

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ  
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.В.11 ЭЛЕКТРОПРИВОД**

**Направление подготовки 35.03.06. Агроинженерия**  
**Профиль образовательной программы «Электрооборудование и электротехнологии»**  
**Форма обучения очная**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Конспект лекций</b> .....	4
<b>1.1 Лекция № 1 Основные сведения об электроприводе</b> .....	4
<b>1.2 Лекция № 2 Механика электропривода</b> .....	7
<b>1.3 Лекция № 3 Устройство, схема включения, принцип действия и электромеханические характеристики электродвигателей</b> .....	12
<b>1.4 Лекция № 4, 5 Характеристика электродвигателей</b> .....	16
<b>1.5 Лекция № 6 Пуск и реверс двигателей</b> .....	20
<b>1.6 Лекция № 7 Тормозные режимы двигателей</b> .....	24
<b>1.7 Лекция № 8, 9 Регулирование координат и динамические режимы работы электроприводов. Общие вопросы регулирования. Понятие о координате</b> .....	27
<b>1.8 Лекция № 10, 11, 12, 13 Переходные процессы электропривода</b> .....	32
<b>1.9 Лекция № 14, 15, 16, 17 Теория нагрева и расчёт необходимой мощности электродвигателя</b> .....	41
<b>1.10 Лекция № 18, 19 Автоматическая защита электроприводов</b> .....	46
<b>1.11 Лекция № 20, 21 Автоматическое управление электроприводами</b> .....	49
<b>1.12 Лекция № 22, 23 Оценка и выбор электропривода</b> .....	53
<b>1.13 Лекция № 24 Расчёт электрической сети при питании электроприводов</b> .....	56
 <b>2. Методические материалы по выполнению лабораторных работ</b> .....	59
<b>2.1 Лабораторная работа № 1 Тарировка балансировочного механизма</b> .....	59
<b>2.2 Лабораторная работа № 2 Исследование электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения</b> .....	64
<b>2.3 Лабораторная работа № 3 Исследование центробежного вентилятора</b> .....	67
<b>2.4 Лабораторная работа № 4 Механические характеристики электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения</b> .....	73
<b>2.5 Лабораторная работа № 5, 6 Исследование механических характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя в режиме динамического торможения постоянного тока параллельного возбуждения</b> .....	80
<b>2.6 Лабораторная работа № 7 Механические характеристики асинхронного электродвигателя</b> .....	85
<b>2.7 Лабораторная работа № 8 Исследование пусковых свойств однофазного асинхронного электродвигателя</b> .....	92
<b>2.8 Лабораторная работа № 9, 10 Исследование асинхронного электропривода генератора постоянного тока</b> .....	96
<b>2.9 Лабораторная работа № 11, 12 Схема управления электродвигателя с переключением со звезды на треугольник</b> .....	101
<b>2.10 Лабораторная работа № 13, 14 Изучение схемы управления асинхронным электродвигателем из двух мест с защитой от обрыва фазы</b> .....	108
<b>2.11 Лабораторная работа № 15, 16 Изучение схемы реверсивного управления асинхронным электродвигателем с защитой от заклинивания ротора</b> .....	112
<b>2.12 Лабораторная работа № 17 Схема реверсивного управления асинхронного двигателя с торможением противовключением</b> .....	118
<b>2.13 Лабораторная работа № 18, 19 Изучение схемы динамического торможения асинхронного электродвигателя</b> .....	122
<b>2.14 Лабораторная работа № 20, 21 Изучение схемы управления однофазным асинхронным двигателем</b> .....	126
<b>2.15 Лабораторная работа № 22, 23 Изучение схемы частотного регулирования асинхронным двигателем</b> .....	132

## **1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

### **1.1 Лекция №1 ( 2 часа).**

**Тема: «Основные сведения об электроприводе»**

#### **1.1.1 Вопросы лекции:**

1. Определение понятия «электропривод».
2. Исторический обзор развития электропривода.
3. Классификация электроприводов
4. Функции электропривода

#### **1.1.2 Краткое содержание вопросов:**

##### *1. Определение понятия «электропривод».*

Электропривод – это управляемая электромеханическая система, позволяющая преобразовывать электрическую энергию в механическую и обратно, а так же позволяющая управлять этим процессом.

В электрическую часть силового канала входят устройства ЭП, передающие электрическую энергию от источника питания (шин промышленной электрической сети, автономного электрического генератора, аккумуляторной батареи и т.п.) к электромеханическому преобразователю ЭМП и обратно и осуществляющие, если это нужно, преобразование электрической энергии.

Механическая часть состоит из подвижного органа электромеханического преобразователя, механических передач и исполнительного органа установки, в котором полезно реализуется механическая энергия.

Электропривод взаимодействует с системой электроснабжения или источником электрической энергии, с одной стороны, с технологической установкой или машиной, с другой стороны, и наконец, через информационный преобразователь ИП с информационной системой.

##### *2. Исторический обзор развития электропривода.*

Возможность создания электрического двигателя была обусловлена успехами в области электромагнетизма. Первый электродвигатель, с помощью которого был осуществлен электропривод, был создан академиком Б.С. Якоби. Его двигатель состоял из вращающегося диска, по окружности которого были закреплены электромагниты. Такие же электромагниты были закреплены на неподвижной раме. Когда включался электрический ток, подвижные и неподвижные электромагниты притягивались друг к другу и диск начинал вращаться. В 1838 г. на Неве были проведены испытания этого двигателя, установленного на небольшом катере.

Следующий усовершенствованный Якоби и Ленцем двигатель использовался для перемещения по рельсам тележки. Для питания этого двигателя использовалась батарея, которая занимала большую часть места этой тележки. Эта скромная тележка приходится «бабушкой» современному электрифицированному транспорту.

Однако отсутствие экономических источников электрической энергии не позволило внедрить электропривод в промышленность. Прогрессивную роль в развитие электропривода сыграло изобретение в 1860 г. итальянским ученым А. Пачинотти электродвигателя с кольцевым якорем.

Появление переменного однофазного тока сыграло существенную роль в развитии электротехники. А открытие явления вращающегося магнитного поля в 80-х годах прошлого века Г. Феррарисом и Н. Тесла положило начало конструированию многофазных электродвигателей. В своих машинах Н. Тесла применил двухфазный ток, при этом обеспечивался сдвиг по фазе в  $90^{\circ}$ .

Наиболее экономичной среди многофазных систем оказалась система трехфазного тока, основы которой были разработаны в 1889-1981 г. русским инженером М.О. Доливо-Добровольским. Система трехфазного тока явилась техническим средством, с помощью которого разрешался весь комплекс проблем производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

Мощность электродвигателей по отношению к общей мощности установленных двигателей составляла: в 1890 г. 5%; в 1927 г. 75 %.

В настоящее время электропривод является основным видом привода самых разнообразных машин и механизмов. Более 60% вырабатываемой в стране

электроэнергии потребляется электроприводом.

Основные достоинства электропривода:

- малый уровень шума при работе и отсутствие загрязнения окружающей среды;
- широкий диапазон мощностей (от сотых долей Вт до десятков тысяч кВт);
- широкий диапазон угловых скоростей вращения (от долей оборота вала в минуту до нескольких сотен тысяч оборотов в минуту);
- доступность регулирования угловой скорости вращения;
- высокий КПД;
- легкость автоматизации;
- простота эксплуатации.

