

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

# Методические указания

по выполнению лабораторных работ  
в лаборатории «Общая электротехника»  
для студентов неэлектротехнических специальностей  
дневной и заочной форм обучения

Часть 2

«Электрические машины и аппараты»

УДК 621.313(07)

МБ4

Методические указания по выполнению лабораторных работ в лаборатории «Общая электротехника» для студентов неэлектротехнических специальностей дневной и заочной форм обучения. Часть 2 «Электрические машины и аппараты».

Настоящие указания предназначены в качестве учебного пособия для студентов неэлектротехнических специальностей дневной и заочной форм обучения при выполнении лабораторных работ по курсам «Электротехника», «Электротехника и электроника», «Электротехника, электрические машины и аппараты», «Электротехника и электрооборудование» и т. п.

Содержат руководство для выполнения лабораторных работ по разделу «Электрические машины и аппараты». В описание каждой лабораторной работы входят основы теории, указания по проведению эксперимента, принципиальные схемы, контрольные вопросы и рекомендуемая литература.

Составители: Панасюк И.М., ст. преподаватель;  
Тромза Т.В., ассистент;  
Устинов Д.Б., ассистент.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.1

### Тема. Однофазный трансформатор.

**Цель:** экспериментальное исследование однофазного трансформатора и определение его параметров по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

#### Основные сведения

**Трансформатор** – статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока (ГОСТ 16110-82).

Основными составными частями трансформатора являются: первичная обмотка, подключаемая к источнику электроэнергии, одна или несколько вторичных обмоток, к которым подключаются потребители электроэнергии или другие внешние цепи и магнитопровод (сердечник), изготовленный из ферромагнитного материала (например, листовой электротехнической стали) и передающий энергию посредством магнитного поля от первичной обмотки к вторичной. Обмотки изготовлены из изолированного медного или алюминиевого провода и электрически разделены. В трехфазном трансформаторе обмотки являются трехфазными, т. е. каждая обмотка состоит из трех однофазных обмоток, соединенных по соответствующей схеме («звезда» или «треугольник»).

Несмотря на различия в конструкции и назначении, у всех трансформаторов принцип работы, а также уравнения электрического и магнитного состояния, одинаковы. Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции, которое возникает при изменении тока в индуктивно связанных катушках. Поэтому обмотки трансформатора включаются либо в цепи переменного тока, либо в цепи пульсирующего тока (для импульсных трансформаторов). В обоих случаях преобразование тока осуществляется без изменения частоты.

При подключении первичной обмотки двухобмоточного трансформатора (рис.1), имеющей  $w_1$  витков, к сети с переменным напряжением  $U_1$  в этой обмотке возникает переменный ток  $I_1$ , который создает переменный магнитный поток  $\Phi$ , основная часть которого сосредоточена и замыкается в сердечнике.

Поток  $\Phi$  индуцирует в обеих обмотках переменные э.д.с.  $E_1$  и  $E_2$ , пропорциональные, согласно закону электромагнитной индукции, числам витков  $w_1$  и  $w_2$  соответствующих обмоток и скорости изменения потока  $d\Phi/dt$ . Таким образом, индуцированные в каждой обмотке мгновенные значения э.д.с.:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

При этом отношение действующих значений э.д.с. в обмотках:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

Поскольку падения напряжений

в обмотках трансформатора обычно не превышают 3–5 % от номинальных значений, то номинальные напряжения можно считать  $U_1 \approx E_1$  и  $U_2 \approx E_2$ . Тогда  $U_1/U_2 = w_1/w_2$ .

Следовательно, подбирая соответствующим образом число витков обмоток, можно при заданном напряжении  $U_1$  получить желаемое напряжение  $U_2$  (при  $w_1 > w_2$  получим  $U_1 > U_2$ , в этом случае трансформатор называют *понижающим*, а при  $w_1 < w_2$  -  $U_1 < U_2$ , а трансформатор называют *повышающим*).

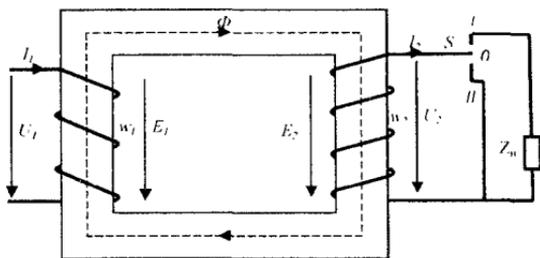


Рисунок 1

Если к вторичной обмотке трансформатора подключить нагрузку (на рис.1 положение / переключателя S), то под действием э.д.с. в ней возникнет ток  $I_2$  и магнитный поток в сердечнике будет создаваться двумя м.д.с. ( $w_1 \cdot \dot{I}_1$  - первичной и  $w_2 \cdot \dot{I}_2$  - вторичной цепи соответственно). Токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  смещены по фазе таким образом, что создаваемый ими магнитный поток сохраняется практически постоянным в пределах от холостого хода до номинальной нагрузки.

Основными величинами, характеризующими однофазный трансформатор, являются:

- номинальные напряжения  $U_{1н}$  и  $U_{2н}$  первичной и вторичной обмоток соответственно;
- номинальные токи  $I_{1н}$  и  $I_{2н}$  первичной и вторичной обмоток соответственно;
- номинальная мощность  $S_n = U_{1н} \cdot I_{1н} = U_{2н} \cdot I_{2н}$ ;
- коэффициент трансформации  $k$ ;
- потери мощности  $\Delta P_{\text{в}}$  и  $\Delta P$ , магнитные (в стали) и электрические (в меди) соответственно;
- коэффициент полезного действия (к.п.д.)  $\eta$ ;
- коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$ ;
- ток холостого хода  $i_0$ ;
- напряжение короткого замыкания  $u_{к\%}$ .

Ток холостого хода  $i_0$ , коэффициент трансформации  $k$ , а также параметры цепи намагничивания трансформатора определяются из опыта холостого хода.

Опыт холостого хода проводят при номинальном значении напряжения первичной обмотки  $U_{1н}$  и отключенной нагрузке (на рис.1 переключатель S в положении 0). Так как ток во вторичной цепи отсутствует ( $I_{20} = 0$ ), то падение напряжения и потери мощности во вторичной обмотке равны нулю. Ток в первичной обмотке  $I_{10}$  в режиме холостого хода значительно меньше номинального (у мощных трансформаторов составляет около 5 % от номинального тока  $I_{1н}$ , а у трансформаторов малой мощности - до 40 %), поэтому падением напряжения в первичной обмотке можно пренебречь и считать, что напряжения на обмотках трансформатора равны соответствующим э.д.с. Тогда коэффициент трансформации можно с достаточной точностью определить отношением первичного и вторичного напряжений холостого хода.

Мощность, потребляемая трансформатором из сети в режиме холостого хода  $P_0$ , рассеивается в магнитопроводе и в первичной обмотке. Поскольку ток  $I_{10}$  мал, а мощность потерь в обмотке пропорциональна квадрату тока, то можно считать, что  $P_0$  - это магнитные потери в сердечнике  $\Delta P_{\text{м}}$  (ввиду малости потерь в обмотке).

Данные потери зависят от величины магнитного потока. При постоянстве частоты  $f$  и напряжения  $U_1$  питающей сети величина магнитного потока в магнитопроводе практически не зависит от нагрузки, вследствие чего потери мощности в магнитопроводе являются постоянной (паспортной) величиной.

Электрические потери мощности  $\Delta P$ , и напряжение короткого замыкания  $u_{к\%}$  определяют при проведении опыта короткого замыкания. Для проведения опыта короткого замыкания (на рис. 1, положение II переключателя S) вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко ( $\underline{z}_{22} = 0$ ), а на первичную подают пониженное напряжение  $U_{1к}$ , при котором токи в обмотках равны номинальным значениям ( $I_{1н}, I_{2н}$ ). Относительное значение первичных  $U_{1к}$  (при коротком замыкании) и  $U_{1н}$  (при номинальной нагрузке), т. е.  $u_{к\%} = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} \cdot 100\%$ , дает значение на-

пряжения короткого замыкания. Оно обычно составляет  $2 \div 8\%$  от номинального и характеризует падение напряжения на обмотках трансформатора в номинальном режиме.

Ввиду малости напряжения короткого замыкания потери мощности в магнитопроводе  $\Delta P_{\text{в}}$  незначительны и можно считать, что вся мощность расходуется на нагрев обмоток. Т. е. мощность трансформатора при коротком замыкании  $P_{\text{к}}$  равна мощности электрических потерь в его обмотках  $\Delta P_{\text{в}}$ .

Суммарные потери мощности в трансформаторе:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{э}} \approx P_{\text{xx}} + \beta^2 \cdot P_{\text{к}},$$

где  $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{н}}}$  – коэффициент загрузки трансформатора.

Вид графиков зависимостей потерь мощности от нагрузки трансформатора приведен на рисунке 2.

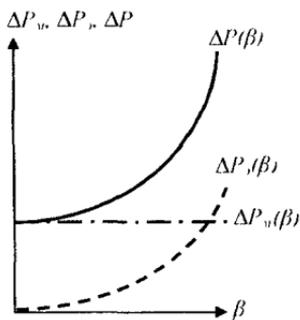


Рисунок 2

К.п.д. трансформатора, равный отношению мощности  $P_2$ , отдаваемой трансформатором в нагрузку, к мощности  $P_1$ , потребляемой им из сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{э}}},$$

где  $P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$ , в частности при активной нагрузке  $\cos \varphi_2 = 1$  (в лабораторной установке в качестве нагрузки используются резисторы) –  $P_2 = U_2 \cdot I_2$ .

