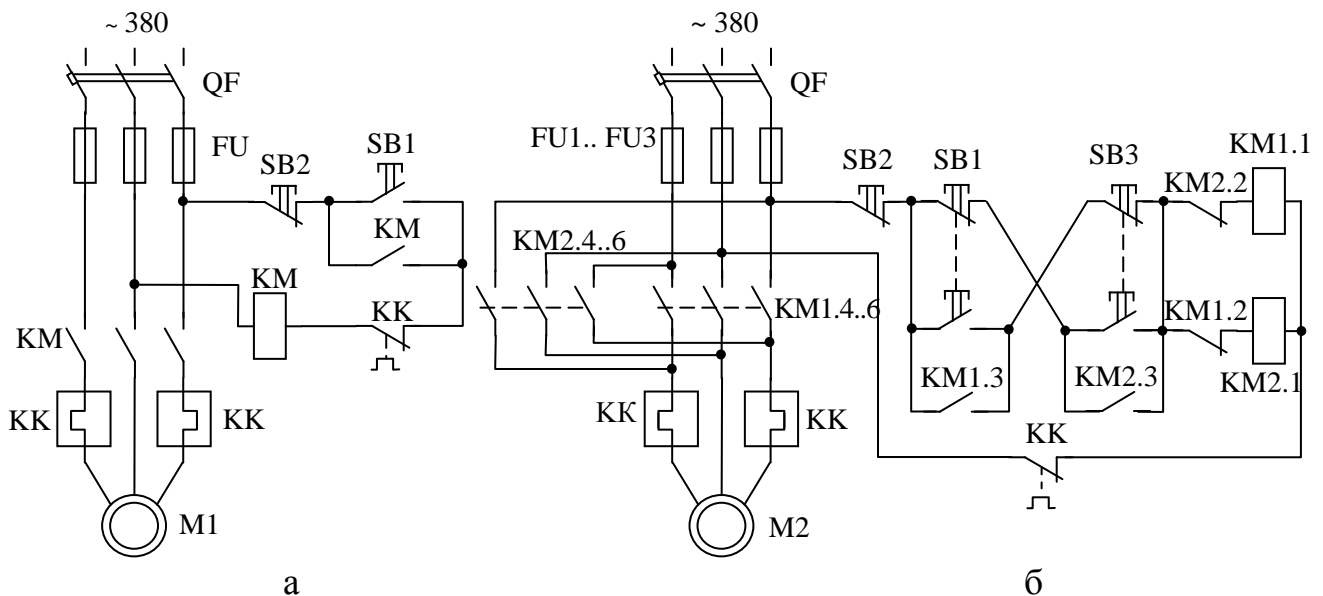


Рисунок 2.6.1 Схема прямого пуска (а) и реверсирования (б) асинхронного двигателя

Двигатель включается линейным контактором КМ, главные контакты которого находятся в силовой цепи электродвигателя. При нажатии кнопки SB1 катушка контактора КМ получает питание, контактор срабатывает и замыкает контакты в силовой цепи, одновременно замыкается блокировочный контакт, шунтирующий кнопку SB1. Поэтому при отпускании кнопки SB1 двигатель не отключается. Кнопкой SB2 разрывается цепь питания катушки КМ и двигатель останавливается. В случае перегрузки электродвигателя разомкнутся контакты тепловых реле КК. Электродвигатель будет отключен, если напряжение в сети (а, следовательно, и на катушке КМ) снизится до значения менее  $0,85 U_n$ . От коротких замыканий двигатель защищен предохранителями FU.

На рисунке 2.6.1б приведена схема пуска, остановки и изменения направления вращения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при помощи реверсивного магнитного пускателя.

При нажатии кнопки SB1 замыкается цепь питания катушки контактора КМ 1, которая притягивает его магнитную систему, в результате чего замыкаются контакты КМ1 в силовой цепи электродвигателя; двигатель включен. Одновременно замыкается блокировочный контакт КМ1, блокирующий кнопку SB1, и размыкается контакт КМ1 в цепи катушки КМ2. Он, как и аналогичный контакт катушки КМ2 в цепи катушки КМ1, предотвращает возможность одновременного включения обоих контакторов и короткого замыкания в силовой цепи. При нажатии кнопки SB3 размыкается цепь катушки КМ1 и контактор КМ1 отключает двигатель. Возвращается в нормальное замкнутое состояние контакт КМ1 в цепи катушки КМ2. Следовательно, образуется цепь питания катушки контактора КМ2, замыкаются силовые контакты КМ2; двигатель резко тормозится, а затем начинает вращаться в обратную сторону. В случае перегрузки двигателя цепь катушек КМ 1 и КМ2 будет разомкнута контактами тепловых реле КК. Останавливается двигатель нажатием кнопки SB2.

Некоторые реверсивные магнитные пускатели снабжаются только механической блокировкой от одновременного включения.

При реверсировании двигателей с большим маховым моментом следует сначала остановить двигатель нажатием кнопки SB2, а затем включить его на обратное направление вращения.

Контактные устройства имеют ряд недостатков: обладают низкими надежностью и долговечностью, быстро выходят из строя при работе в агрессивных средах, имеют недостаточную частоту включений и др.

Поэтому в настоящее время широко используют для управления электроприводами полупроводниковые (бесконтактные) элементы: тиристоры, транзисторы, магнитные усилители и др. Промышленность выпускает бесконтактные тиристорные реверсивные и нереверсивные пускатели разных типов. Функциональная схема тиристорного пускателя приведена на рисунке 2.6.2.

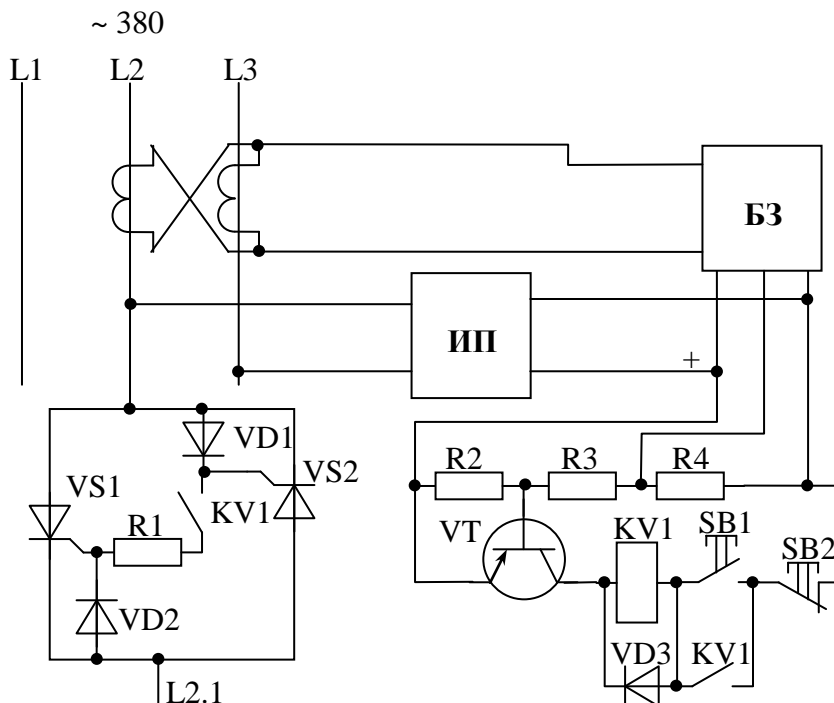


Рисунок 2.6.2 Функциональная схема тиристорного пускателя

Тиристорный пускатель состоит из силового блока, схемы управления, блока защиты БЗ и источника питания ИП цепей управления. При подаче напряжения в отсутствие аварийных состояний транзистор VT открыт. При нажатии кнопки SB1 получает питание катушка реле KV1, контакты которого замыкают цепь управления соответствующими тиристорами. Допустим, что после замыкания контакта KV1 положительная полуволна напряжения сети приложена к аноду тиристора VS1. Тогда ток управления, открывающий этот тиристор, пройдет через диод VD1, контакт KV1, резистор R1, управляющий электрод тиристора VS1. Тиристор открывается и пропускает ток к приемнику, а цепь управления шунтируется. При переходе тока через нуль тиристор VS1 закрывается. Следующая полуволна напряжения будет положительной для ти-

ристора VS2, ток управления протекает через VD2, R1, KV1.1 и управляющий электрод тиристора VS2. Тиристор VS2 открывается. Таким образом, к токоприемнику проходит ток прямого и обратного направлений. Аналогично протекает процесс и в фазах L1, L3. Блок токовой защиты БЗ воздействует на схему управления реле KV1, запирая транзистор VT при увеличении тока свыше допустимых значений.