### *3 Классификация электроприводов*

По способу передачи механической энергии исполнительному органу электроприводы подразделяют на групповой, индивидуальный и взаимосвязанный.

- Групповой электропривод характеризуется тем, что одним двигателем приводится в движение несколько исполнительных органов одной или ряда рабочих машин.

- Индивидуальный электропривод – это такой электропривод, при котором каждый исполнительный орган рабочей машины приводится в движение отдельным двигателем.

- Взаимосвязанный электропривод содержит два или несколько электроприводов, связанных между собой электрически или механически и при работе, которых поддерживается необходимое соотношение их скоростей и нагрузок.

По принципам управления скоростью и положением исполнительного органа различают нерегулируемый, регулируемый, позиционный, следящий, программно-управляемый, адаптивный.

- Нерегулируемый электропривод – это электропривод, в котором исполнительный орган приводится в движение с неизменной скоростью.

- Регулируемый электропривод – электропривод, в котором исполнительный орган приводится в движение с изменяемой скоростью в соответствии с требованиями технологического процесса.

- Позиционный электропривод – электропривод, который регулирует необходимое положение исполнительного органа в соответствии с технологическим процессом.

- Следящий – привод, в котором исполнительный орган воспроизводит перемещение, произвольно задаваемое управляющим органом.

- Программно-управляемый – электропривод, в котором перемещение исполнительного органа осуществляется по заданной программе.

- Адаптивный – электропривод, в котором автоматически обеспечивается оптимальный режим движения исполнительного органа при изменяющихся условиях работы.

#### *4 Функции электропривода*

Основная функция электропривода состоит в управлении координатами, т.е. в их принудительном направленном изменении в соответствии с требованиями обслуживаемого технологического процесса.

Управление координатами должно осуществляться в пределах, разрешенных конструкцией элементов электропривода, чем обеспечивается надежность работы системы. Эти допустимые пределы обычно связаны с номинальными значениями координат, назначенными производителями оборудования и обеспечивающими его оптимальное использование.

В правильно организованной системе при управлении координатами (потоком энергии) должны минимизироваться потери  $P$  во всех элементах и к рабочему органу должна подводиться требуемая в данный момент мощность.

Функция электрического преобразователя ЭП (если он используется) состоит в преобразовании электрической энергии, поставляемой источником (сетью) и характеризуемой напряжением  $U_c$  и током  $I_c$  сети, в электрическую же энергию, требуемую двигателем и характеризуемую величинами  $U, I$ .

Преобразователи бывают неуправляемыми (трансформатор, выпрямитель, параметрический источник тока) и чаще - управляемыми (мотор-генератор, управляемый выпрямитель, преобразователь частоты), они могут иметь одностороннюю (выпрямитель) или двухстороннюю (мотор-генератор, управляемый выпрямитель с двумя комплектами вентиля) проводимость. В случае односторонней проводимости преобразователя и обратном (от нагрузки) потоке энергии используется дополнительный резистор  $R$  для "слива" тормозной энергии.

Электромеханический преобразователь ЭМП (двигатель), всегда присутствующий в электроприводе, преобразует электрическую энергию ( $U, I$ ) в механическую ( $M, \omega$ ) и обратно.

Механический преобразователь (передача) МП - осуществляет согласование момента  $M$  и скорости  $\omega$  двигателя с моментом  $M_m$  (усилием  $F_m$ ) и скоростью  $\omega_m$  рабочего органа технологической машины.

Величины, характеризующие преобразуемую энергию, - напряжения, токи, моменты (силы), скорости называют координатами электропривода.

Свойства и характеристики различных электроприводов, способы управления их координатами в установившихся (статических) и переходных (динамических) режимах, оценка энергетических свойств, расчет силовой части электропривода - будут основным предметом курса.

### **1. 2 Лекция №2 ( 2 часа).**

#### **Тема: «Механика электропривода»**

##### **1.2.1 Вопросы лекции:**

1. Основные понятия
2. Механические характеристики производственных механизмов и их классификация.
3. Механические характеристики двигателей постоянного тока НВ.

##### **1.2.2 Краткое содержание вопросов:**

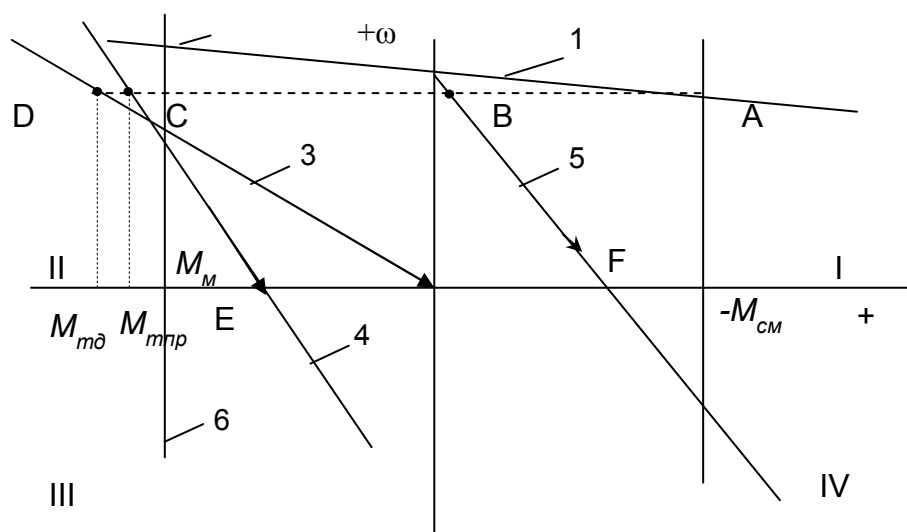
###### *1. Основные понятия*

Моменты  $M$  (двигателя) и  $M_m$  (рабочей машины) могут зависеть от времени, от положения, от скорости.

Зависимости  $M=f(\omega)$  и  $M_m=f(\omega)$  называют механическими характеристиками соответственно двигателя и нагрузки (механизма).

Механические характеристики будут служить очень удобным и полезным инструментом при анализе статических и динамических режимов электропривода.

Поскольку как моменты, так и скорость могут иметь различные знаки, механические характеристики могут располагаться в четырех квадрантах плоскости  $\omega - M$ .



1 - механическая характеристика ДПТ в двигательном режиме; 2 – механическая характеристика при рекуперативном торможении; 3 – механическая характеристика при динамическом торможении; 4 – противовключение сменой полярности;

5 – противовключение введением  $R_{пр}$ ; 6 – механическая характеристика рабочей машины.

Примеры механических характеристик

На рисунке в качестве примера показаны механические характеристики двигателя постоянного тока и рабочей машины.

Моменты, направленные по движению (движущие), имеют знак, совпадающий со знаком скорости; моменты, направленные против движения (тормозящие), имеют знак, противоположный знаку скорости.

Моменты принято делить на активные и реактивные (пассивным).