Коэффициент мощности трансформатора определяется из соотношения:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}$$

Важными эксплуатационными характеристиками трансформатора являются зависимости вторичного напряжения, к.п.д. и коэффициента мощности от тока вторичной обмотки ( $\eta(I_2)$ ,  $U_2(I_2)$ ,  $\cos \varphi_1(I_2)$ ), снимаемые при неизменных значениях первичного напряжения  $U_1$ , коэффициента мощности нагрузки  $\cos \varphi_2$  и частоты  $f$  сети. Эти характеристики часто строят в виде функций от коэффициента нагрузки  $\beta$  и называют *рабочими*. На рисунке 3 представлен вид этих характеристик при активной нагрузке трансформатора.

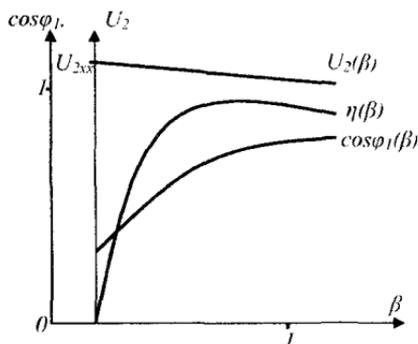


Рисунок 3

Зависимость  $U_2(\beta)$  является линейной и жесткой и называется *внешней характеристикой* трансформатора. Жесткость этой характеристики, т. е. слабая зависимость функции ( $U_2$ ) от аргумента ( $\beta$ ), объясняется тем, что сопротивление обмоток невелико и основной магнитный поток мало зависит от нагрузки. При активной ( $\varphi_2=0$ ) и активно-индуктивной ( $\varphi_2>0$ ) нагрузке характеристики всегда падающие, при активно-емкостной ( $\varphi_2<0$ ) нагрузке могут быть возрастающими. В трансформаторах небольшой мощности активное падение напряжения обычно больше, чем индуктивное, и характеристика при активной нагрузке менее жесткая, чем при активно-индуктивной.

В трансформаторах большой мощности соотношение падений напряжения противоположное, и характеристика при активной нагрузке будет более жесткой.

Из зависимости  $\eta(\beta)$  видно, что на холостом ходу к.п.д. равен нулю, поскольку вторичный ток  $I_{20}$  и отдаваемая нагрузке мощность  $P_{20}$  равны нулю. С ростом  $\beta$  возрастает мощность  $P_2$  при неизменном значении магнитных потерь ( $\Delta P_{\text{в}} = \text{const}$ ) к.п.д. весьма быстро увеличивается. При некотором значении  $\beta_{\text{opt}}$  к.п.д. достигает максимума и затем начинает медленно уменьшаться. Причиной уменьшения к.п.д. является увеличение электрических потерь, изменяющихся пропорционально квадрату тока. Трансформаторы обычно проектируют так, чтобы

оптимальный коэффициент нагрузки, при котором к.п.д. достигает максимума (у мощных трансформаторов  $0,95 \div 0,98$ ), составлял  $\beta_{opt} \approx 0,5 \div 0,7$ . При этом наиболее вероятному диапазону нагрузки трансформатора соответствует к.п.д., близкий к максимальному.

### Последовательность выполнения работы

1. Начертить схему (рис. 4) и ознакомиться с расположением и назначением оборудования лабораторной установки.
2. Записать основные паспортные данные исследуемого однофазного трансформатора.
3. Подготовить лабораторную установку к проведению эксперимента, для чего:
  - движок автотрансформатора (ЛАТРа) установить в крайнее против хода часовой стрелки положение, при котором напряжение на первичной обмотке трансформатора будет равно нулю;
  - контакты SA1 ÷ SA8 привести в разомкнутое состояние;
4. Провести опыт холостого хода, для чего установить с помощью ЛАТРа напряжение на первичной обмотке, равное  $U_{1н}$  и показания приборов записать в таблицу 1.

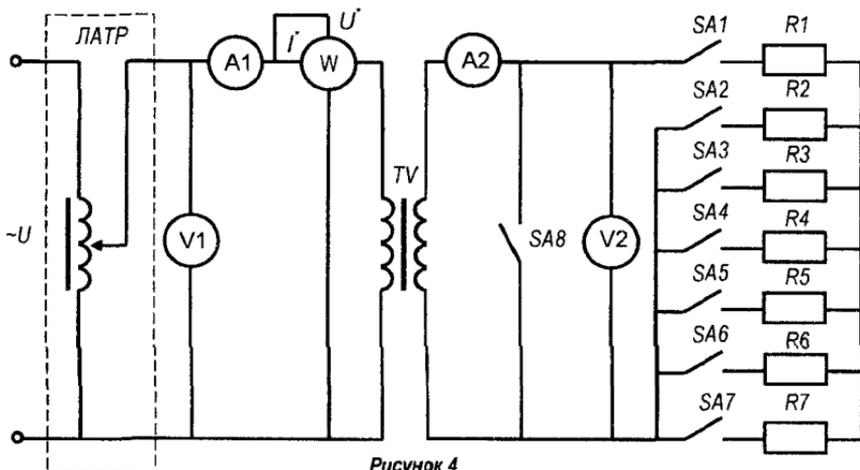


Рисунок 4

Таблица 1

Измерено				Вычислено		
$U_{10}$ , [В]	$U_{20}$ , [В]	$I_{10}$ , [А]	$P_{xx}$ , [Вт]	$k$	$\Delta P_v$ , [Вт]	$\cos \varphi_{10}$

5. Провести испытание трансформатора под нагрузкой, для чего, последовательно увеличивая нагрузку (замыкая контакты SA1 ÷ SA7), снять показания приборов и записать их в таблицу 2. При проведении опыта напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора следует поддерживать (с помощью ЛАТРа) неизменным, равным  $U_{1н}$ .

Таблица 2

Измерено					Вычислено						
$U_1$ , [В]	$I_1$ , [А]	$P_1$ , [Вт]	$U_2$ , [В]	$I_2$ , [А]	$P_2$ , [Вт]	$\eta$	$\cos \varphi_1$	$\beta$	$\Delta U_2$ , [В]	$\Delta P_v$ , [Вт]	$\Delta P_c$ , [Вт]

6. Провести опыт короткого замыкания, для чего:
  - движок ЛАТРа установить в нулевое положение (крайнее против хода часовой стрелки);
  - замкнуть тумблером контакт SA8 (контакты SA1 ÷ SA7 замкнуты);
  - плавно поднять (с помощью ЛАТРа) первичное напряжение, до такого значения  $U_{1к}$ , при котором токи в обмотках трансформатора примут номинальные значения  $I_{1н}$  – в первичной и  $I_{2н}$  – во вторичной соответственно.

**Внимание!** Повышать напряжение следует внимательно и осторожно, так как при завышении напряжения можно вывести из строя измерительные приборы и трансформатор.

- Показания приборов записать в таблицу 3.

Таблица 3

Измерено			Вычислено	
$U_{IK},$ [В]	$I_{IK} = I_{IH}$ [А]	$P_K,$ [Вт]	$\Delta P_{..}$ [Вт]	$\eta, \%$

7. Используя результаты проведенных опытов, рассчитать следующие параметры однофазного трансформатора:

а) по данным холостого хода:

$$k = \frac{U_1}{U_{20}} - \text{коэффициент трансформации};$$

$$\Delta P_{..} = P_0 - \text{мощность потерь в магнитопроводе};$$

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_0}{U_{10} I_{10}} - \text{коэффициент мощности при холостом ходе};$$

б) по данным опыта короткого замыкания:

$$\Delta P_s = P_K - \text{мощность потерь в обмотках при номинальной нагрузке};$$

$$u_{k, \%} = \frac{U_{IK}}{U_{1n}} \cdot 100\% - \text{номинальное напряжение короткого замыкания};$$

в) по данным нагрузочного режима;

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 - \text{мощность, отдаваемую трансформатором в нагрузку};$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} - \text{коэффициент полезного действия трансформатора};$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1} - \text{коэффициент мощности};$$

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 - \text{изменение напряжения при увеличении нагрузки};$$

$$\Delta P_s = P_K \cdot \beta^2 - \text{мощность электрических потерь};$$

$$\Delta P = \Delta P_{..} + \Delta P_s - \text{суммарные потери мощности в трансформаторе}.$$

8. По данным таблицы 2 построить графики зависимостей:

$$U_2 = f(I_2), \eta = f(I_2), \cos \varphi_1 = f(I_2).$$

9. На одной координатной плоскости, по данным таблицы 2, построить графики зависимостей:

$$\Delta P_{..} = f(\beta), \Delta P_s = f(\beta), \Delta P = f(\beta).$$

#### Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Схема лабораторной установки (рис. 4).
3. Основные паспортные данные исследуемого однофазного трансформатора.
4. Результаты измерений и расчетов (табл. 1, 2, 3).

#### Контрольные вопросы

1. Описать устройство и принцип действия трансформатора.
2. Дать классификацию потерь мощности в трансформаторе и привести основные способы их снижения.
3. Как и с какой целью проводят опыт холостого хода трансформатора?
4. Какие параметры определяют по результатам опыта короткого замыкания и как он проводится?
5. Какие зависимости называются рабочими характеристиками трансформатора? Нарисовать графики этих зависимостей.
6. Что такое внешняя характеристика трансформатора и каково её назначение?

**Литература** [1, 2, 3]

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.2

### Тема. Схемы управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

*Цель:* экспериментальное исследование основных схем управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

#### **Основные сведения**

*Электрическим приводом* называется устройство, предназначенное для приведения в движение исполнительного механизма и состоящее из электрического двигателя, аппаратуры управления, защиты и механической передачи, необходимой для осуществления связи двигателя с рабочей машиной.