При пуске асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором большой мощности, особенно от маломощной сети, с целью снижения пускового тока применяют схемы пуска при пониженном напряжении: пуск при помощи переключения с «Y» на «Δ», реакторный пуск, автотрансформаторный пуск и т.д. На рисунке 2.6.3 показана принципиальная схема управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с переключением при пуске обмоток статора с «Y» на «Δ». Необходимым условием применения этой схемы является нормальная работа двигателя при данном напряжении сети по схеме «Δ». Для сети с  $U_{л} = 380$  В необходимо иметь двигатель «Δ»/«Y» 380/660 В (Δ 380 В). Эффект – пусковой ток снижается в 3 раза.

При нажатии кнопки SB1 включается линейный контактор KM1 и получает питание катушка реле времени КТ, размыкающий блок-контакт которого включает катушку контактора KM3, при этом размыкается блок-контакт KM3 в цепи катушки контактора KM2. Двигатель разгоняется при включении обмоток по схеме «Y». Через 5...10 с (в зависимости от установленной выдержки времени) размыкается размыкающий контакт и замыкается замыкающий контакт реле времени КТ. Это приводит к отключению контактора KM3 и включению контактора KM2. Одновременное включение контакторов KM3 и KM2 исключается блок-контактом KM3.

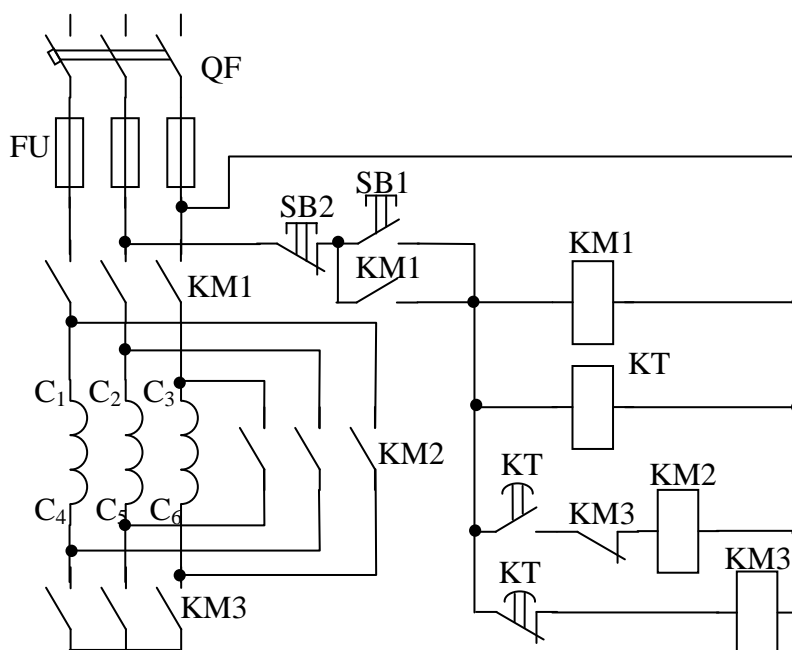


Рисунок 2.6.3 Схема управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с переключением при пуске обмоток статора с «Y» на «Δ»



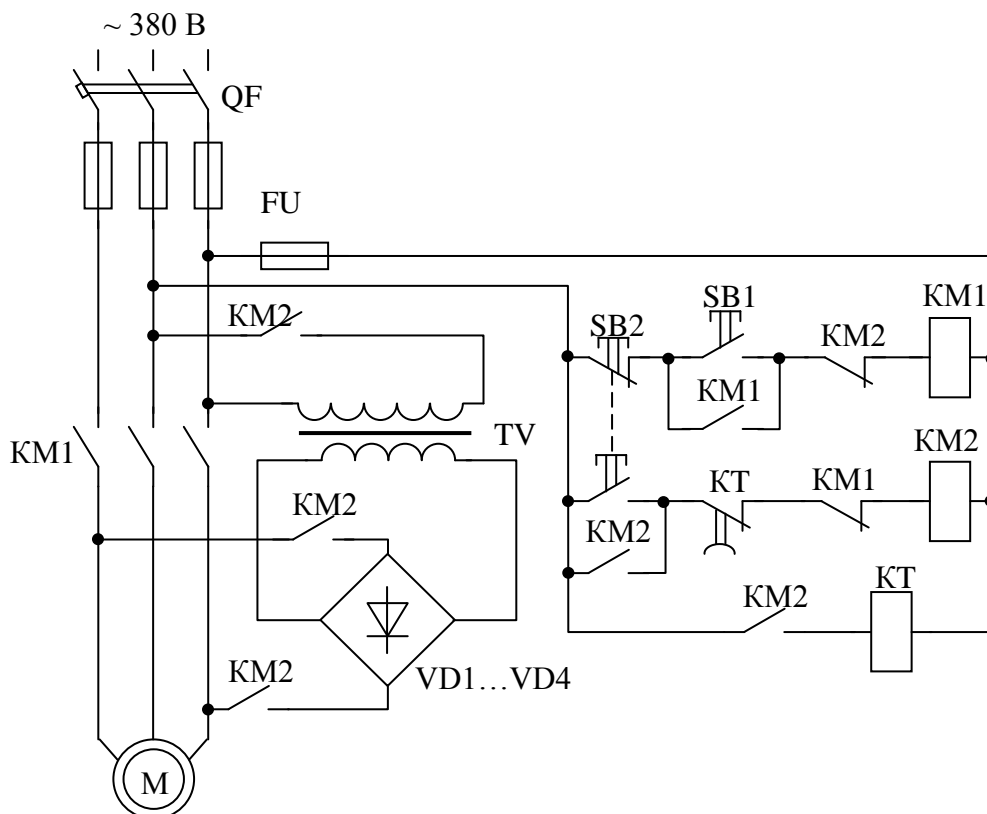


Рисунок 2.6.4 Схема управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором в режиме динамического торможения

На рисунке 2.6.4 приведена принципиальная схема управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором в режиме динамического торможения.

Пуск двигателя производится нажатием кнопки SB1. Для остановки двигателя нажимают кнопку SB2, что приводит к отключению пускателя KM1. Его главные контакты отключают электродвигатель от сети, а блок-контакты включают пускатель KM2 и далее трансформатор TV и подают постоянный ток от выпрямителя в цепь электродвигателя. Начинается процесс торможения, продолжительность которого определяется временем срабатывания реле динамического торможения КТ. Когда пройдет это время, реле КТ срабатывает и отключает трансформатор и выпрямитель. Электродвигатель останавливается, и вся схема возвращается в исходное положение.