Активные моменты могут быть как движущими, так и тормозящими, их направление не зависит от направления движения (момент, созданный электрической машиной, момент, созданный грузом).

Соответствующие механические характеристики могут располагаться в любом из четырех квадрантов.

Активные моменты могут быть как движущими, так и тормозящими, их направление не зависит от направления движения (момент, созданный электрической машиной, момент, созданный грузом).

Например, при подъеме груза активный момент от массы груза - тормозной, а при спуске – движущий.

Соответствующие механические характеристики могут располагаться в любом из четырех квадрантов.

Реактивные моменты - реакция на движение, они всегда направлены против движения, т.е. всегда тормозящие (момент от сил трения, момент  $M_M$ ).

При изменении направления движения изменяется и направление (знак) реактивного момента.

Их механические характеристики всегда располагаются во втором и четвертом квадрантах.

Абсолютно жесткая механическая характеристика свойственна синхронному электродвигателю; жесткая (с отрицательной жесткостью) - электродвигателю постоянного тока независимого возбуждения и асинхронному двигателю общего назначения в рабочей части механической характеристики; мягкая (с отрицательной жесткостью) двигателю постоянного тока последовательного возбуждения и мягкая с положительной жесткостью – асинхронному двигателю на участках пусковой части механической характеристики.

Механические характеристики двигателя и нагрузки, рассматриваемые совместно, позволяют определить координаты - скорость и моменты - в установившемся (статическом) режиме  $\omega_{уст}$  и  $M_{уст}$ .

Действительно, если отразить зеркально относительно оси скорости характеристику  $M_c$  то точка А пересечения отраженной кривой -  $M_c$  с характеристикой двигателя  $M$  определит установившийся режим, поскольку выполнится условие  $M+(-M_c)=0$ .

## 2. Механические характеристики производственных механизмов и их классификация

В общем случае механические характеристики производственных механизмов можно описать формулой Бланка

$$M = M_{м0} + (M_{мн} - M_{м0}) \cdot (\omega / \omega_{мн})^x$$

При  $x=0$  момент сопротивления не зависит от угловой скорости и определяется в основном моментом трения.

При  $x=1$  момент сопротивления в основном линейно возрастает с увеличением скорости.

При  $x=2$  – нелинейно-возрастающая механическая характеристика, называемая вентиляторной.

При  $x=-1$  момент сопротивления уменьшается обратно пропорционально угловой скорости. Для таких механизмов необходимо ограничение по скорости.

Аналитическое выражение механической характеристики двигателя может быть получено из уравнения равновесия напряжений, составленного для якорной цепи этой схемы. При установившемся режиме работы двигателя приложенное напряжение  $U$  уравновешивается падением напряжения в якорной цепи  $IR$  и наведенной в якоре ЭДС  $E$ .

$$M = C_m \cdot \Phi \cdot I,$$

$$I = \frac{M}{C_m \cdot \Phi}$$

$$\omega = \frac{U}{C_m \Phi} - \frac{MR}{C_m^2 \Phi^2}$$

Взаимодействие тока  $I$  в обмотке якоря с магнитным потоком  $\Phi$ , создаваемым обмотками, расположенными на полюсах машины, приводит в соответствии с законом Ампера к возникновению электромагнитных сил, действующих на активные проводники обмотки и, следовательно, электромагнитного момента  $M$ .

Подставив выражение тока в уравнение электромеханической характеристики получим зависимость  $\omega=f(M)$ .

Естественной характеристикой называется такая характеристика двигателя, которая получается при отсутствии внешних сопротивлений в якорной цепи и номинальных значениях напряжения и магнитного потока двигателя.

Координаты номинальной точки

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}; \quad \omega_n = \frac{\pi n_n}{30};$$

Координаты точки холостого хода

$$M = 0; \quad \omega_0 = \omega_n \cdot \frac{U_n}{U_n - I_n R_a}$$

Уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения является уравнением прямой линии, поэтому характеристика может быть построена по двум точкам: номинальной и точке холостого хода.

$$\text{При } M = 0; \quad \omega_0 = \frac{U_n}{C_m \cdot \Phi} \Rightarrow C_m \cdot \Phi = U_n / \omega_0;$$

$$E = U_n - I_n \cdot R_a; \quad E = C_m \cdot \Phi \cdot \omega_n \Rightarrow$$

$$U_n = \frac{U_n - I_n \cdot R_a}{C_m \cdot \Phi} = \frac{U_n - I_n \cdot R_a}{U_n} \cdot \omega_0 \Rightarrow$$

$$\omega_0 = \frac{U_n \cdot \omega_n}{U_n - I_n R_a}$$

Так как в каталогах внутреннее сопротивление якоря обычно не указывается, то его ориентировочно определяют, приняв, что половина всех потерь в двигателе при номинальной нагрузке связана с потерями в меди якоря.

Реостатные характеристики также строятся по точке холостого хода и точке, в которой момент равен номинальному, а угловая скорость, соответствующая номинальному моменту, определяется через номинальные параметры и величину вводимого добавочного сопротивления.

Регулирование скорости вращения двигателя изменением тока возбуждения является одним из наиболее простых и экономичных способов. Регулирование скорости в этом случае осуществляется вверх от основной.

Для получения плавного регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока в широких пределах, в частности для получения характеристик при изменении подводимого к двигателю напряжения применяется схема называемая системой генератор-двигатель.

### 3. Механические характеристики двигателей постоянного тока НВ.

Для определения сопротивления ступеней пускового реостата предварительно задаемся условиями пуска:

$$M_{n\max} = (1,8 \dots 2,5) M_n; \quad I_{n\max} = (1,8 \dots 2,5) I_n;$$

$$M_{n\min} = (0,5 \dots 1,5) M_n; \quad I_{n\min} = (0,5 \dots 1,5) I_n;$$

$$\frac{M_{n\max}}{M_{n\min}} = \frac{I_{n\max}}{I_{n\min}} = \lambda.$$

Если задан  $I_{n\max}$ , то сопротивление якорной цепи при полностью введенных всех  $Z$  ступенях пускового реостата будет равно:

$$R_z = \frac{U_n}{I_{n\max}} = R_a \cdot \lambda^Z \Rightarrow \lambda = \sqrt[Z]{\frac{U_n}{I_{n\max} \cdot R_a}}$$

$$\text{Но так как } r_z = R_z - R_a \quad \text{то} \quad r_z = R_a \cdot \lambda^{Z-1} \cdot (\lambda - 1)$$

При заданных условиях пуска число ступеней реостата будет равно:

$$Z = \frac{\lg \frac{U_n}{I_{n\max} \cdot R_a}}{\lg \lambda}$$



### 1.3 Лекция №3 ( 2 часа).

Тема: «Устройство, схема включения, принцип действия и электромеханические характеристики электродвигателей»

#### 1.3.1 Вопросы лекции:

1. Механические характеристики двигателей постоянного тока ПВ.
2. Механические характеристики двигателей постоянного тока СВ.
3. Механические характеристики двигателей постоянного тока в тормозных режимах.

#### 1.3.2 Краткое содержание вопросов:

1. Механические характеристики двигателей постоянного тока ПВ.

Для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения уравнение электромеханической характеристики имеет такой же вид как и для двигателя независимого возбуждения.