Наиболее часто в качестве привода в станках и установках применяются трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Эти двигатели просты в устройстве, обслуживании и ремонте. Они удовлетворяют большинству требований к электроприводу станков. Главными недостатками асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором являются большие пусковые токи (в 5-7 раз превышающие номинальный) и невозможность простыми методами плавно изменять скорость вращения двигателей. Однако с появлением и активным внедрением в схемы электроустановок преобразователей частоты такие двигатели начали активно вытеснять другие типы двигателей (асинхронные с фазным ротором и двигатели постоянного тока) из электроприводов, где требовалось ограничивать пусковые токи и плавно регулировать скорость вращения в процессе работы.

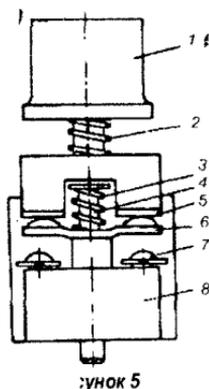
Управление электроприводом производится с помощью аппаратов ручного (неавтоматического) и автоматического управления. К первым, действие которых зависит только от воли оператора, относятся выключатели и переключатели, пусковые и регулирующие реостаты, командоконтролеры, кнопочные и пакетные выключатели и т. д. Ко вторым, управляемым дистанционно или действующим автоматически в зависимости от режима работы электрической цепи или машины, либо от изменения параметров технологического процесса, относятся предохранители, реле защиты (контроля напряжения, минимального и максимального тока и т. д.), контакторы, магнитные пускатели, автоматические выключатели, бесконтактные логические элементы.

Одним из преимуществ использования асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором является простота их включения в сеть. Достаточно подать на статор двигателя трехфазное напряжение – двигатель сразу запускается. В самом простом варианте для включения можно использовать трехфазный пакетный выключатель. Но эти аппараты при своей простоте и надежности являются аппаратами ручного управления. В схемах же станков и установок часто должна быть предусмотрена работа того или иного двигателя в автоматическом цикле, обеспечиваться очередность включения нескольких двигателей, автоматическое изменение направления вращения ротора двигателя (реверс) и т. д. Обеспечить все эти функции с аппаратами ручного управления невозможно.

Наибольшее распространение в схемах управления электроприводом получили аппараты дистанционного или автоматического управления, представляющие собой электромагнитные устройства, подвижные контакты которых замыкаются под действием силы тяги электромагнита. Автоматическое управление трехфазными асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором обычно осуществляется с помощью контакторов (или магнитных пускателей) и кнопки управления.

*Кнопки управления* — аппараты, подвижные контакты которых перемещаются и срабатывают при нажатии на толкатель кнопки. Комплект кнопок, смонтированных на общей панели (или в блоке), представляет собой *кнопочную станцию*.

Кнопочный элемент (кнопка) может иметь размыкающие, замыкающие или те и другие контакты. На рисунке 5 представлена кнопка с одним замыкающим 7 и одним размыкающим 5 контактами с общим мостиковым контактом 6. При нажатии на головку 1 мостиковый контакт, связанный с ней через стержень 7 и контактную пружину 3, размыкает одну цепь и замыкает другую. При снятии нажатия подвижная часть (головка со стержнем и мостиковым контактом) возвращается в исходное положение под действием возвратной пружины 2. Все детали элемента монтируются на пластмассовой колодке 8.

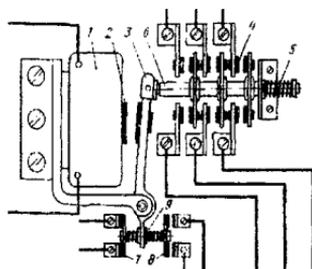


Все используемые в схемах автоматики кнопки управления различают по числу и типу контактов (от 1 до 4 замыкающих и размыкающих), форме толкателя (цилиндрический, прямоугольный и грибовидный), надписям и цветам толкателей, а также по способу защиты от воздействия окружающей среды (открытые, закрытые, герметичные, взрывобезопасные и т. д.).

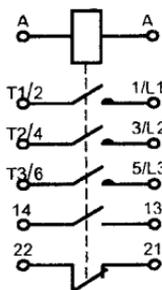
**Контактор** – двухпозиционный аппарат с самовозвратом, предназначенный для частых коммутаций токов, не превышающих токи перегрузки, и приводимый в действие двигателем (ГОСТ 17703-72).

Контактор типа ПМЛ (рис. 6, а) состоит из следующих основных частей:

- Электромагнитная часть. Это тяговый электромагнит, состоящий из отдельных пластинчатых ферромагнитных блоков – подвижного якоря 3 и неподвижного сердечника 2 и расположенной на нем катушки (обмотки) 1;



а)



б)

подвижного якоря 3 и неподвижного сердечника 2 и расположенной на нем катушки (обмотки) 1;

- Система контактов. Подвижные контакты расположены на траверсе 6 механически связанной с якорем. Неподвижные – жестко закреплены на корпусе контактора.

- Система возврата. В большинстве случаев представляет собой пружину 5, которая возвращает якорь и связанную с ним траверсу в исходное положение после размыкания цепи питания обмотки, что приводит контактную группу в нормальное (исходное – при отсутствии в катушке тока) состояние.

Контакты контакторов на схемах изображают в нормальном состоянии (рис. 6, б).

**Электромагнитный пускатель** – более сложное, чем контактор, устройство, которое используется в основном для управления электрическими двигателями и может комплектоваться следующими устройствами:

- Одним или двумя контакторами. Пускатель в состав которого входит один контактор, позволяет управлять двигателем, ротор которого вращается в одном направлении. Наличие двух контакторов позволяет, во-первых - реверсировать (изменять направление вращения ротора) двигатель, во-вторых – ускоренно останавливать двигатель путем торможения противовключением и в-третьих – с целью снижения пусковых токов, осуществлять пуск двигателя переключением соединения его статорных обмоток со «звезды» на «треугольник»;

- Дополнительные устройства. Пускатель, как правило, комплектуется тепловыми реле или реле перегрузки для защиты силовой установки от перегрузок и неполнофазного режима, двух-, или трехкнопочной станцией, реле выдержки времени, системой сигнализации и др.

Все элементы магнитного пускателя размещают в общем корпусе, который к тому же защищает его от внешних факторов (влаги, пыли и т. п.).

Работа контактора (пускателя) протекает удовлетворительно при напряжении на зажимах его катушки  $U = (0,85 \div 1,1)U_n$ . При подаче на катушку 1 (рис. 6, а) напряжения питания, протекающий по ее виткам ток создает магнитное поле, притягивающее к сердечнику 2 якорь 3. При этом траверса 6, механически связанная с якорем 3, приводит контактную группу в рабочее состояние (контактор срабатывает).

Контакты 4 и 8, осуществляющие замыкание коммутируемых цепей при срабатывании контактора, называются *замыкающими*, контакты 7, осуществляющие размыкание коммутируемых цепей при срабатывании контактора, *размыкающими*.

Контакты 4, используемые для коммутации силовоточной силовой цепи, называют *главными*. Помимо главных контактов, контакторы могут иметь дополнительные маломощные (по своим размерам значительно уступающие главным) *блок-контакты* 7 и 8, которые используются для самоблокировки, включения удерживающих обмоток и коммутации дополнительных цепей (например, сигнализации). Контакты могут выполняться рычажного или мостикового типа. Рычажные контакты предполагают поворотную подвижную систему, мостиковые – прямоходовую, как на рисунке 4.

Длительное повышение напряжения свыше  $1,1U_n$  нежелательно из-за опасного перегрева катушки. Снижение напряжения ниже  $0,85U_n$  нежелательно, т. к. оно уменьшает силу, удерживающую якорь, что при некотором значении напряжения приводит к отрыву якоря от полюсов магнитопровода и размыканию силовой цепи. Автоматическое выключение контактора при значительном снижении или полном исчезновении напряжения в питающей сети обеспечивает защиту по минимальному напряжению.

При разрыве цепи катушки подвижная система контактора под действием силы упругости пружины 5 возвращается в исходное положение, а все контакты – в прежнее коммутационное состояние.

Протекание тока по обмоткам двигателя, больше чем номинальный (перегрузка двигателя), приводит к дополнительному старению изоляции. Каждые дополнительные  $8^\circ\text{C}$  сверх номинальной температуры нагрева в 2 раза ускоряют физические и химические процессы старения изоляции. Поэтому, чем больше перегрузка, тем менее кратковременной она должна быть. Для защиты двигателя от недопустимого перегрева, вызванного длительной перегрузкой  $(1,2 \div 1,3)I_n$ , применяются тепловые реле.

На рисунках 7, 8 и 9 представлены типовые элементные (развернутые) электрические схемы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Элементные (развернутые) схемы содержат все элементы, входящие в схему управления: катушки, контакты, обмотки аппаратов и т. д. Элементы на схеме располагаются в соответствии с их включением в электрические цепи независимо от кинетической и конструктивной связи. Это необходимо для облегчения понимания схемы. Элементы одного и того же аппарата в таких схемах обозначают одинаково в нескольких цепях, например, в схемах на рисунках 7 и 8 катушка контактора и управляемые ею контакты обозначены *KM1*.