В типовых схемах управления асинхронными двигателями с фазным ротором предусматривается включение или отключение секций сопротивлений пускового реостата в функции времени, тока или частоты. На рисунке 2.6.5 приведена принципиальная электрическая схема управления асинхронным электродвигателем с фазным ротором в функции времени.

При нажатии кнопки SB1 замыкается цепь питания катушки контактора KM1. Силовые контакты KM1 включают статорную обмотку двигателя в сеть. Одновременно начинает работать маятниковое реле времени, пристроенное к контактору. Через заданный промежуток времени реле замыкает свой контакт

КМ1' и включает катушку контактора КМ2. Силовые контакты КМ2 шунтируют первую ступень реостата R1. Одновременно начинает работать пристроенное к контактору КМ2 маятниковое реле времени, которое через некоторое время замыкает свой контакт КМ2' в цепи катушки КМ3. При этом шунтируется вторая ступень реостата R2 и включается реле времени.

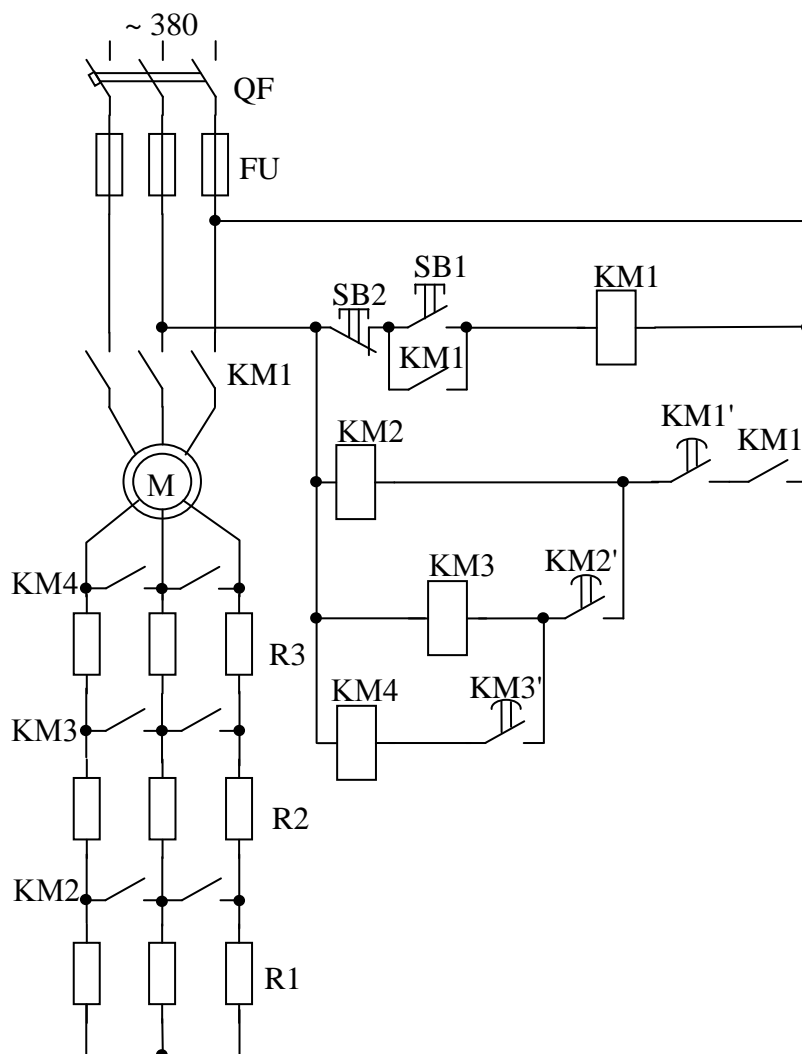


Рисунок 2.6.5 Электрическая схема управления асинхронным электродвигателем с фазным ротором в функции времени

На рисунке 2.6.6 приведена схема управления многоскоростным асинхронным двигателем (АД). Эта схема обеспечивает получение двух скоростей АД путем соединения секций обмотки статора в треугольник или двойную звезду, а также его реверсирование. Защита электропривода осуществляется тепловыми реле КК1 и КК2 и предохранителями FU.

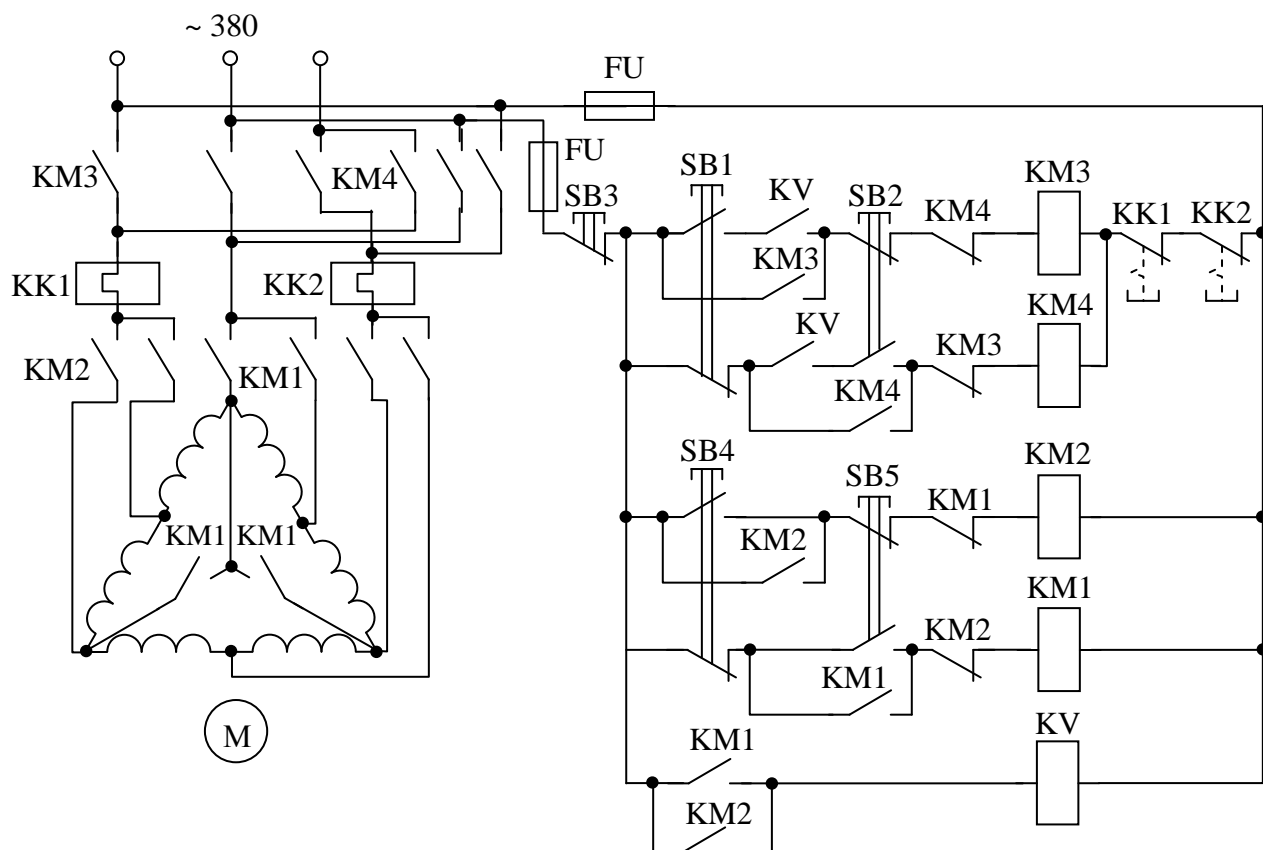


Рисунок 2.6.6 Схема управления многоскоростным асинхронным двигателем

Для пуска АД, например, с разбегом до низкой скорости нажимается кнопка SB4, после чего срабатывает контактор KM2 и блокировочное реле KV. Статор АД оказывается включенным по схеме треугольника, а реле KV, замкнув свои контакты в цепях аппаратов KM3 и KM4, подготавливает двигатель к подключению к источнику питания. Далее нажатие кнопки SB1 или SB2 приводит к включению АД соответственно в направлении «Вперед» или «Назад».