Но в отличие от двигателя независимого возбуждения здесь магнитный поток является функцией тока якоря. Зависимость  $\Phi = f(I)$  - характеристика намагничивания - не имеет простого аналитического выражения, ее примерный вид изображен на слайде. Но для упрощения анализа можно пренебречь насыщением магнитной системы и принять линейную зависимость между потоком и током якоря (пунктирная линия на графике).

Подставив в уравнение электромеханической характеристики значение тока получим выражение для механической характеристики. Таким образом, при сделанном допущении механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения изображается гиперболой, одной из ее асимптот является ось ординат, а другой - прямая, параллельная оси абсцисс.

Полученное уравнение  $\frac{U}{\omega_a} = I(R_a + R_{ia}) + \frac{U}{\omega_a} \frac{1 - ir}{1 - ir}$  дает лишь общее представление о механической характеристике двигателя последовательного возбуждения. При расчетах этим уравнением пользоваться нельзя из-за того, что в реальности происходит насыщение магнитной системы.

Порядок построения реостатной характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения сводится к тому, что задаваясь некоторыми произвольными значениями тока  $i_1$  по имеющейся естественной характеристике находят  $v_{e1}$ . Затем по формуле в относительных единицах определяется искомое значение  $v_1$  при определенном значении  $r_1$ . Аналогичным образом определяют искомые значения скоростей для других значений тока.

Особенностью характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения является невозможность получения режима идеального холостого хода. При нагрузке ниже 15...20% номинальной работа двигателя на естественной характеристике практически недопустима из-за чрезмерного увеличения скорости вращения якоря.

$$\omega = \omega_a \frac{U - I(R_a + R_{ia} + R_a)}{U - I(R_a + R_{ia})}, \quad v = v_a \frac{1 - ir}{1 - ir}.$$

2. Механические характеристики двигателей постоянного тока СВ

Двигатель смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения: независимую и последовательную. Поэтому его механические характеристики занимают промежуточное положение между соответствующими характеристиками двигателей независимого и последовательного возбуждения.

В отличие от двигателя последовательного возбуждения двигатель смешанного возбуждения имеет конечное значение скорости идеального холостого хода. Эта скорость определяется только магнитным потоком созданным намагничивающей силой независимой обмотки.

### 3. Механические характеристики двигателей постоянного тока в тормозных режимах

Тормозные режимы - это генераторные режимы, поскольку механическая энергия, поступившая с вала машины, преобразуется в электрическую и передается через электрические зажимы машины. В зависимости от того, куда поступает электрическая энергия, различают три тормозных режима:

- рекуперативное торможение;
- торможение противовключением;
- динамическое торможение.

Торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное) или генераторный режим работы параллельно с сетью достигается если якорь двигателя вращать от некоторого постороннего источника со скоростью, превышающей скорость идеального холостого хода, то ЭДС двигателя будет больше приложенного напряжения, в результате чего ток в якоре двигателя и момент изменят свой знак.

Так как ток двигателя меняет направление, то очевидно, что момент также будет отрицательным:

$$M = -\tilde{N}_a \Phi I,$$

$$\omega = \frac{U}{\tilde{N}_a \Phi} + \frac{M \cdot R}{\tilde{N}_a^2 \cdot \Phi^2}$$

Торможение противовключением или генераторный режим работы последовательно с сетью может быть получен двумя способами:

- изменением полярности на обмотке якоря или обмотке возбуждения;
- включением в цепь якоря сопротивления  $R_{пр}$ .

1 способ: Вследствие механической инерции скорость двигателя и ЭДС в начальный момент сохраняются неизменными, а ток будет равен:

$$I = \frac{-U - E}{R_a - R_{i\delta}},$$

$$\omega = -\left( \frac{U}{\tilde{N}_a \Phi} - \frac{M(R_a + R_{i\delta})}{\tilde{N}_a^2 \Phi^2} \right).$$

Торможение противовключением по второму способу может происходить, например, в режиме тормозного спуска в приводе подъемника, когда двигатель включен на подъем, а момент, развиваемый грузом, заставляет привод вращаться в сторону спуска груза.

При торможении противовключением в режиме тормозного спуска ток якоря будет равен:

$$I = \frac{U + E}{R_a + R_{i\delta}},$$

$$\omega = \frac{U}{\tilde{N}_a \Phi} - \frac{\dot{I} (R_a + R_{i\delta})}{\tilde{N}_a^2 \Phi^2}.$$

Динамическое торможение или генераторный режим работы независимо от сети осуществляется отключением обмотки якоря от сети и замыканием ее на резистор  $R_{д.т.}$ . Обмотка возбуждения остается присоединенной к сети.

Для двигателя последовательного возбуждения возможны два тормозных режима:

- режим торможения противовключением;
- режим динамического торможения.

Так же как и для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения возможен режим противовключения при изменении полярности напряжения подводимого к якорю. В этом случае следует изменив направление тока якоря, оставить без изменения направление тока в обмотке возбуждения.

При введении дополнительного сопротивления в цепь обмотки якоря механические характеристики, относящиеся к тормозному режиму являются продолжением характеристик в область отрицательной скорости. Работа двигателя в режиме противовключения возможна, если момент нагрузки становится больше момента короткого замыкания  $M_k$ .

Динамическое торможение двигателя последовательного возбуждения может быть осуществлено двумя способами:

- самовозбуждением;
- с независимым возбуждением.

При торможении самовозбуждением якорь и обмотка двигателя отключаются от сети и замыкаются на тормозное сопротивление. Следует иметь ввиду, что при переводе машины из двигательного режима в режим динамического торможения необходимо во избежание размагничивания машины изменить полярность якоря, направление тока в обмотке возбуждения должно остаться неизменным.

Чаще применяется динамическое торможение двигателя последовательного возбуждения, когда обмотка возбуждения подключается к сети через сопротивление ограничивающее ток. Поскольку машина работает как генератор с независимым возбуждением, его характеристики подобны характеристикам машины независимого возбуждения.

#### **1. 4 Лекция №4,5 ( 4 часа).**

##### **Тема: «Характеристика электродвигателей»**

##### **1.4.1 Вопросы лекции:**

1. Модель асинхронного электродвигателя.
2. Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя.
3. Управление пуском асинхронных электродвигателей. Расчет пусковых реостатов.

##### **1.4.2 Краткое содержание вопросов:**

###### *1. Модель асинхронного электродвигателя*

Достоинства асинхронного электродвигателя:

- простота конструкции;
- низкая металлоемкость;
- допускает прямой пуск от сети;
- повышенная надежность;
- простота в ремонте и эксплуатации.

Электродвигатели с фазным ротором имеют на роторе, как и на статоре, трехфазную обмотку с тем же числом полюсов. Для подавления третьей и кратных ей гармоник магнитного поля обмотку ротора соединяют звездой. Три оставшихся конца обмотки соединяют с контактными кольцами, установленными на валу электродвигателя

и вращающимися вместе с валом. С другой стороны к контактным кольцам при помощи металлографитовых щеток подключают трехфазный реостат. Тем самым замыкают каждую фазу обмотки ротора через активное сопротивление реостата.