На рисунке 7 представлена простейшая схема управления двигателем в толчковом режиме, применяемом в основном при наладочных пусках (определения направления вращения, получения малого перемещения и т. п.) электропривода. В данной схеме при нажатии кнопки *SB1* замыкается цепь питания катушки контактора *KM1* и на нее подается напряже-

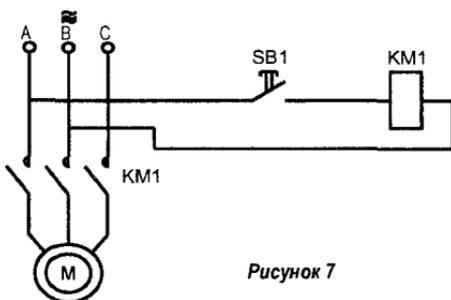


Рисунок 7

ние. Контакттор  $KM1$  срабатывает и замыкает свои главные контакты  $KM1$ , подключая обмотки статора электродвигателя  $M$  к сети. Двигатель запускается и продолжает работать, пока замкнут кнопочный контакт  $SB1$  (кнопка удерживается в нажатом положении). При отпускании кнопки  $SB1$  происходит размыкание цепи катушки контактора  $KM1$ , что приводит к его отключению – размыканию главных контактов  $KM1$  и, как следствие, – выключение электродвигателя  $M$ .

Приведенная на рисунке 8 схема отличается от предыдущей наличием размыкающего кнопочного контакта  $SB3$ , включенного последовательно в цепь питания катушки контактора  $KM1$  и замыкающего блок - контакта  $KM1$ , включенного параллельно кнопочному замыкающему контакту  $SB1$ . В этой схеме двигатель включается аналогично – нажатием кнопки  $SB1$ , но продолжает работать после ее отпускания, благодаря шунтированию разомкнутого контакта  $SB1$  блок – контактом  $KM1$ , замыкающимся при срабатывании контактора. Таким образом, блок – контакт контактора  $KM1$

обеспечивает питание катушки контактора, блокируя замыкающий кнопочный контакт  $SB1$ . Для остановки двигателя необходимо нажать кнопку  $SB3$ , контакт которой разомкнет цепь питания катушки контактора – контактор выключится и разомкнувшимися главными контактами отключит двигатель от сети. Рассматриваемая схема (рис.8) применяется для управления электроприводами механизмов, не требующих в процессе работы изменения направления движения (насосы, вентиляторы и т. п.).

В цикле своей работы многие механизмы (и их электроприводы), должны изменять направление своего движения (обычно на противоположное – реверсное). Это вызвано технологическими процессами и в некоторых случаях необходимостью проведения иных действий системы (аварийный реверс). Например, подъемная машина – после поднятия груза: подъемник должен опуститься, чтобы забрать очередной груз. Аварийный реверс может быть применен в металлообрабатывающих станках, при заклинивании (или перекосе) заготовки (или режущего инструмента), при обработке металла.

Известно, что для изменения направления вращения ротора асинхронного двигателя необходимо поменять местами два любых

линейных провода, соединяющих трехфазную сеть с обмотками статора. При таком переключении порядок чередования токов в фазных обмотках машины изменяется на обратный, что вызывает изменение направления вращения магнитного поля статора и, как следствие, направления вращения ротора.

В схеме (рис. 9) для реверсирования двигателя применяются: кнопочная станция с тремя контактами (замыкающими –  $SB1$ ,  $SB2$  и размыкающим –  $SB3$ ); два контактора  $KM1$  (прямого хода) и  $KM2$  (обрат-

ного хода). Главные контакты контакторов включены таким образом, что позволяют изменять порядок подключения линейных проводов к фазным обмоткам двигателя. При нажатии кнопки  $SB1$

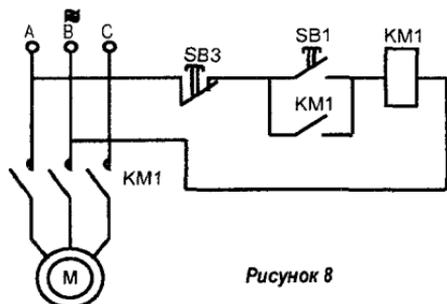


Рисунок 8

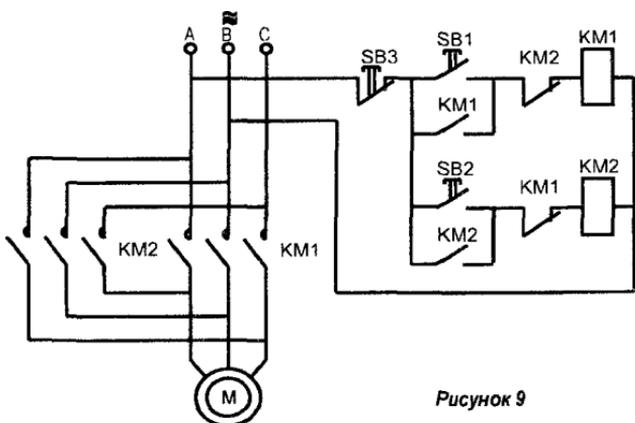


Рисунок 9

включается контактор *KM1*, подключая своими главными контактами первую обмотку к линии *A*, вторую – к линии *B*, третью – к линии *C* (ротор двигателя *M* будет вращаться в «прямом» направлении). Для реверсирования необходимо предварительно остановить двигатель нажатием кнопки *SB3* и затем нажать кнопку *SB2*. При этом срабатывает контактор *KM2*, подключая своими главными контактами первую обмотку к линии *C*, вторую – к линии *B*, третью – к линии *A* (ротор двигателя *M* будет вращаться в "обратном" направлении). Размыкающий блок – контакт *KM1* в цепи катушки контактора *KM2* и размыкающий блок – контакт *KM2* в цепи катушки контактора *KM1* осуществляют взаимную блокировку контакторов, т. е. исключают возможность одновременной работы контакторов *KM1* и *KM2*. При отсутствии подобной блокировки контакторы *KM1* и *KM2* могут быть включены независимо друг от друга, что приведет к короткому замыканию двух фаз сети главными контактами контакторов.

#### **Последовательность выполнения работы**

1. Ознакомиться с расположением и устройством оборудования лабораторной установки.
2. Вычертить схемы (рис. 7, 8, 9), приведенные в работе. Дать краткое описание работы каждой схемы с указанием цепей прохождения тока и объяснить назначение каждого элемента схемы.
3. Собрать схему (рис. 7) и убедиться, что двигатель работает в толчковом режиме (его ротор вращается только при нажатой кнопке *SB1*).
4. Собрать схему (рис. 8) проверить ее работу, осуществив несколько пусков и остановок двигателя с помощью кнопок управления и убедиться в действии блокировки кнопочного контакта *SB1* (что необходимость в удерживании кнопки *SB1* в нажатом состоянии отпадает).
5. Собрать схему (рис. 9) и проверить ее работу путем пуска, остановки и реверсирования двигателя. Одновременно нажав кнопки *SB1* и *SB2*, убедиться в действии взаимной блокировки контакторов (не возможности одновременной работы контакторов *KM1* и *KM2*).

#### **Содержание отчёта**

1. Цель работы.
2. Схемы управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (рис. 7, 8, 9).
3. Краткое описание работы каждой схемы с указанием цепей прохождения тока и объяснением назначения каждого элемента схемы.

#### **Контрольные вопросы**

1. Дать определение и привести примеры аппаратов ручного (неавтоматического) и автоматического управления.
2. Объяснить назначение, устройство и принцип действия кнопки управления.
3. Объяснить назначение, устройство и принцип действия контактора.
4. В чем заключается отличие контактора от магнитного пускателя?
5. Что является причиной изменения направления вращения ротора асинхронного двигателя?
6. Как практически осуществляется реверсирование асинхронного двигателя?
7. Объяснить принцип действия схемы (рис. 9) с указанием цепей прохождения тока.
8. Привести примеры технологического оборудования (производственных механизмов), приводом которых служит двигатель с рассмотренными схемами управления.

#### **Литература [1, 2, 3]**

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.3

### Тема **Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.**

**Цель:** экспериментальное исследование режимов работы трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и построение его рабочих характеристик.

#### **Основные сведения**

Асинхронный двигатель (АД) преобразует электрическую энергию переменного тока в механическую энергию, отдаваемую на вал и используемую для привода исполнительных органов рабочей машины или производственного механизма. Благодаря простоте конструкции, удобству эксплуатации и надежности асинхронный двигатель основного исполнения (с короткозамкнутым ротором) является самым распространенным двигателем, используемым в большинстве электроприводов.

Основными частями АД являются неподвижный статор и вращающийся ротор, разделенные воздушным зазором.

Магнитопрод статора трехфазного АД представляет собой полый цилиндр, в виде пакета тонких пластин электротехнической стали (рис. 10), изолированных друг от друга для уменьшения потерь на вихревые токи. На внутренней стороне цилиндра выполнены (по образующим) пазы, в которые укладывается многовитковая трехфазная обмотка. Каждая фаза обмотки занимает 1/3 пазов статора. Таким образом, фазные обмотки статора смещены в пространстве под углом  $120^\circ$  друг относительно друга. Концы фазных обмоток соединяются звездой или треугольником и подключаются к трехфазной сети. Магнитопрод с обмотками закреплен в литом алюминиевом, чугуном или сварном стальном корпусе. К боковым сторонам корпуса крепятся подшипниковые щиты с подшипниками, в которых устанавливается ротор.