После разбега АД до низкой скорости может быть осуществлен его разгон до высокой скорости. Для этого нажимается кнопка SB5, что приведет к отключению контактора KM2 и включению контактора KM1 и пересоединению тем самым секций обмоток статора с треугольника на двойную звезду. Остановка АД производится нажатием кнопки SB3, что вызовет отключение всех контакторов и АД от сети и торможение двигателя выбегом.

Применение в схеме двухцепных кнопок управления не допускает одновременного включения контакторов KM1 и KM2, KM3 и KM4. Этой же цели служит перекрестное включение размыкающих блок-контактов контакторов KM1 и KM2, KM3 и KM4 в цепи их катушек.

## Программа работы

1. Изучить литературу по теме работы,
2. Ознакомится с конструкцией, паспортными и каталожными данными аппаратуры измерительных приборов,
3. Выписать паспортные данные применяемых в работе элементов,
4. Собрать схемы лабораторной установки и запустить,
5. Описать работу исследуемых схем,
6. Сделать выводы по работе.

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией, назначением и паспортными данными приборов управления.
2. Выписать каталожные данные используемых в схеме аппаратуры, приборов и оборудования.
3. Собрать схему (рисунок 2.6.7) управления двигателем с двух мест. Проверить работу схемы.

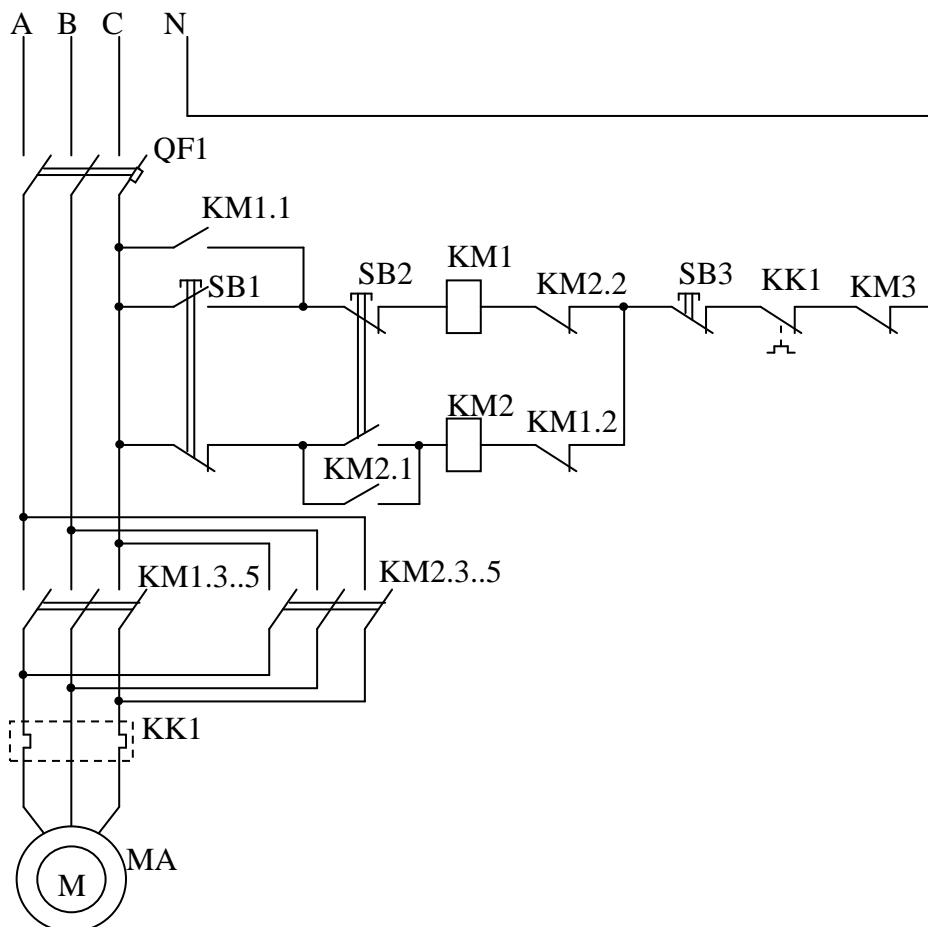


Рисунок 2.6.6 Схема управления асинхронным двигателем при реверсировании

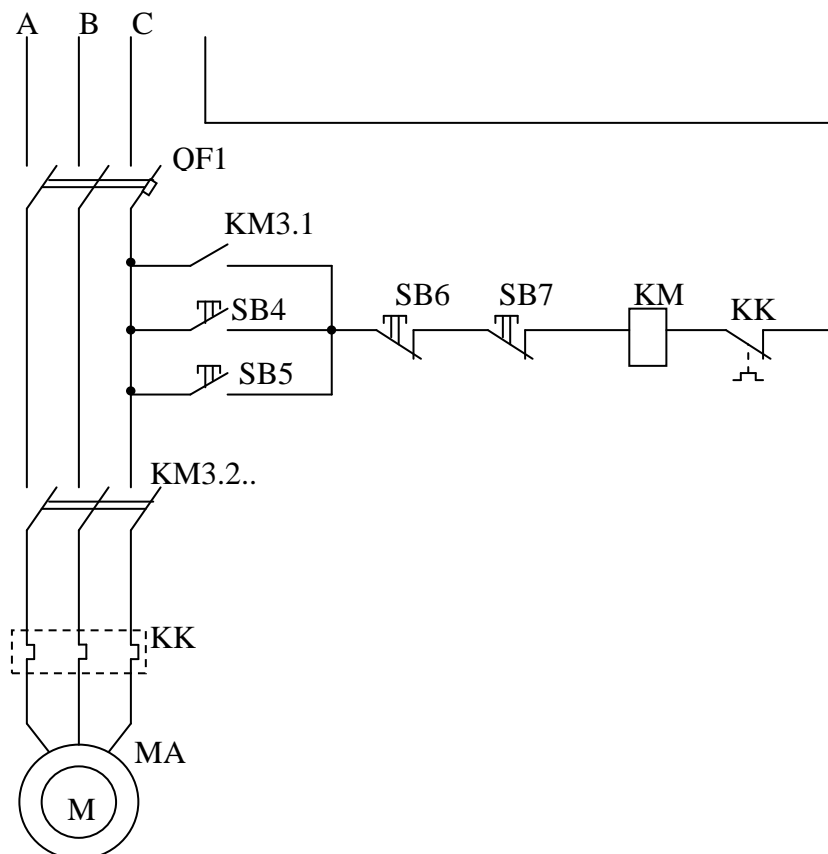


Рисунок 2.6.7 Схема управления асинхронным двигателем с двух мест.