Электродвигатели с короткозамкнутым ротором имеют обмотку ротора в виде «беличьей клетки». Она постоянна замкнута в лобовых частях ротора при помощи короткозамкнутых колец. К ним подсоединены стержни проводники, которые размещены в пазах сердечника ротора.

Из-за шунтирующего действия обмотки стержни выполнены без изоляции. В электродвигателях большой мощности «беличью клетку» изготавливают из медных стержней, концы которых вваривают в короткозамкнутые кольца. В электродвигателях малой и средней мощности «беличью клетку» отливают целиком путем заливки расплавленного алюминия в пазы сердечника ротора. В электрическом отношении беличья клетка образует многофазную обмотку, соединенную звездой и замкнутую накоротко. Число фаз такой обмотки равно числу стержней.

Принцип работы асинхронного двигателя состоит в следующем. При подаче на обмотки статора напряжений, сдвинутых по фазе на  $120^\circ$ , по обмоткам протекают токи, создается круговое вращающее магнитное поле, пересекающее обмотки ротора и наводящее в них ЭДС. Так как обмотка ротора имеет замкнутую электрическую цепь, в ней под действием ЭДС возникает ток. При взаимодействии роторных токов с вращающимся магнитным полем статора создается вращающий электромагнитный момент на валу электродвигателя.

Для объяснения основных явлений в асинхронном электродвигателе рассмотрим самую простую модель асинхронной машины.

Пусть на статоре расположена катушка А-Х по которой протекает переменный ток  $i_A = I_m \sin \omega t$ ;  $\omega = 2\pi f_1$ .

МДС  $F_A$ , созданная этим током, будет пульсировать по оси обмотки

$$F_A = F_m \sin \omega t.$$

Если добавить катушку В-У, расположенную под углом  $90^\circ$  и пропускать по ней ток  $i_B = I_m \cos \omega t$ , то

МДС  $F_B$  будет пульсировать по оси этой обмотки

$$F_B = F_m \cos \omega t.$$

Вектор результирующей МДС имеет модуль

$$F_{\Sigma} = \sqrt{F_A^2 + F_B^2} = F_m = \text{const.}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_A}{F_B} = \operatorname{tg} \omega t$$

Таким образом, вектор результирующей МДС вращается с угловой скоростью

$$\omega = 2\pi f_1.$$

Частота вращения магнитного поля  $n_1$  как и угловая скорость  $\omega_1$  находится в строгой зависимости от частоты подводимого напряжения сети  $f_1$  и числа пар полюсов  $p$  двигателя:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad \omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}.$$

Наведение в обмотке ротора ЭДС и появление вращающего или тормозящего момента асинхронного двигателя возможно только при наличии разности между угловыми скоростями вращения магнитного поля статора и ротора. Это различие оценивают в относительных единицах и называют скольжением.

## 2. Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя

При выводе уравнения механической характеристики асинхронного двигателя необходимо обратиться к упрощенной схеме замещения.

Здесь  $R_1$ ,  $R_2'$  -соответственно первичное и вторичное приведенные активные сопротивления;

$X_0$ ,  $R_0$ , - активное и реактивное сопротивление контура намагничивания;

$X_1$ ,  $X_2'$ , - первичное и вторичное приведенное реактивное сопротивление рассеяния;

$S$  - скольжение двигателя.

В соответствии с приведенной схемой замещения можно получить выражение для вторичного тока.

Кривая момента  $M=f(S)$  имеет два максимума: один – в генераторном режиме, другой в двигательном.

Найдя производную  $dM/dS$  приравняем ее к нулю и определим величину критического скольжения  $S_k$  при котором двигатель развивает максимальный критический момент. Подставляя  $S_k$  в уравнение механической характеристики найдем выражение для максимального момента.

Знак «+» в равенствах относится к двигательному режиму (или торможению противотоканием), знак «минус» относится к генераторному торможению.

Разделив уравнение механической характеристики на выражение для максимального момента получим

$$M = \frac{2M_k(1 + \alpha \cdot S_k)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2\alpha \cdot S_k}, \quad \alpha = \frac{R_l}{R_2'}.$$

Приняв  $2\alpha \cdot S_k = q,$

Получаем:

$$M_{\text{ов}} = \frac{M_{\text{кр}}(2 + q)}{\frac{S}{S_{\text{кр}}} + \frac{S_{\text{кр}}}{S} + q}.$$

Характерными точками механической характеристики являются:

- пусковая точка –  $M=M_n$ ;  $\omega=0$ ;
- точка провала на пусковой ветви, угловая скорость,
- в которой соответствует скольжению  $S=0,8$ ;  $M=M_{\text{мин}}$ ;
- критическая точка с координатами  $\omega_k$ ,  $M_k$ ;
- номинальная точка –  $\omega_n$ ,  $M_n$ ;
- точка холостого хода –  $\omega=\omega_1$ ;  $M=0$ .

## 3. Управление пуском асинхронных электродвигателей. Расчет пусковых реостатов.

Для короткозамкнутых двигателей существенное значение с точки зрения электропривода имеют кратности начального пускового момента и начального пускового тока. Проанализировав естественную механическую характеристику можно отметить, что двигатель, потребляя из сети весьма большой ток, имеет сравнительно низкий начальный пусковой момент.

Для повышения начального пускового момента и снижения пускового тока применяются короткозамкнутые двигатели специальных конструкций,

У которых ротор имеет две клетки, расположенные концентрически, или глубокие пазы с высокими и узкими стержнями.

У двигателей с контактными кольцами начальный пусковой момент увеличивается по мере возрастания до известных пределов сопротивления реостата. Величина начального пускового момента может быть доведена до величины критического момента. Пусковой ток при увеличении сопротивления уменьшается.

Расчет пусковых реостатов для асинхронных двигателей проводится графическим методом. Методика расчета подобна расчету пусковых реостатов для двигателей постоянного тока независимого возбуждения но имеет ряд особенностей.

Методика расчета:

- на характеристике  $M_{\partial\phi}=f(\omega)$ , наносятся границы пуска;
- через точки  $d$  и  $d_1$  естественной механической характеристики, соответствующие значениям моментов  $M_{\text{пуск макс}}$  и  $M_{\text{пуск мин}}$ , проводится прямая до пересечения с линией синхронной скорости ( $S=0$ ) в точке  $t$ ;
- из полученной точки проводится пусковая характеристика до точки с координатами  $M_{\text{пуск макс}}, \omega=0$ ;
- в точке с координатами  $M_{\text{пуск мин}}, \omega=\omega_3$  происходит отключение первой ступени реостата;
- в точке с координатами  $M_{\text{пуск мин}}, \omega=\omega_2$  происходит отключение второй ступени реостата;
- отрезок  $[ed]$  пропорционален величине активного сопротивления одной фазы ротора. Соответственно отрезок  $[dc]$  в относительных единицах пропорционален сопротивлению первой ступени пускового реостата, отрезок  $[bc]$  – второй ступени.