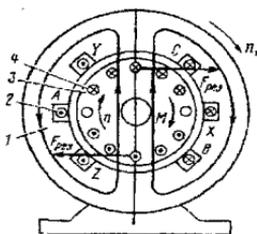
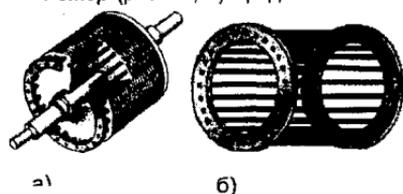


рис 10

Ротор (рис. 11, а) представляет собой цилиндрический сердечник из изолированных листов электротехнической стали с пазами на наружной поверхности, в которых размещаются проводники обмотки ротора. Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется в виде беличьей клетки (рис. 11, б) – цилиндрической клетки из медных или алюминиевых стержней, которые без изоляции закладываются в пазы ротора. Торцовые концы стержней замыкают накоротко с обеих сторон ротора кольцами. Для машин до 100 кВт наиболее широко применяется литая алюминиевая обмотка с углубленными пазами, для более мощных машин может применяться двойная «беличья клетка».

Схема, иллюстрирующая работу трехфазного двухполюсного АД представлена на рисунке 12. При включении статорной обмотки в трехфазную сеть, протекающий в ее проводниках 2 синусоидальный ток создает пронизывающее сердечник статора 1, ротор 3 и воздушный зазор магнитное поле, вращающееся с синхронной скоростью  $n_1$ , прямо пропорциональной частоте  $f_1$  тока статора и обратно пропорциональной числу  $p$  пар полюсов поля двигателя, т. е.

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$



рисунки 11 и 12

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники ротора 4 и наводит в них э.д.с., под действием которой в короткозамкнутой обмотке ротора возникает ток. На проводники роторной обмотки с током, расположенные в магнитном поле, действуют электромагнитные силы, направление которых определяется правилом левой руки. Суммарная сила  $F_{\text{рез}}$ , приложенная ко всем проводникам ротора, образует электромагнитный пусковой момент  $M_n$ , начинающий увлекать ротор за вращающимся магнитным полем. Под действием пускового момента ротор начинает вращаться с частотой  $n_2$ :

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s),$$

где  $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$  — величина, характеризующая разность частот вращения магнитного поля и ротора,

называемая *скольжением*. Таким образом, необходимым условием для возникновения в асинхронной машине электромагнитного вращающего момента является неравенство частот вращения  $n_1$  и  $n_2$ . По этой причине машина называется асинхронной (ротор ее вращается не синхронно с полем).

В момент запуска двигателя  $s = 1$ , а частота э.д.с. и тока в обмотке ротора равна частоте напряжения питающей сети  $f_1$ . По мере разгона ротора скольжение, а также частота э.д.с. и тока в обмотке ротора  $f_2 = f_1 \cdot s$  снижаются. При номинальной нагрузке на валу номинальная величина скольжения составляет 0,02 - 0,06 (в зависимости от типа двигателя), ротор вращается с частотой  $n_{2N}$  и двигатель развивает номинальную мощность  $P_{2N}$ . Вращающий момент

при номинальной нагрузке равен:  $M_N = 9550 \cdot \frac{P_{2N}}{n_{2N}}$ .

Зависимость момента на валу двигателя от скольжения  $M(s)$ , являющаяся *механической характеристикой* асинхронного двигателя, выражается громоздкой и неудобной для анализа функцией. На практике для построения механической характеристики обычно используют при-

ближенную формулу: 
$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$$

где  $s_K = s_n \cdot (k_M + \sqrt{k_M^2 - 1})$  — критическое значение скольжения, соответствующее максимальному (критическому) значению момента  $M_K = M_{\text{max}}$ . Отношение  $\frac{M_K}{M_n} = k_M$  называется *кратностью максимального момента*. Она характеризует перегрузочную способность асинхронного двигателя.

Примерный вид механической характеристики показан на рисунке 13. Участок ОН, на котором зависимость  $M(s)$  практически линейна, является рабочим. На этом участке механической характеристики асинхронный двигатель может работать длительно, не перегреваясь выше допустимой температуры.

Участок НК соответствует механической перегрузке двигателя. На данном участке двигатель может работать кратковременно, после чего нагрузка должна быть снижена.

Участок ОК характеристики — участок статически устойчивой работы двигателя, при которой он может автоматически компенсировать увеличение нагрузки на валу. Т. е. при возрастании по какой-либо причине момента сопротивления  $M_c$  последует переходный процесс, в ходе которого частота вращения ротора уменьшится, скольжение увеличится, а вращающий момент  $M$  возрастет. Вследствие этого двигатель выйдет на новый установившийся режим, характеризующийся более низкой частотой вращения  $n_2' < n_2$  и равенством моментов  $M = M_c$ .

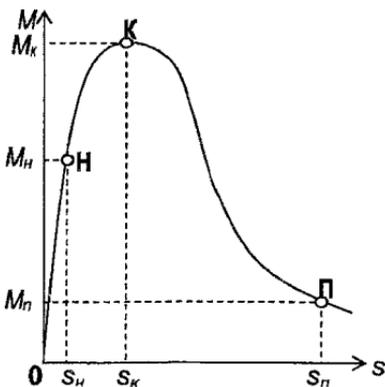


Рисунок 13

Участок КП соответствует неустойчивой работе двигателя. По данному участку изменяется момент и частота вращения при пуске. Если по какой-либо причине  $M_c$  станет больше  $M_K$ , двигатель перейдет в так называемый режим опрокидывания. При этом момент и частота вращения также изменяются по участку КП характеристики, но в сторону уменьшения, вплоть до полной остановки двигателя.

Точка П характеристики, имеющая координаты ( $M = M_n; s_n = 1$ ), соответствует режиму пуска двигателя. Величина  $k_n = \frac{M_n}{M_n}$ , называемая кратностью пускового момента, характеризует его пусковую способность.

Точка О характеристики соответствует режиму холостого хода, при котором момент сопротивления очень мал (определяется только трением в опорах). Поэтому скольжение составляет тысячные доли и частота вращения ротора близка к синхронной.

При расчете приводов иногда удобнее использовать механическую характеристику в виде зависимости  $n_2(M)$ .

Эксплуатационные свойства АД определяются его рабочими характеристиками (рис. 14):  $n_2 = f(P_2)$ ,  $M_2 = f(P_2)$ ,  $\eta = f(P_2)$ ,  $I_1 = f(P_2)$  и  $\cos \varphi_1 = f(P_2)$  при  $U_1 = U_{1н} = const$  и  $f_1 = f_{1н} = const$ , где  $P_2$  - полезная мощность на валу двигателя.

В экспериментальной установке, электрическая схема которой приведена на рисунке 15, двигатель  $M$  приводит во вращение трехфазный синхронный генератор  $G$  с мостовым выпрямителем на полупроводниковых диодах, работающий на нагрузку  $R_n$ .

Мощность  $P_2$ , передаваемая от двигателя на вал генератора, равна:

$$P_2 = \frac{U_{ген} \cdot I_{ген}}{\eta_{ген}}$$

где  $U_{ген}$  - напряжение генератора;  $I_{ген}$  - ток генератора;  $\eta_{ген}$  - к.п.д. генератора.

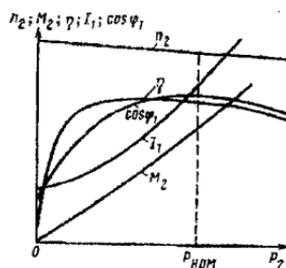


Рисунок 14

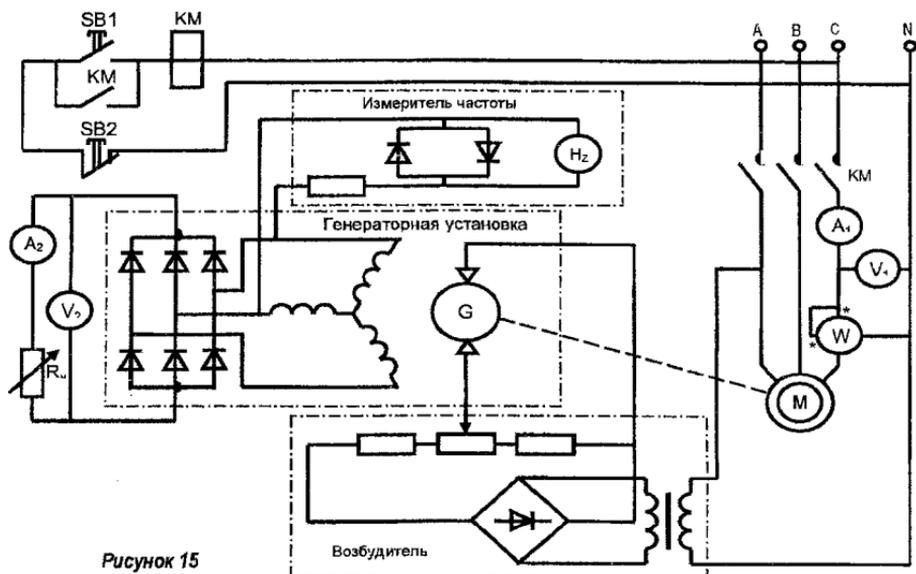


Рисунок 15

## Последовательность выполнения работы

1. Начертить схему (рис. 15) и ознакомиться с расположением и устройством оборудования лабораторной установки.

2. Записать основные паспортные данные исследуемого асинхронного двигателя, указанные в шильде (металлической информационной пластине), закрепленной на его корпусе:

- Тип двигателя;
- Номинальная мощность (механическая мощность на валу)  $P_n$  [кВт];
- Номинальное напряжение (линейное напряжение обмотки статора)  $U_n$  [В]. Обычно в виде дроби указываются два напряжения, отличающиеся друг от друга в  $\sqrt{3}$  раз. При большем напряжении сети трехфазная обмотка статора соединяется в звезду (Y), а при меньшем – в треугольник ( $\Delta$ );
- Номинальный (линейный) ток статора  $I_n$  [А]. Его значение указывают в виде дроби соответственно при соединении обмоток в звезду и в треугольник;
- Частота питающей сети  $f_1$  [Гц]. Промышленная частота на территории СНГ составляет 50 Гц;
- Номинальная частота вращения ротора  $n_n$  [об/мин];
- Номинальный коэффициент мощности  $\cos \varphi_n$ ;
- Номинальный к.п.д.  $\eta_n$ , указанный в относительных единицах или процентах.