4. Собрать схему (рисунок 2.6.6) реверсирования короткозамкнутого двигателя с помощью магнитных пускателей. Проверить работу схемы.
5. Ввести контакт от первого магнитного пускателя в схему реверсирования для реализации последовательного пуска двигателей согласно рисунку. Проверить работу схемы.
6. Описать работу схем и сделать выводы по работе.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Исследуемые схемы и паспортные данные используемых приборов.
3. Описание работы схем.
4. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение и устройство автоматов, контакторов, магнитных пускателей и электромагнитных реле?
2. Как производится выбор пускателей, реле и автоматов?
3. Объясните работу собранных Вами схем управления электрическим приводом?
4. Чем отличаются силовые цепи от цепей управления?

5. Каково назначение блокировочных контактов в схемах управления?
6. Что произойдет при одновременном срабатывании пускателей в схеме реверсирования двигателя?
7. Объясните, в какие места схемы управления с двух мест Вы установите дополнительные кнопки, чтобы обеспечить пуск с трех мест.
8. Почему в схеме управления динамическим торможением асинхронного двигателя необходим понижающий трансформатор?
9. Каким образом осуществляется реверсирование асинхронного двигателя? Двигателя постоянного тока?
10. Какие отличия будут в работе схемы прямого пуска двигателя при отсутствии блокировочного контакта?
11. Какие отличия в условном обозначении контактов реле времени с задержкой при срабатывании и с задержкой при отпуске?

## 2.7 Лабораторная работа №7

### Изучение процессов нагрева остывания электродвигателя

#### Цель работы:

Изучить основные закономерности процесса нагрева и остывания электродвигателя и методики измерения.

#### Теоретические сведения

Потери энергии в магнитопроводе и обмотках вызывают нагрев электродвигателя (ЭД). Потери в магнитопроводе на перемагничивание и вихревые токи не зависят от нагрузки ЭД и считаются постоянными. Потери в обмотках зависят от квадрата тока и считаются переменными. Применение термостойкой изоляции и принудительного охлаждения позволяет увеличить плотность тока в проводах и вследствие этого, мощность ЭД и уменьшить его габариты.

Количество тепловой энергии, отдаваемой ЭД в окружающую среду, пропорционально разности их температур. В холодной среде ЭД можно несколько перегрузить по мощности без опасности выхода его из строя, в среде с повышенной температурой ЭД может перегреться даже при пониженной или номинальной мощности. Стандартная температура окружающей среды принимается равной  $\theta_{0,ст} = 40$  °С. Предельно допустимое превышение  $\tau_{доп}$  температуры обмотки  $\theta_{доп}$  для стандартной температуры окружающей среды  $\theta_{0,ст}$

$$\tau_{доп} = \theta_{доп} - \theta_{0,ст} ,$$

где  $\tau_{доп}$  -допустимое превышение температуры над стандартной  $\theta_{0,ст} = 40$  °С.

$$\Delta\tau = \theta_{0,ст} - \theta_{о.} = 40 - \theta_{о.},$$

где  $\Delta\tau$  -превышение температуры над окружающей средой;

$\theta_0$  - температура окружающей среды, °С.  
Теплоотдача двигателя

$$A = P_H(1 - \eta_H) / (\eta_H \tau_{\text{доп}}) \text{ Вт/К.}$$

Уравнение нагрева и остывания ЭД

$$\tau = \tau_{\text{уст}}(1 - e^{-t/T_H}) + \tau_0 e^{-t/T_0}.$$

Установившееся превышение температуры

$$\tau = \Delta P / A$$

Для двигателя определяют коэффициент уменьшения теплоотдачи в неподвижном состоянии  $\beta_0$  как отношение теплоотдачи в работающем состоянии к теплоотдаче в неподвижном состоянии

$$\beta_0 = A_0 / A,$$

Где  $A_0$  – теплоотдача в неработающем состоянии.

Для герметичного двигателя с самовентиляцией  $\beta_0 \approx 0,5$ ; для защищенного двигателя с самовентиляцией  $\beta_0 \approx 0,33$ .

В переходных режимах

$$\beta = 2(1 + \beta_0),$$

$$\Delta \tau = \Theta_{\text{уст}} - \Theta_0 = 40 - \Theta_0,$$

где  $\Delta \tau$  - превышение температуры над окружающей средой;

Мощность при нестандартном превышении температуры

$$P_{\Theta} = P_H \sqrt{[1 + \Delta \tau (\alpha + 1) / \tau_{\text{доп}}]}.$$

Процесс нагрева и остывания ЭД инерционен и характеризуется постоянными времени нагрева  $T_H$  и остывания  $T_0$ . При неизменной мощности потерь процессы нагрева и остывания практически завершаются через время, равное 3-5 постоянным времени нагрева и остывания.

Постоянная времени нагрева

$$T_H = C / A = c_1 m \tau_{\text{доп}} \eta_H / [P_H / (1 - \eta_H)],$$

Где  $C$  - теплоемкость ЭД,

$c_1$  - теплоемкость материала двигателя  $c_1 = 4800 \text{ Дж/кг}$ .

Постоянная времени остывания неподвижного ЭД

$$T_0 = T_H / \beta$$

Нагрев происходит по закону:

$$\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-t/T_n}) + \tau_0 e^{-t/T_0},$$

Где  $\tau_{уст}$  - установившаяся разность температуры (превышение температуры) нагрева ЭД и окружающей среды, К.

$\tau_{уст}$  определяется отношением мощности потерь  $q$  (Вт) в ЭД к произведению площади его поверхности  $F$  (м<sup>2</sup>) на коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  [Вт/(К м<sup>2</sup>)];

$$\tau_{уст} = q / (F \alpha) \text{ или } \tau_{уст} = \Delta P / A,$$

$T_n$  – постоянная времени нагрева, имеет размерность времени.

$$T_n = CG / (\alpha F) \text{ или } T_n = C / A = c_1 m \tau_{доп} \eta_n / [P_n / (1 - \eta_n)],$$

где  $C$  - удельная теплоемкость материала, Дж/(кг К),

$G$  – масса электрической машины, (кг).

Постоянные времени зависят только от конструкции ЭД и не зависят от загрузки по току.

Остывание происходит по закону:

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

Где  $\tau_0$  - начальная разность температур ЭД и среды, К.

Вычисление температуры обмоток производят по изменению величины их активного сопротивления на постоянном токе.

Процесс нагрева длителен, поэтому  $T_n$  в лабораторной работе определяют методом трех точек. Для этого на кривой нагрева определяют три точки:  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ , отстоящие по времени друг от друга на  $\Delta t$ . Величину  $T_n$  вычисляют по формуле:

$$T_{нагр} = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}},$$

Где  $\Delta t$  - отрезок времени процесса нагрева (остывания).

Температуру обмоток  $\theta_T$  определяют по изменению сопротивления обмоток при нагреве по формуле:

$$\theta_T = \frac{R_T - R_x}{R_x} (235 + \theta_x) + \theta_x,$$



где:  $R_r$  -сопротивление нагретой обмотки, Ом.  
 $R_x$ - сопротивление холодной обмотки, Ом.  
 $\theta_x$  - температура окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ .  
235-коэффициент для меди, 245-для алюминия.

Сопротивление обесточенных обмоток измеряют многозарядным цифровым омметром. Температуру окружающей среды измеряют термометром.