Измерив длины этих отрезков, определяют величины сопротивления каждой ступени пускового реостата:

$$\text{где } R_{\partial\phi} = \frac{U_{2i} \cdot S_i}{\sqrt{3} I_i}, \quad R_1 = \frac{[dc]}{[ed]} \cdot R_{\partial\phi}, \quad R_2 = \frac{[cb]}{[ed]} \cdot R_{\partial\phi}$$

При реостатном пуске асинхронного электродвигателя с контактными кольцами поочередное закорачивание ступеней пускового сопротивления может производиться автоматически при помощи контакторов, управление включением которых может осуществляться в функции времени, частоты вращения, тока или частоты тока ротора.

Для обеспечения заданной диаграммы пуска необходима фиксация моментов подачи команд на включение контакторов. Это может осуществляться следующими способами:

- путем отсчета промежутков времени  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ , для чего используются реле времени;
- посредством контроля значения скорости двигателя или ЭДС ротора, что может быть сделано при помощи датчиков скорости или ЭДС;
- применением датчиков тока;
- посредством контроля частоты тока ротора.

Время пребывания на каждой ступени пускового реостата определяется по следующему соотношению:

$$t_i = \frac{\omega_i \cdot S_{ii}}{I_i} \cdot \ln \frac{I_{\partial\phi i 1}}{I_{\partial\phi i 2}},$$

$$M_{\partial\phi i 1} = M_{\text{пуск макс}} - M_{ci},$$

$$M_{\partial\phi i 2} = M_{\text{пуск мин}} - M_{ci}.$$

## **1. 5 Лекция №6 ( 2 часа).**

### **Тема: «Пуск и реверс двигателей»**

#### **1.5.1 Вопросы лекции:**

1. Способы пуска электродвигателя
2. Реверс электродвигателя

#### **1.5.2 Краткое содержание вопросов:**

##### *1. Способы пуска электродвигателя*

Когда на электродвигатель подается напряжение, возникает скачок тока, который называют пусковым током или током при заторможенном роторе. Пусковой ток обычно превышает номинальный в 5 - 10 раз, но действует кратковременно. Одновременно с возрастанием токовой нагрузки на обмотки статора происходит ударное увеличение крутящего момента двигателя, которое передается на вал ротора асинхронного двигателя и через него далее на механическую часть насоса. Это ведёт как к перегреву обмоток статора и ухудшению их изоляции, так и поломкам валов от ударов и вибраций, механическим деформациям электрической части и т.д.

Пусковой ток понижается с разгоном электродвигателя до номинальной частоты вращения. В соответствии с местными нормами и правилами, для того чтобы снизить пусковой ток, используются различные способы пуска. Вместе с этим необходимо принять ряд мер по стабилизации напряжения питания.

##### **Прямой пуск**

Прямой пуск означает, что электродвигатель включается прямым подключением к источнику питания при номинальном напряжении. Прямой пуск (*direct-on-line starting – DOL*) применяется при стабильном питании двигателя, жестко связанного с приводом. Прямой пуск от сети является самым простым, дешёвым и самым распространённым методом пуска. Кроме того, он даёт наименьшее повышение температуры в электродвигателе во время включения по сравнению со всеми другими способами пуска. Если поступающий ток от сети не имеет специальных ограничений, такой метод является наиболее предпочтительным. Электродвигатели, предназначенные для частых пусков/отключений обычно оборудованы системой управления, которая состоит из контактора и устройства защиты от перегрузок (термореле).

Для электродвигателей небольшой мощности, работающих без частых пусков/остановов, необходимо самое простое пусковое оборудование, чаще всего это расцепитель, управляемый вручную. Напряжение подается непосредственно на клеммы электродвигателя. Для небольших электродвигателей пусковой момент будет составлять от 150% до 300% от номинального, тогда как пусковой ток будет составлять от 300% до 800% от номинального значения или даже выше.

##### **Пуск звезда – треугольник**

Целью данного метода пуска, используемого для трёхфазных индукционных электродвигателей, является понижение пускового тока. В момент пуска электропитание к обмоткам статора подключено по схеме «звезда» (Y). Электропитание переключается на схему «треугольник» (Δ), как только электродвигатель разгонится.

Обычно электродвигатели низкого напряжения мощностью больше 3 кВт рассчитаны на напряжение 400 В при соединении по схеме «треугольник» (Δ) или на 690 В при соединении по схеме «звезда» (Y). Такая унифицированная схема соединения может быть также использована для пуска электродвигателя при меньшем напряжении. Соединение по схеме «звезда – треугольник» даёт низкий пусковой ток, составляющий всего одну треть тока при прямом пуске от сети. Пускатели «звезда – треугольник» особенно подходят при вращении больших масс, когда нагрузка «подхватывается» после того, как достигается частота вращения при номинальной нагрузке.

Подобные пускатели также понижают и пусковой момент, приблизительно на 33%. Данный метод можно использовать только для индукционных электродвигателей,

которые имеют подключение к напряжению питания по схеме «треугольник». Если переключение «звезда – треугольник» происходит при слишком низкой частоте вращения, это может вызвать сверхток, который достигает почти такого же уровня, что и ток при «прямом» пуске DOL. Во время небольшого периода переключения «звезда – треугольник» электродвигатель очень быстро теряет скорость вращения, для восстановления которой также требуется мощный импульс тока. Пускатель сначала соединяет электродвигатель по схеме «звезда» (контакты К1 и К3). По истечении определённого периода времени, который зависит от конкретной задачи, он переключает двигатель на «треугольник», размыкая контакт К3 и замыкая контакт К2.

Пуск через автотрансформатор.

Пуск осуществляется с помощью автотрансформатора, последовательно соединённого с электродвигателем во время пуска.

Автотрансформатор понижает напряжение (приблизительно 50–80% от полного напряжения), чтобы обеспечить пуск при низком напряжении. В зависимости от заданных параметров напряжение снижается в один или два этапа. Понижение напряжения, подаваемого на электродвигатель одновременно, приведёт к уменьшению пускового тока и вращающего пускового момента, но данный способ пуска даёт самый высокий вращающий момент электродвигателя. Если в определённый момент времени к электродвигателю не подаётся питание, он не потеряет скорость вращения, как и в случае с пуском переключением «звезда – треугольник». Время переключения от пониженного напряжения к полному напряжению можно корректировать.

Помимо уменьшения пускового момента, способ пуска через автотрансформатор имеет ещё один недостаток. Как только электродвигатель начинает работать, он переключается на сетевое напряжение, что вызывает скачок тока.

Плавный пуск.

Принцип «плавного» пуска основан на полупроводниках. Через энергетическую цепь и цепь управления данные полупроводники понижают начальное напряжение электродвигателя. Это приводит к уменьшению вращающего момента электродвигателя. В процессе пуска мягкий пускатель постепенно повышает напряжение электродвигателя, что позволяет электродвигателю разогнаться до номинальной скорости вращения, не образуя большого вращающего момента или пиков тока. Плавные пускатели могут использоваться также для управления торможением электродвигателя. Плавные пускатели не так дороги, как преобразователи частоты. Тем не менее, у них те же проблемы, что и у преобразователей частоты: они могут добавить в систему синусоидальные токи (помехи), что может повлиять на ее функционирование. Данный способ также обеспечивает подачу пониженного напряжения к электродвигателю во время пуска.