3. Рассчитать синхронную скорость исследуемого двигателя  $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ ,

где  $f_1 = 50$  Гц, частота питающей сети;

$p$  – число пар полюсов, определяется по последней цифре в обозначении типа двигателя, которая дает число полюсов поля статора.

4. Снять рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, для чего:

- при отключенной нагрузке генератора (ручка регулятора нагрузки  $R_n$  – в крайнем против хода часовой стрелки положении) нажатием кнопки  $SB1$  запустить двигатель  $M$  на холостом ходу. Снять и записать в таблицу 4 показания приборов:

– вольтметра  $pV_1$  – фазное напряжение сети  $U_I$ ;

– амперметра  $pA_1$  – линейный (он же фазный) ток сети  $I_I$ ;

– ваттметра  $pW$  – фазная мощность  $P_\phi$ , потребляемая двигателем из сети;

– вольтметра  $pV_2$  – напряжение на выходе генератора  $U_{ген}$ ;

– амперметра  $pA_2$  – ток в цепи нагрузки генератора  $I_{ген}$ ;

– частотомера  $pHz$  – частота вращения ротора двигателя  $n_2$ .

Таблица 4

№ $n/n$	Измерено						Вычислено					
	$U_I$ [В]	$I_I$ [А]	$P_\phi$ [Вт]	$U_{ген}$ [В]	$I_{ген}$ [А]	$n_2$ [об/мин]	$P_1$ [Вт]	$P_2$ [Вт]	$M$ [Н·м]	$\eta_{дв}$	$\cos \varphi$	$\eta_{ген}$

- Постепенно увеличивая нагрузку генератора, сделать измерения для 12 режимов нагрузки двигателя. Показания приборов занести в таблицу 4.

5. Используя данные измерений (табл.4), вычислить величины, характеризующие режим работы двигателя по расчетным формулам:

– потребляемая активная мощность двигателя:  $P_1 = 3P_\phi$ ;

– мощность на валу двигателя:  $P_2 = \frac{U_{ген} I_{ген}}{\eta_{ген}}$ . Значение к.п.д. генератора определить по кривой  $\eta_{ген} = f(I_{ген})$ , приведенной на рисунке 16;

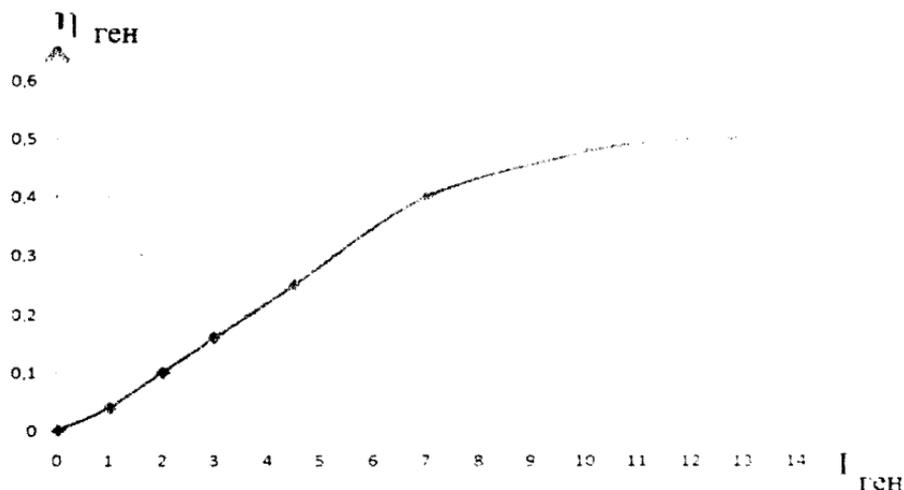


Рисунок 16

- момент на валу двигателя:  $M = \frac{P_2}{n_2}$ ;

- к.п.д. двигателя:  $\eta_{от} = 9,55 \cdot \frac{P_2}{P_1}$ ;

- коэффициент мощности:  $\cos \varphi = \frac{P_1}{3 \cdot U_1 \cdot I_1}$ .

6. На одной координатной плоскости по данным таблицы 4 построить рабочие характеристики исследуемого двигателя:  $M = f(P_2)$ ,  $\eta_{от} = f(P_2)$ ,  $\cos \varphi = f(P_2)$ ,  $n = f(P_2)$ .

### Содержание отчёта

1. Схема лабораторной установки (рис.15).
2. Основные паспортные данные исследуемого асинхронного двигателя.
1. Результаты измерений и расчетов (табл.4).
2. Графики рабочих характеристик двигателя.

### Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип действия работы асинхронного двигателя?
2. Какова конструкция асинхронного двигателя?
3. Как определяются синхронная скорость, скольжение и момент двигателя?
4. От чего зависит коэффициент мощности асинхронного двигателя и как его определить?
5. Какой вид имеют рабочие характеристики асинхронного двигателя?
6. Где используются асинхронные двигатели?
7. Что такое скольжение и как изменяется его значение при изменении нагрузки?

Литература [1, 2, 3]

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.4

### Тема. Схемы торможения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

**Цель:** экспериментальное исследование основных схем торможения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

#### **Основные сведения**

После отключения от сети электродвигатель продолжает движение по инерции. При этом кинетическая энергия расходуется на преодоление всех видов сопротивлений движению. Поэтому скорость электродвигателя через промежуток времени, в течение которого будет израсходована вся кинетическая энергия, становится равной нулю. Такая остановка электродвигателя при движении по инерции называется *естественным* торможением или *свободным выбегом*. Многие электродвигатели, работающие в продолжительном режиме или со значительными нагрузками, останавливают путем свободного выбега.

В тех же случаях, когда продолжительность свободного выбега значительна и оказывает влияние на производительность приводного механизма, для сокращения времени остановки применяют искусственный метод преобразования кинетической энергии, запасенной в движущейся системе, называемый *торможением*.

Все способы торможения электродвигателей можно разделить на два основных вида: механические и электрические. При механическом торможении кинетическая энергия преобразуется в тепловую, за счет которой происходит нагрев трущихся и прилегающих к ним частей механического тормоза. При электрическом торможении кинетическая энергия преобразуется в электрическую и в зависимости от способа торможения двигателя либо отдается в сеть, либо преобразуется в тепловую энергию, идущую на нагрев обмоток двигателя и реостатов. Таким образом, механические напряжения в элементах электропривода при электрическом торможении незначительны.

Для быстрой остановки (уменьшения частоты вращения) электродвигателей применяются следующие основные способы электрического торможения: рекуперативное, торможение противовключением и динамическое торможение.

*Рекуперативное торможение* – вид электрического торможения, при котором электроэнергия, вырабатываемая тяговыми электродвигателями, работающими в генераторном режиме, возвращается в электрическую сеть. Двигатель перейдет в режим генераторного рекуперативного торможения при условии, если под действием внешних сил (или по инерции) его ротор начнет вращаться в направлении вращения поля статора со скоростью большей скорости поля. Рекуперативное торможение асинхронного двигателя осуществляется переключением с большой скорости на меньшую путем изменения числа пар полюсов или уменьшением частоты питающего тока. Рекуперативное торможение широко применяется на электротранспорте (электровозах, трамваях, троллейбусах и т. п.), где при торможении тяговые электродвигатели начинают работать в генераторном режиме, вырабатывая электроэнергию и передавая ее в общую энергосистему через тяговые подстанции. Аналогичный принцип используется в автомобилях, где вырабатываемая при торможении электроэнергия, используется для подзарядки аккумуляторов. Торможение с рекуперацией используют в некоторых грузоподъемных механизмах при спуске грузов. Рекуперативное торможение является наиболее экономичным видом торможения.

*Динамическое торможение* – вид торможения, применяемый для быстрой остановки асинхронных электродвигателей в составе нереверсивных приводов, при котором обмотка статора отключается от сети трехфазного переменного тока и включается на пониженное напряжение постоянного тока по одной из схем, представленных на рисунке 17.

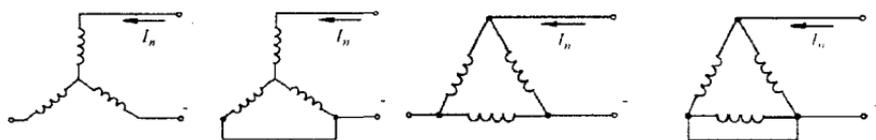


Рисунок 17

Во время этого торможения постоянный ток, протекая по обмотке статора, создает неподвижное в пространстве магнитное поле с синусоидальным распределением индукции по расточке статора. Если ротор по инерции или под действием активного статического момента вращается в магнитном поле статора, то в обмотке ротора наводится э.д.с., которая в замкнутой обмотке ротора создает ток. Взаимодействие тока ротора с магнитным полем статора создает тормозящий электромагнитный момент. При этом ток ротора будет зависеть от сопротивления в цепи ротора (если таковое имеется). Кинетическая энергия вращающихся частей переходит в теплоту, выделяющуюся в цепи ротора за счет токов, индуцированных в ней неподвижным полем статора. Изменяя величину подведенного к обмотке статора напряжения либо сопротивление в цепи ротора, можно регулировать величину тормозного момента.