### **Программа работы**

1. Изучить литературу по теме работы,
2. Ознакомится с конструкцией, паспортными и каталожными данными аппаратуры измерительных приборов,
3. Выписать паспортные данные применяемых в работе элементов,
4. Исследовать процесс нагрева электродвигателя,
5. Исследовать процесс охлаждения электродвигателя,
6. Построить графики нагрева и охлаждения,
7. Провести расчеты постоянных времени,
8. Сделать выводы по работе.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с конструкцией, назначением и паспортными данными приборов управления.
2. Выписать каталожные данные используемых в схеме аппаратуры, приборов и оборудования.
3. Рассчитайте постоянные времени нагрева и охлаждения по выше-приведенным формулам.
4. Исследуйте экспериментально процесс нагрева ЭД. Схема лабораторной установки изображена на рисунке 2.7.1.  
Измерьте сопротивление отключенной сетевой обмотки в холодном состоянии. Включите ЭД под нагрузкой на две минуты и отключите. Измерьте сопротивление проводников цифровым омметром на отключенном двигателе. Повторите опыт несколько раз.
5. Результаты занесите в таблицу 2.7.1.

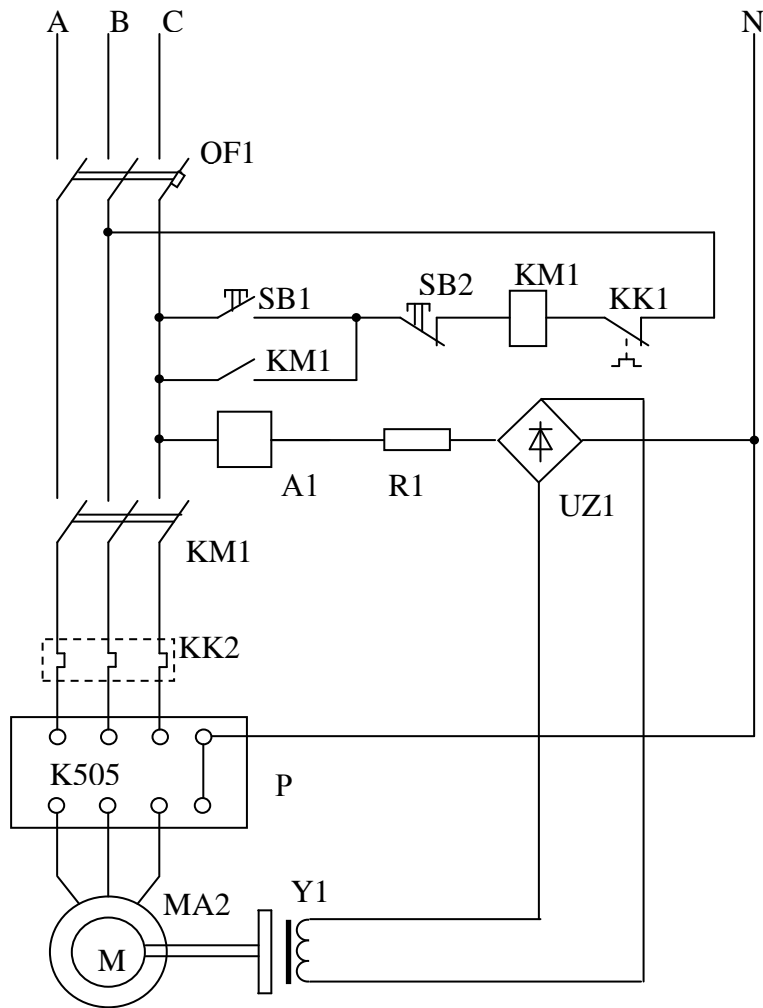


Рисунок 2.7.1 Схема лабораторной установки.

Таблица 2.7.1 – Данные нагрева электродвигателя

$\theta_T, ^\circ\text{C}$						
$R_{\Gamma}, \text{Ом}$						
$\Delta t, \text{мин}$						
$T_{\text{н}}, \text{мин}$						

6. Рассчитайте  $\theta_T$  по приведенным выше формулам. Рассчитайте постоянную времени нагрева, внесите данные в таблицу 2.7.1. Найдите среднее значение  $T_{\text{н}}$ . 7. По измеренным данным постройте график нагрева  $\theta_T = f(t)$ .

8. Исследуйте процесс охлаждения ЭД. Отключите ЭД от сети и через каждые 2 минуты измеряйте сопротивление обмоток. Результаты измерений занесите в таблицу 2.7.2.

Таблица 2.7.2 – Данные охлаждения электродвигателя

$\theta_T, ^\circ\text{C}$						
$R_T, \text{Ом}$						
$\Delta t, \text{мин}$						
$T_o, \text{мин}$						

9. Рассчитайте  $\theta_T$  по приведенным выше формулам. Рассчитайте постоянную времени охлаждения, внесите данные в таблицу 2.7.2. Найдите среднее значение  $T_o$ .

10. По измеренным данным постройте график охлаждения  $\theta_T = f(t)$ .

11. Сравните рассчитанные и экспериментально полученные значения постоянных времени.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема лабораторной установки и паспортные данные используемых приборов.
3. Расчеты постоянных времени. Таблицы с измеренными и рассчитанными данными.
4. Графики нагрева и охлаждения.
5. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Как выглядит временная зависимость нагрева ЭД для продолжительного и кратковременного режимов работы ?
2. Как определяют время нагрева и остывания по экспериментальным графикам?
3. Какие классы нагревостойкости изоляции существуют? Какие из них используют в ЭД ?
4. Как определить температуру обмотки ЭД ?
5. Что такое постоянная времени нагрева ЭД и что она характеризует?
6. От чего зависит постоянные времени нагрева  $T_n$  и охлаждения  $T_o$  ЭД?
7. Какие виды охлаждения применяют ЭД ?
8. Как зависит долговечность изоляции от температуры нагрева обмоток?
9. Как влияет температура окружающей среды на нагрев ЭД ?
10. Какая температура окружающей среды является стандартной?
11. Как зависят масса и мощность ЭД от теплостойкости изоляции?
12. Как происходит нагрев и остывания ЭД для продолжительного, кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы?
13. Как по результатам опыта нагрева и остывания экспериментально определить мощность ЭД ?

## 2.8 Лабораторная работа № 8

### Определение момента инерции электродвигателя

#### Цель работы:

Освоение навыков расчета и измерения момента инерции элементов электропривода.

#### Теоретические сведения

В электроприводе момент инерции в зависимости от конкретных условий стремятся увеличить (например, введением маховиков) или уменьшить.

При увеличении момента инерции всегда увеличивается время пуска, возрастают потери в двигателе и его нагрев (вплоть до недопустимого). Одновременно улучшается стабильность скорости в переходных процессах и динамическая устойчивость. Поэтому момент инерции необходимо уметь рассчитывать или определять экспериментально. При частых пусках опасность перегрева проявляется еще сильнее.

Энергия, запасенная во вращающемся теле вращения, определяется выражением

$$W = J \omega^2 / 2$$

Момент инерции определяется общим выражением

$$J = \int m r^2 dr$$

Фигуры различной сложности можно разложить на простые, с известными моментами инерции, и провести интегрирование в аналитическом виде или численным интегрированием на компьютере.

Для опытного определения момента инерции существуют методы крутильных и маятниковых колебаний, а также метод выбега. При свободном выбега кинетическая энергия вращающегося ротора расходуется на преодоление сил трения. Поэтому необходимо определить тормозной момент  $M_T$ , изменение частоты вращения  $\omega_x - \omega$  за время  $\Delta t$ , в пределах которого  $M_T$  можно считать неизменным, а частоту вращения изменяющейся линейно.