Плавный пускатель включает электродвигатель при пониженном напряжении, которое затем увеличивается до полной величины. Напряжение в плавном пускателе уменьшается за счет фазового сдвига. Данный способ пуска не вызывает образования скачков тока.

Пусковой период и пусковой ток можно задать

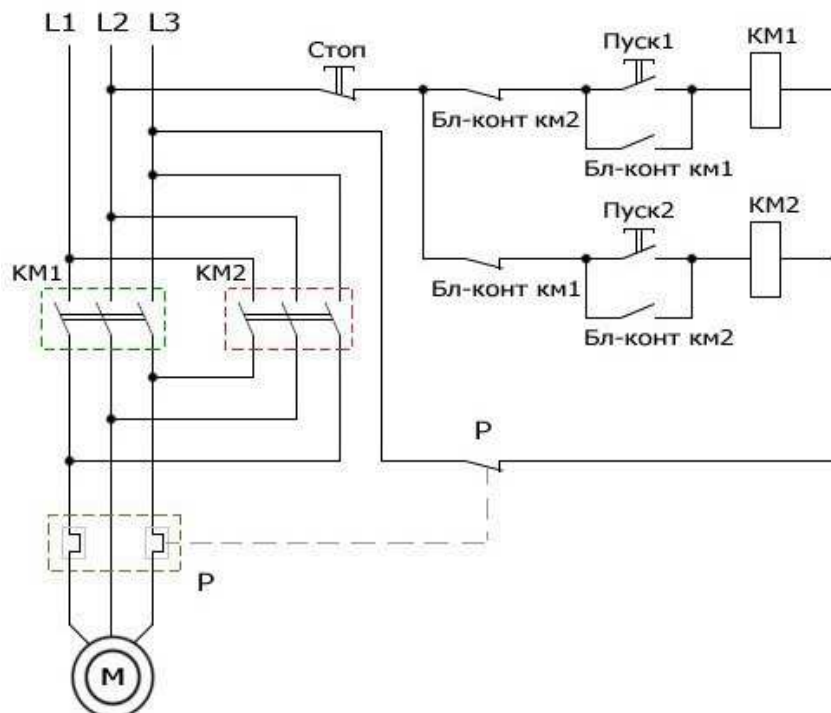
## 2. *Реверс электродвигателя*

Реверсирование двигателя реализуется изменением *фазировки* его питающего напряжения. Например, если порядок подключения фаз к клеммам трехфазного электродвигателя условно взять как *L1, L2, L3*, то направление вращения вала будет определенным, противоположным, чем при подключении, скажем, с фазировкой *L3, L2, L1*.

Особенностью реверсивной схемы подключения является использование в ней двух магнитных пускателей. Причем, их главные силовые контакты соединены между собой таким образом, что при срабатывании катушки одного из пускателей, фазировка



питающего напряжения двигателя будет отличаться от фазировки при срабатывании катушки другого.



В схеме используется два магнитных пускателя. При срабатывании первого пускателя KM1, его силовые контакты притягиваются (обведены зеленым пунктиром) и на обмотки электродвигателя поступает напряжение с фазировкой L1, L2, L3. При срабатывании второго пускателя – KM2, напряжение на двигатель пойдет через его силовые контакты KM2 (обведены красным пунктиром) уже будет иметь фазировку L3, L2, L1.

Как видите, здесь магнитные пускатели подключены по стандартной схеме. Разве, что, в цепь каждой катушки последовательно включен нормально закрытый блок-контакт другого пускателя. Эта мера предотвратит замыкание в случае ошибочного одновременного нажатия обеих кнопок «Пуск».

## 1. 6 Лекция №7 ( 2 часа).

### Тема: «Тормозные режимы двигателей»

#### 1.6.1 Вопросы лекции:

1. Генераторное торможение асинхронного электродвигателя
2. Торможение противовключением
3. Динамическое торможение

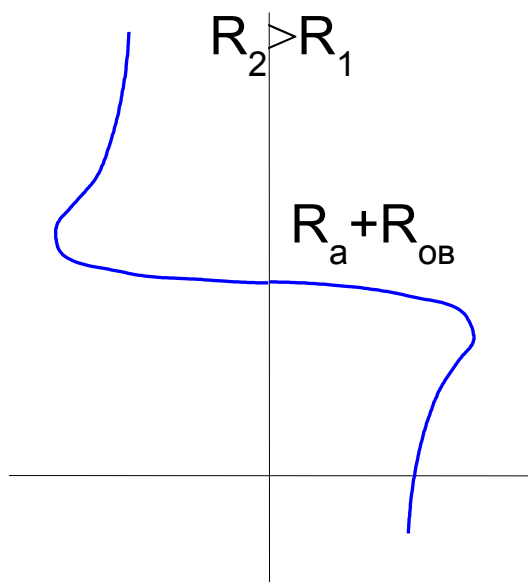
#### 1.6.2. Краткое содержание вопросов:

##### 1. Генераторное торможение асинхронного электродвигателя

Тормозные режимы асинхронных электродвигателей:

- генераторное торможение;
- торможение противовключением;
- динамическое торможение.

Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть возможно при скорости выше синхронной.



В квадранте I двигатель работает в двигательном режиме. По мере приближения скорости двигателя к скорости идеального холостого хода или синхронной скорости момент двигателя приближается к нулю. При дальнейшем увеличении скорости под влиянием внешнего момента, когда  $\omega > \omega_0$ , двигатель работает в режиме генератора параллельно с сетью, которой он может отдавать электрическую энергию.

В режиме генераторного торможения критический момент имеет большую величину, чем в двигательном

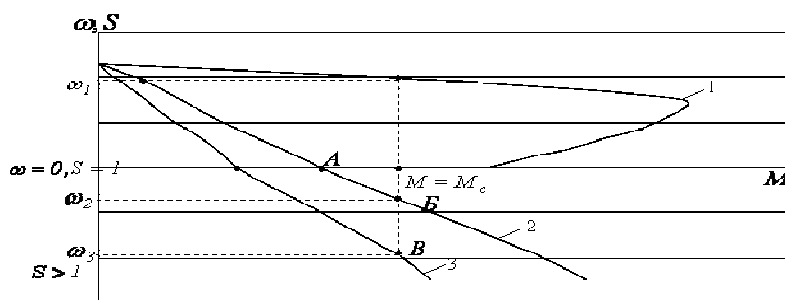
$$M = \frac{3U^2}{2\omega_0 \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_1)^2} \right]}$$

Режим генераторного торможения с отдачей энергии в сеть применяется практически для двигателей с переключением полюсов, а так же для приводов грузоподъемных машин.

## 2. Торможение противовключением

Режим торможения противовключением асинхронного электродвигателя достигается двумя путями:

- введением реостата в цепь ротора;
- и изменением порядка чередования фаз.



Если при подъеме груза с угловой скоростью  $\omega_1$  в цепь ротора включить резистор  $R_{д1}$ , то возникает новая характеристика  $M=f_2(\omega)$  (зависимость 2) .

В точке А момент электродвигателя меньше статического момента сопротивления  $M_c$ , и груз увлекает ротор в направлении против поля, при этом нарастают ЭДС и ток ротора. На участке угловая скорость вращения возрастает. В точке Б момент двигателя  $M_{дв}$  равен  $M_c$  и спуск продолжается с постоянной скоростью.