Основными достоинствами этого тормозного режима являются возможность регулировать момент торможения и возможность точной остановки. Кроме этого данный режим позволяет поддерживать постоянную скорость вращения при приложенной внешней нагрузке. Постоянное напряжение можно подводить к обмотке статора только на время торможения. После остановки двигатель необходимо отключить от источника постоянного тока.

Данный вид торможения применяется, например, в подъемно-транспортных машинах, в циркулярных пилах, в конвейерах для безопасной остановки механизмов при отключении электродвигателей и т. д.

*Торможение противовключением* – электрическое торможение противотоком путём изменения направления момента, развиваемого электродвигателем, на противоположное направлению вращения за счёт смены полярности напряжения, подводимого к обмотке вращающегося якоря (для двигателей постоянного тока), либо переключением двух фаз обмотки статора (для двигателей переменного тока).

Режим противовключения возникает, когда ротор двигателя под действием внешних сил или по инерции, начинает вращаться в направлении противоположном вращению поля статора. Этот режим используется для экстренных остановок двигателя в реверсируемых электроприводах, а также обеспечения посадочной скорости при опускании тяжелых грузов. Практически режим противовключения получают изменением порядка следования фаз сети в обмотке статора. Изменение следования фаз осуществляется переключением двух любых линейных проводов, подведенных к статору двигателя. При этом магнитное поле статора начнет вращаться в сторону, противоположную направлению вращения ротора, который будет интенсивно затормаживаться. При снижении скорости ротора до нуля статорную обмотку необходимо отключить от сети, иначе двигатель может вновь перейти в двигательный режим в обратном направлении. В режиме противовключения двигатель преобразует кинетическую энергию движущихся по инерции масс в электрическую энергию, которая в виде тепла выделяется в цепи ротора.

Торможение противовключением является простым и достаточно надежным тормозным режимом, но отличается неэкономичностью из-за больших потерь энергии. К тому же в момент переключения происходит динамический удар, при котором механическая часть двигателя испытывает большие перегрузки. Это приводит к разрушению подшипников, изгибу вала и т. д.



Таблица 5

Режим торможения	Время выбега двигателя, с		
	1	2	3
Естественное торможение			

4. Исследовать режим динамического торможения двигателя, для чего:

- собрать схему (рис. 19);
- установить секундомер *PT* на нуль;
- тумблер *SA* поставить в положение 1;
- запустить двигатель *M*, нажатием кнопки *SB1*;
- после разгона двигателя до установившейся скорости последовательным нажатием кнопки *SB3* отключить двигатель от сети, а затем нажатием кнопки *SB2* включить секундомер *PT* и подключить обмотку статора к источнику постоянного тока;
- в момент остановки двигателя нажать кнопку *SB3*;
- записать в таблицу 6 время выбега двигателя (показания секундомера *PT*), значение переменного напряжения на входе выпрямителя *B* (показания вольтметра *V*) и постоянного тока в обмотке статора (показания амперметра *A*);
- повторить опыт 3 раза;
- повторить опыт при другом значении вторичного напряжения трансформатора *TV*, поставив тумблер *SA* в положение 2.

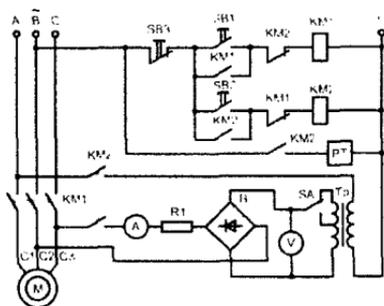


Рисунок 19

Таблица 6

Режим торможения	Положение переключателя <i>SA</i>	<i>U</i> , В	<i>I</i> , А	Время выбега двигателя, с		
				1	2	3
Динамическое торможение	1					
	2					

5. Исследовать режим торможения двигателя противовключением, для чего:

- собрать схему (рис. 20);
- установить секундомер *PT* на нуль;
- запустить двигатель *M*, нажатием кнопки *SB1*;
- после разгона двигателя до установившейся скорости сначала нажать кнопку *SB3* (двигатель *M* отключится от сети), а затем нажать кнопку *SB2* (одновременно включатся торможение двигателя *M* и секундомер *PT*);
- в момент остановки двигателя нажать кнопку *SB3* и измерить время выбега двигателя;
- данные занести в таблицу 7;
- повторить опыт 3 раза.

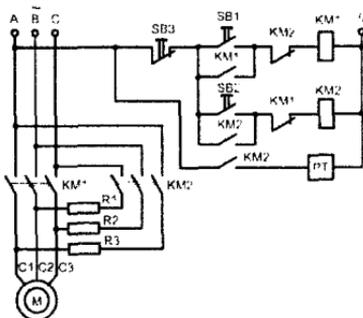


Рисунок 20

Таблица 7

Режим торможения	Время выбега двигателя, с		
	1	2	3
Торможение противовключением			

## Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Схемы торможения трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (рис.18, 19, 20).
3. Результаты измерений (табл.5, 6, 7).

## Контрольные вопросы

1. Что такое свободный выбег двигателя?
2. В чем суть рекуперативного торможения?
3. Как осуществляется динамическое торможение двигателя?
4. Как регулируется интенсивность торможения асинхронного двигателя при динамическом торможении?
5. Как осуществляется торможение противовключением?
6. Привести примеры практического применения и дать сравнительный анализ способов торможения.

**Литература** [1, 2, 3]

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.5

### Тема. Защита трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором от неполнофазного режима.

**Цель:** экспериментальное исследование схемы защиты трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором от неполнофазного режима и кратковременных перегрузок.

#### Основные сведения

В процессе работы электроприводов могут возникнуть различные аварийные режимы, вызывающие перегрев обмоток статора электродвигателя, который приводит к ускорению старения изоляции и, как следствие, к выходу двигателя из строя. Такие режимы могут вызвать:

- многофазные и однофазные замыкания в обмотках электродвигателя, коробке выводов и внешней силовой цепи;
- короткие замыкания в цепи управления;
- тяжелые условия пуска (большая нагрузка, понижение напряжения сети);
- нарушение режима работы (в том числе и заклинивание вала);
- обрыв фазы во внешней силовой цепи или обмотке статора;
- нарушение условий охлаждения (повреждение вентилятора, засорение и т. д.).

Анализ статистических данных повреждаемости асинхронных электродвигателей показывает следующее распределение причин выхода их из строя:

- неполнофазный режим (обрыв фазы) –  $40 \div 50\%$ ;
- затормаживание (заклинивание) ротора –  $20 \div 25\%$ ;
- технологические перегрузки –  $8 \div 10\%$ ;
- нарушение охлаждения –  $8 \div 10\%$ ;
- прочие –  $8 \div 10\%$ .

Устройства защиты электродвигателей от аварийных режимов можно разделить на следующие три группы:

– *Первая группа* – специальные устройства, которые реагируют на отдельный специально контролируемый аварийный режим. Это устройства, отключающие двигатель, например, при неполнофазном и несимметричном напряжении сети, при затормаживании ротора или при недопустимом снижении сопротивления изоляции;

– *Вторая группа* – универсальные устройства, которые реагируют на несколько аварийных режимов, контролируя один параметр двигателя. Это тепловые реле, устройства температурной защиты, фазочувствительные устройства типа и др.;

– *Третья группа* – комплектные устройства, которые реагируют на все основные аварийные режимы, контролируя несколько параметров двигателя.

По параметру, контролируемому чувствительным (измерительным) органом защитного устройства способы защиты делят на: токовые, тепловые, температурные, фазовые, напряженные, комплексные.

Самой распространенной является температурно-токовая (тепловая защита), принцип действия которой основан на использовании механических и физических изменений в телах при нагреве их электрическим током. Тепло, выделяемое при протекании тока, вызывает срабатывание механизма. К устройствам тепловой защиты относят: плавкие предохранители, тепловые реле, автоматические выключатели.

Простейшими устройствами защиты электродвигателей являются плавкие предохранители, защищающие их от коротких замыканий. Эта защита надежна и наиболее дешевая, однако эффективность её существенно снижается при перегорании одного из предохранителей. Это может привести к неполнофазному режиму, который вызывает недопустимый перегрев фазных обмоток двигателя из-за увеличения в них токов (выше номинальных значений). Распределение токов в обмотках статора электродвигателя, соединенных «звездой» при неполнофазном режиме, иллюстрирует рисунок 21.

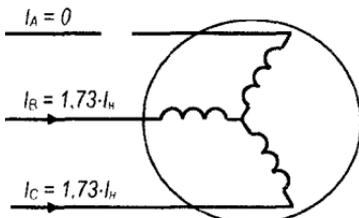


Рисунок 21

Целесообразнее для защиты электродвигателей от коротких замыканий использовать автоматические выключатели с электромагнитными расцепителями, а от технологических перегрузок – с тепловыми. Наибольшее применение находят выключатели с комбинированными расцепителями. Принципы действия тепловых расцепителей, выключателей и тепловых реле магнитных пускателей аналогичны. Замена предохранителей автоматическими выключателями исключает (за счет трехфазного отключения) неполнофазный режим.

На лабораторной установке исследуется максимальная токовая защита трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с выдержкой времени при отключении.

В схеме защиты (рис. 22) используются следующие устройства:

*Контактор КМ*, обеспечивающий подключение (и отключение) обмоток статора электродвигателя *М* к трехфазной электрической сети напряжением ~ 380/220 В;

*Ключевая станция* с двумя контактами – замыкающим *SB1* и размыкающим *SB2*, предназначенными для дистанционного управления контактором *КМ*.