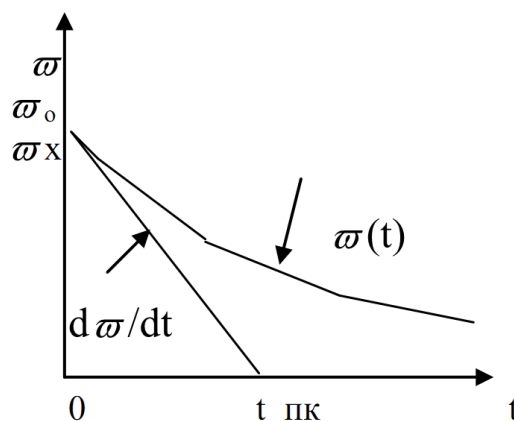


Рисунок 2.8.1. Кривая выбега двигателя.  $\omega_0$  – синхронная частота вращения,  $\omega_x$  – частота вращения холостого хода, измеряется цифровым тахометром.

Метод выбега основан на определении составляющих уравнения

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

Соотношение  $d\omega/dt$  определяют по тангенсу угла наклона кривой выбега. Выбег происходит по экспоненте, но в пределах ограниченного участка его можно считать линейно изменяющимся, т.е. зависимости  $\omega(t)$  в начальный момент времени после отключения двигателя от сети.

В данной лабораторной установке моментом трения можно пренебречь ввиду малости. Момент на валу задается электромагнитным тормозом. Т.к. тормозной момент зависит от скорости вращения, в расчетной формуле используем среднее значение момента

$$M_{cp} = (M_1 + M_2) / 2,$$

где  $M_1, M_2$  – моменты в начале и в конце периода торможения.

Для определения момента инерции используем формулу

$$J = M_{cp} \Delta t / (\omega_1 - \omega_2),$$

В переходных режимах потери энергии в электроприводе переменного тока можно определить по следующим соотношениям:

Разгон, динамическое торможение –  $\Delta P = J \omega^2 (1 + R_1/R_2) 1/2$ ,

Торможение противовключением –  $\Delta P = J \omega^2 (1 + R_1/R_2) 3/2$ ,

Реверс –  $\Delta P = J \omega^2 (1 + R_1/R_2) 1/2$ .

### **Программа работы**

1. Изучить литературу по теме работы,
2. Ознакомится с конструкцией, паспортными и каталожными данными аппаратуры измерительных приборов,
3. Выписать паспортные данные применяемых в работе элементов,
4. Экспериментально определить момент инерции электропривода,
5. Рассчитать потери электропривода в переходных режимах,
6. Сделать выводы по работе.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с конструкцией, назначением и паспортными данными приборов управления.
2. Выписать каталожные данные используемых в схеме аппаратуры, приборов и оборудования.

3. Исследуйте экспериментально момент инерции электропривода. Схема лабораторной установки изображена на рисунке 2.8.2.

Для нахождения момента инерции проведите измерения времени остановки электропривода с разными значениями момента сопротивления на валу. Для этого запустите двигатель, установите необходимый момент при помощи электромагнитного тормоза, отключите двигатель и измерьте время до полной остановки. Повторите измерения для других значений момента.

4. Измеренные данные занесите в таблицу 2.8.1.

Таблица 2.8.1

Измеренные и вычисленные данные

$M, \text{ Н м}$					
$\Delta t, \text{ с}$					
$J, \text{ кг м}^2$					

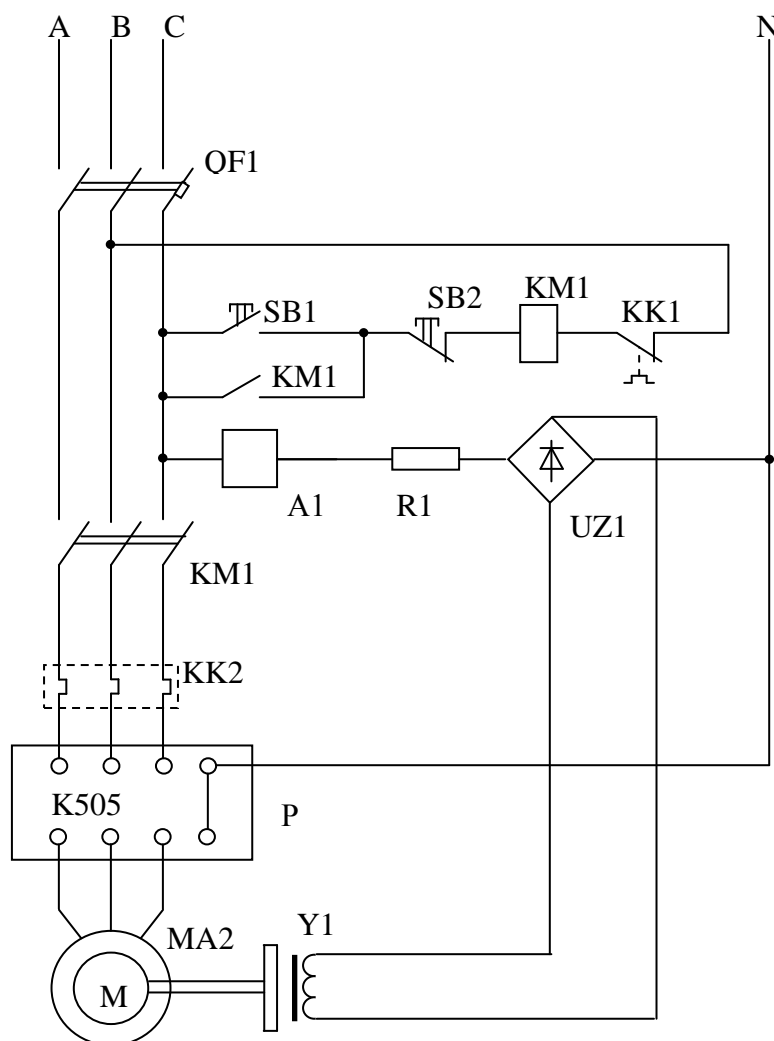


Рисунок 2.8.2 Схема лабораторной установки.

5. Вычислите и занесите в таблицу момент инерции. Рассчитайте его

среднее значение. При вычислениях учитываем, что  $M_{cp} = M/2$ ,  $\omega_2 = 0$ . Скорость вращения двигателя мало отличается от синхронной, поэтому в расчетах можно считать ее равной  $157 \text{ с}^{-1}$ .

6. Рассчитайте потери энергии данного электропривода в переходных режимах: разгон, динамическое торможение, торможение противовключением, реверс.

### **Содержание отчета**

1. Название и цель работы.
2. Схема лабораторной установки и паспортные данные используемых приборов.
3. Расчеты момента инерции. Таблица с измеренными и рассчитанными данным.
4. Расчеты потерь в переходных режимах.
5. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое момент инерции? Как он проявляет себя в приводе?
2. Как определить момент инерции?
3. Как определить момент инерции двигателя по опытным данным?
4. Как проводится приведение моментов инерции к валу электродвигателя?
5. Напишите выражение для момента инерции и махового момента.
6. Напишите выражение для мощности потерь энергии при пуске электродвигателя, реверсе, торможении противовключением.
7. Почему применение маховиков позволяет уменьшить мощность двигателя при ударной нагрузке?

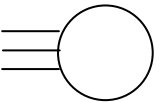
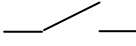

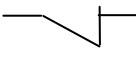
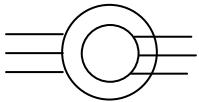
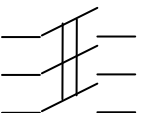
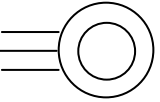
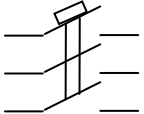
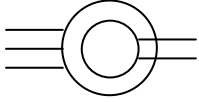
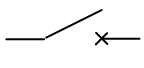
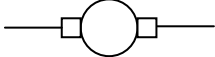
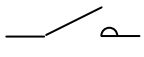
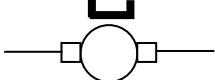
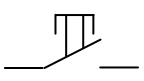
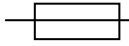
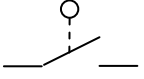

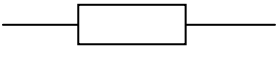
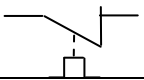



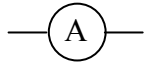
### 3. Литература

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
2. Бекишев Р.Ф., Дементьев Ю.Н. Общий курс электропривода: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2014. 302 с.
3. Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода: учебник. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2015. 272 с.
4. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электротехника и электроника. Электрический привод: учебное пособие. Саратов: Профобразование, 2017. 223 с.
5. Епифанов А.П., Малайчук Л.М., Гушинский А.Г. Электропривод: учебник. СПб.: Лань, 2012. 400 с.
6. Епифанов А.П., Гушинский А.Г., Малайчук Л.М. Электропривод в сельском хозяйстве: учебное пособие. СПб.: Лань, 2016. 224 с.
7. Емельянов А.П., Вершинин В.И., Козярук А.Е. Электропривод машин и оборудования: учебное. СПб.: СПб ГУ. 300 с.
8. Кацман М. М. Электрический привод: учебник для студ. обр. учр. среднего проф. обр. 6-е изд. М.: Академия, 2013. 384 с.
9. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам. М.: Академия. 2005, 479 с.
10. Кузнецов А.Ю. Электрический привод и электрооборудование в АПК: практикум. Новосибирск: НГАУ, 2016. 73 с.
11. Макаров В.Г. Анализ системных свойств асинхронного электропривода: монография. Казань: Из-во КазНИТУ, 2012. 105 с.
12. Никитенко Г.В. Электропривод производственных механизмов: учебное пособие. СПб.: Лань, 2013. 208 с.
13. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования. 3-е изд., испр. и доп. М.: Издательский центр «Академия», 2013. 288 с.
14. Панкратов В.В. Автоматическое управление электроприводами. Ч. I. Регулирование координат электроприводов постоянного тока: учебное пособие. Новосибирск: НовГАУ, 2013. 200 с.
15. Системы автоматизированного управления электроприводами / под. ред. Ю.Н. Петренко. М.: КолосС, 2007.



## Приложение 1

Некоторые условные графические обозначения элементов на принципиальных электрических схемах

Графическое обозначение	Наименование элемента	Графическое обозначение	Наименование элемента
	Трехфазный электродвигатель		Нормально разомкнутый контакт
	Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя		Нормально замкнутый контакт
	Асинхронный двигатель с фазным ротором		Механически связанные контакты
	Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором		Трехполюсный автоматический выключатель
	Синхронная машина с электромагнитным возбуждением		Контакт с дугогасительной камерой
	Якорь коллекторного двигателя		Силовой контакт
	Коллекторный двигатель с постоянным возбуждением		Кнопочный выключатель
	Плавкая вставка, предохранитель		Конечный (путевой) выключатель
	Нагревательный элемент теплового реле		Резистор
	Контакт теплового реле		Конденсатор
	Катушка контактора, электромагнитного реле		Катушка индуктивности
	Регистрирующий измерительный прибор (амперметр). В окружности указывается: А – амперметр, V – вольтметр, W – ваттметр, φ - фазометр, G - гальванометр		

## Приложение 2

### Буквенные обозначения элементов на принципиальных схемах

Первая буква кода (обязательная)	Группа видов элементов	Примеры видов элементов	Двухбуквенный код
<b>A</b>	Устройство (общее обозначение)		
<b>B</b>	Преобразователи неэлектрических величин в электрические (кроме генераторов и источников питания) или наоборот аналоговые или многоразрядные преобразователи или датчики для указания или измерения	Громкоговоритель	BA
		Магнотристорный элемент	BB
		Сельсин-приемник	BE
		Сельсин-датчик	BC
		Тепловой датчик	BK
		Фотоэлемент	BL
		Датчик давления	BP
		Датчик частоты вращения (тахогенератор)	BR
		Датчик скорости	BV
<b>C</b>	Конденсаторы		
<b>D</b>	Схемы интегральные, микросборки	Схема интегральная аналоговая	DA
		Схема интегральная цифровая, логический элемент	DD
<b>E</b>	Элементы разные	Нагревательный элемент	EK
		Лампа осветительная	EL
<b>F</b>	Разрядники, предохранители, устройства защитные	Дискретный элемент защиты по току мгновенного действия	FA
		Дискретный элемент защиты по току инерционного действия	FP
		Предохранитель плавкий	FU
<b>G</b>	Генераторы, источники питания	Батарея	GB
<b>H</b>	Устройства индикационные и сигнальные	Прибор звуковой сигнализации	HA
		Прибор световой сигнализации	HL
<b>K</b>	Реле, контакторы, пускатели	Реле токовое	KA
		Реле электротепловое	KK
		Контактор, магнитный пускатель	KM
		Реле времени	KT
		Реле напряжения	KV
<b>L</b>	Катушки индуктивности, дроссели	Дроссель люминесцентного освещения	LL
<b>M</b>	Двигатели		

Буквенные обозначения элементов на принципиальных схемах

Первая буква кода (обязательная)	Группа видов элементов	Примеры видов элементов	Двухбуквенный код
<b>P</b>	Приборы, измерительное оборудование Примечание. Сочетание PE применять не допускается	Амперметр	PA
		Частотомер	PF
		Счетчик активной энергии	PI
		Счетчик реактивной энергии	PK
		Вольтметр	PV
		Ваттметр	PW
<b>Q</b>	Выключатели и разъединители в силовых цепях	Выключатель автоматический	QF
		Короткозамыкатель	QK
		Разъединитель	QS
<b>R</b>	Резисторы	Терморезистор	RK
		Потенциометр	RP
		Шунт измерительный	RS
<b>S</b>	Устройства коммутационные в цепях управления, сигнализации и измерительных Примечание. Обозначение SF применяют для аппаратов, не имеющих контактов силовых цепей	Выключатель или переключатель	SA
		Выключатель кнопочный	SB
		Выключатель автоматический	SF
		Выключатели, срабатывающие от различных воздействий:	
		от уровня	SL
		от давления	SP
		от положения (путевой)	SQ
		от частоты вращения	SR
от температуры	SK		
<b>T</b>	Трансформаторы, автотрансформаторы	Трансформатор тока	TA
		Трансформатор напряжения	TV
<b>V</b>	Приборы электровакуумные и полупроводниковые	Диод, стабилитрон	VD
		Транзистор	VT
		Тиристор	VS
<b>X</b>	Соединения контактные	Токосъемник, контакт скользящий	XA
		Штырь	XP
		Гнездо	XS
		Соединение разборное	XT
<b>Y</b>	Устройства механические с электромагнитным приводом	Электромагнит	YA
		Тормоз с электромагнитным приводом	YB
		Муфта с электромагнитным приводом	YC

Учебное издание

Безик Валерий Александрович  
Кубаткина Ольга Вячеславовна  
Ковалев Виталий Витальевич

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Методические указания  
по выполнению лабораторных работ

Редактор Осипова Е.Н.

---

Подписано к печати 11.03.2019 г. Формат 60x84 1/16.  
Бумага печатная. Усл. п. л. 4,42. Тираж 25 экз. Изд. № 6339.

---

Издательство Брянского государственного аграрного университета  
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