Устройство и принцип работы этих аппаратов рассмотрены ранее (см. работу № 2.2);

*Реле максимального тока КА*, контролирующее величину тока в линии *С* и реагирующее на ее увеличение. Реле тока (рис. 23) состоит из следующих основных частей:

шихтованного П-образного сердечника 6, на котором расположена обмотка 5; поворотного якоря 3 с ферромагнитной пластиной 4, установленного в

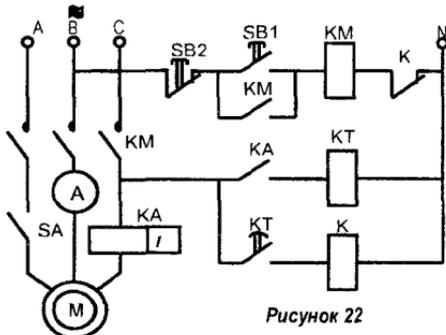


Рисунок 22

цапфах 2; подвижного контактного мостика 15 на пластмассовой колодке 14, жестко закрепленной на якоре; неподвижных контактов 17 в свою очередь закрепленных на пластмассовой колодке 20. Конец якоря 3 посредством тяги 7 соединен с пружиной 13, которая создает противодействующий момент его движению. С другого конца пружина 13 соединена с указателем срабатывания реле 11. Ток срабатывания реле устанавливается изменением упругости пружины 13 путем перемещения указателя 11 вдоль шкалы 12, на которой указаны значения токов уставки.

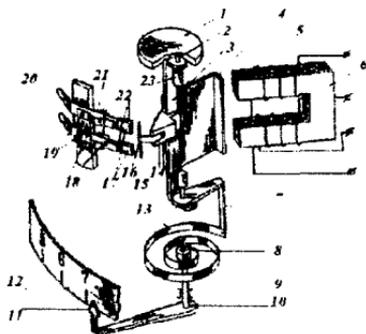


Рисунок 23

При протекании в обмотке 5 тока, не превышающего ток уставки реле, исходное положение сердечника

(контакты реле разомкнуты) обеспечивается противодействующим моментом пружины 13. Увеличение тока, протекающего по катушке 5, приводит к увеличению магнитного поля и возрастанию вращающего момента якоря. Если этот момент окажется больше противодействующего момента пружины, то якорь поворачивается и происходит замыкание контактов (срабатывание реле);

Реле времени КТ (электромагнитное с часовым механизмом), служащее для создания выдержки, что позволяет выполнить защиту селективно (избирательно), а также отстроить ее от кратковременных бросков тока (например, при пуске). Реле времени (рис. 24) состоит из следующих основных частей:

- тягового электромагнитного реле с обмоткой 1, якорем 2 и возвратной пружины 3;
- контактного устройства, состоящего из подвижного контактного мостика 20, закрепленного на траверсе 10, неподвижных (уставочных) контактов 21 и проскальзывающих (уставочных) контактов 22;
- часового механизма, состоящего из ведущей пружины 8, храпового механизма 11 и шестеренчатой системы передач, связывающей часовую механизм с контактным мостиком 20.

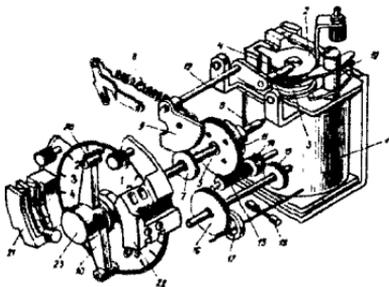


Рисунок 24

В исходном положении (реле отключено) ведущая пружина 8 растянута (заведена) и удерживается в таком положении тем, что палец 4 упирается в верхнюю часть якоря 2. При подаче напряжения на обмотку 1, якорь 2 под действием магнитного поля втягивается в катушку, сжимая пружину 3, освобождает палец 4 оси 12 часового механизма. Зубчатый сектор 9 (под действием пружины 8) начинает поворачиваться, вращая сцепленную шестерню 7 и ось 6 вместе с контактной траверсой 10. Траверса перемещает контактный мостик 20 в сторону замыкания с неподвижными контактами 22. Выдержка времени реле устанавливается подбором расстояния между начальным положением подвижного контактного мостика 20 и неподвижных контактов 21 или проскальзывающих контактов 22, которые для измерения уставок времени можно перемещать по шкале;

Промежуточное реле К, служащее для коммутации цепи катушки контактора КМ. Устройство и принцип действия его аналогичны электромагнитным реле. Особенность состоит в том, что его контакты имеют относительно большую разрывную способность, т. е. могут использоваться для коммутации цепей большой мощности.

Принцип действия схемы защиты (рис. 22) заключается в следующем. При обрыве линейного провода А с помощью тумблера SA в линиях В и С протекают токи большие номинального значения. Если величина тока окажется равной или больше тока уставки, реле тока КА срабатывает и своим контактом замыкает цепь питания катушки реле времени КТ. С заданной выдержкой времени замы-

кающий контакт реле времени включает под напряжение катушку промежуточного реле *K*, которое в свою очередь своим контактом разрывает цепь питания катушки контактора *KM*. Контактор *KM* размыкает свои главные контакты в цепи электродвигателя *M*. Двигатель отключается от электрической цепи, что не допускает перегрева обмоток статора и выхода электродвигателя из строя.

Если длительность броска тока, вызванного пуском электродвигателя или кратковременной перегрузкой, окажется меньше выдержки времени реле времени, двигатель не отключается. Поскольку в этом случае контакты реле времени не успевают замкнуться и подать питание на катушку промежуточного реле.

Ток срабатывания максимальной токовой защиты рассчитывается по формуле:

$$I_{сз} = \frac{k_M k_{сз} I_n}{k_a}$$

где  $k_M$  – коэффициент надежности, равный 1,1 - 1,2;

$k_a$  – коэффициент возврата реле (для реле РТ-40 принимается равным  $0,8 \div 0,85$ );

$k_{сз}$  – коэффициент самозапуска, учитывающий увеличение тока нагрузки при самопроизвольном запуске двигателя ( $2,5 \div 3$ );

$I_n$  – максимально возможный ток для длительной нагрузки.

Существенными недостатками электромеханических реле являются их большие размеры, значительное потребление мощности от трансформаторов тока и напряжения, трудности в обеспечении надежной работы контактов. Поэтому в настоящее время широкое распространение получили реле, выполненные на базе твердотельных микросхем, что позволило перейти на бесконтактные схемы защит, существенно улучшив их параметры и характеристики.

#### **Последовательность выполнения работы**

1. Ознакомиться с расположением и устройством оборудования лабораторной установки.
2. Вычертить схему защиты асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 22).
3. Собрать схему лабораторной установки (рис. 22).
4. Исследовать защиту двигателя, для чего:
  - замкнуть тумблером контакт *SA*. Нажатием кнопки *SB1*, включить электродвигатель *M* на полнофазный режим и по амперметру измерить пусковой и номинальный токи двигателя;
  - не выключая двигатель, искусственно создать неполнофазный режим (обрыв линейного провода *A*), разомкнув тумблером контакт *SA*. При этом зафиксировать показания амперметра и время с момента размыкания *SA* до отключения электродвигателя от сети (время срабатывания защиты);
  - последовательным нажатием кнопок *SB1* и *SB2*, кратковременно (на 1÷2 секунды) включить электродвигатель на неполнофазный режим (контакт *SA* разомкнут) и измерить пусковой ток.

#### **Содержание отчёта**

1. Цель работы.
2. Схема защиты трехфазного асинхронного двигателя от неполнофазного режима (рис. 22).
3. Результаты измерений, выполненных в процессе исследований.

#### **Контрольные вопросы**

1. Назвать основные причины повреждения асинхронных двигателей и способы их защиты.
2. На чем основан принцип действия тепловой защиты?
3. Что такое неполнофазный режим и чем он опасен для трехфазного асинхронного двигателя?
4. Объяснить устройство и принцип действия реле максимального тока.
5. В чем особенность конструкции и принципа действия реле времени?
6. Каково назначение промежуточного реле в исследуемой схеме защиты?
7. Описать по схеме (рис. 22) работу максимальной токовой защиты асинхронного двигателя.

#### **Литература [1, 2, 3]**

## Список рекомендуемой литературы

1. Брускин, Д.Э. Электрические машины. Учебник для вузов / Д.Э. Брускин, А.Е. Зохорovich, В.С. Хвостов. – М.: Высш. школа, 1979. – Ч. 1: – 288 с.
2. Иванов, И.И. Электротехника: учебник / И.И. Иванов, Г.И.Соловьев, В.С.Равдоник. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2003. – 496 с.
3. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С.Касаткин, М.В.Немцов. – 6-е изд. – М.: Высш. шк., 2000. – 543 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.1 Однофазный трансформатор .....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.2 Схемы управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.....	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.3 Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.4 Схемы торможения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором .....	18
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.5 Защита трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором от неполнофазного режима .....	22
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ. ....	266

Учебное издание

*Составители:*

***Панасюк Игорь Михайлович***

***Тромза Тамара Васильевна***

***Устинов Дмитрий Борисович***

## **Методические указания**

по выполнению лабораторных работ  
в лаборатории «Общая электротехника»  
для студентов неэлектротехнических специальностей  
дневной и заочной форм обучения

Часть 2

«Электрические машины и аппараты»

Ответственный за выпуск: Панасюк И.М.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная верстка: Митлошук М.А.

Корректор: Никитчик Е.В.

---

Подписано в печать 02.02.2017 г. Формат 60x84 1/16. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Arial Narrow». Усл. печ. л. 1,63. Уч. изд. л. 1,75. Заказ № 106. Тираж 50 экз.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный  
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.