Для построения тормозной характеристики, получаемой введением реостата в цепь ротора, текущее значение скольжения на тормозной характеристике определить путем пересчета величины скольжения точки естественной характеристики по следующему соотношению:

$$S_e = S_a \cdot \frac{R_\delta + R_a}{R_a}$$

Режим торможения противовключением можно получить сменой порядка чередования фаз. Режим торможения противовключением можно получить сменой порядка чередования фаз. Пусть электродвигатель работает на характеристике 1 с угловой скоростью  $\omega_1$  и моментом  $M_{дв}=M_c$ , что соответствует точке А. При смене порядка чередования фаз электродвигатель переходит в точку Б и оказывается в режиме противовключения на характеристике 2. Дополнительно в цепь ротора вводится добавочное сопротивление.

Так как поле начинает вращаться в обратную сторону, скорость быстро снижается. В точке В скорость будет равна 0. Если торможение используется для останова, то в этой точке электродвигатель необходимо отключить. Если электродвигатель не отключить, то произойдет реверс. При исключении из цепи ротора  $R_{д1}$  электродвигатель переходит из точки Д в точку Е, разгоняется в обратную сторону до тех пор, пока  $\omega$  не станет равной  $-\omega_1$ , а момент двигателя не станет равным моменту сопротивления.

Процесс торможения противовключением сменой чередования фаз может быть автоматизирован при помощи реле контроля скорости.

### 3. Динамическое торможение

Динамическое торможение асинхронного двигателя осуществляется обычно включением обмотки статора на сеть постоянного тока. Если асинхронный двигатель имеет контактные кольца, то в ротор в этом случае вводится внешнее дополнительное активное сопротивление, называемое тормозным реостатом.

При динамическом торможении постоянный ток, протекая по статору создает неподвижное магнитное поле. Ротор, вращаясь по инерции, пересекает это поле, и в его обмотке наводится ЭДС, возникает переменный ток. Этот ток, взаимодействуя с неподвижным полем статора, создает тормозной момент, величина которого зависит от намагничивающей силы статора, тока торможения, сопротивления и частоты вращения ротора.

Все механические характеристики электродвигателя в режиме динамического торможения проходят через начало координат, так как при отключении двигателя от сети трехфазного переменного тока  $f=0$ , следовательно,

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p} = 0$$

и тормозной момент также будет равен нулю.

Максимальный момент:

$$M_{\max} = \frac{3 \cdot I_{\text{экв}}^2 \cdot x_\mu^2}{2 \cdot \omega \cdot (x_\mu + x'_2)}$$

Критическое скольжение:

$$S_{\max} = \frac{R'_2}{x_\mu + x'_2}$$

Иногда применяют торможение с самовозбуждением, подключая к статору конденсаторную батарею. В этом случае машина работает асинхронным генератором, получая намагничивающий ток от конденсаторов С1-С3.

### **1. 7 Лекция №8, 9 ( 4 часа).**

**Тема: «Регулирование координат и динамические режимы работы электроприводов»**

#### **1.7.1 Вопросы лекции:**

1. Основные показатели, характеризующие различные способы регулирования
2. Регулирование скорости вращения АД введением сопротивления в цепь ротора.
3. Регулирование скорости вращения АД изменением числа полюсов
4. Регулирование скорости вращения АД изменением частоты
5. Регулирование скорости вращения АД изменением подводимого напряжения

#### **1.7.2 Краткое содержание вопросов:**

##### *1. Основные показатели, характеризующие различные способы регулирования*

В современной промышленности используется большое количество производственных механизмов, работающих с различной изменяющейся скоростью. Для многих механизмов необходимо осуществлять регулирование скорости.

Понятие регулирования скорости не следует смешивать с естественным изменением скорости, возникающим в электроприводах в силу изменения нагрузки на валу.

Регулирование угловой скорости электропривода возможно механическими и электрическими способами.

Механические способы регулирования заключаются в изменении угловой скорости исполнительных органов за счет изменения передаточного числа устройства механической передачи (редуктора).

Электрические способы регулирования угловой скорости электропривода заключаются в изменении угловой скорости вращения электродвигателя посредством управляемого преобразователя. Электрические способы более предпочтительны, так как позволяют:

- снизить металлоемкость;
- выполнить их более компактными и надежными;
- повысить уровень и гибкость автоматизации.

Основными показателями характеризующими различные способы регулирования электроприводов являются:

- диапазон или пределы регулирования;
- плавность;
- стабильность работы на заданной скорости;
- направление регулирования;
- допустимая нагрузка;
- эффективность регулирования.

При определении диапазона регулирования скорости необходимо считаться с требованиями в отношении допустимого перепада скорости вращения электропривода в связи с возможными на практике отклонениями момента нагрузки.

Плавность регулирования характеризуется числом устойчивых скоростей, получаемых в данном диапазоне регулирования.

Плавность тем выше, чем меньше скачок скорости при переходе от данной скорости к ближайшей возможной. Чем больше скоростей в данном пределе регулирования, тем выше плавность.

Наименьшей плавностью обладают двухскоростные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Значительная плавность регулирования скорости достигается, например, в двигателе постоянного тока при регулировании изменением потока или подводимого к якорю напряжения. Здесь даже при весьма широких пределах регулирования удастся осуществить плавное регулирование за счет значительного числа ступеней регулировочного реостата.

Стабильность работы на заданной скорости характеризуется изменением скорости при заданном отклонении момента нагрузки и зависит от жесткости механической характеристики и размаха колебания нагрузки.

Направление регулирования скорости электропривода, то есть увеличение или уменьшение ее по отношению к номинальной зависит от принятого способа регулирования (например, регулирование изменением потока возбуждения у ДПТ НВ – вверх от основной, а введение добавочного сопротивления в цепь якоря – вниз от основной).

Допустимая нагрузка двигателя также зависит от принятого способа регулирования и ограничивается степенью его нагрева. Степень нагрева зависит от потерь энергии в двигателе, которые в свою очередь определяются величиной тока потребляемого двигателем. Допустимая нагрузка при работе на регулировочных характеристиках определяется величиной номинального тока.

Эффективность регулирования угловой скорости численно оценивается экономическим эффектом  $\Xi$ , получаемым от использования предлагаемого регулируемого электропривода.

$$\Xi = Z_0 - Z_1,$$

где  $Z_0, Z_1$  – приведенные затраты на электропривод соответственно в исходном и проектируемом вариантах.

## 2. Регулирование скорости вращения АД введением сопротивления в цепь ротора

Показатели реостатного регулирования скорости асинхронных двигателей.

1. Регулирование однозонное - вниз от основной скорости.
2. Диапазон регулирования (2-3):1, причем лучшее использование двигателя достигается при регулировании с постоянным моментом.
3. Стабильность скорости низкая.
4. Регулирование ступенчатое.
5. С энергетической точки зрения реостатное регулирование в асинхронном электроприводе неэффективно.
6. Капитальные затраты, как и в электроприводе постоянного тока, сравнительно невелики.

Вследствие больших потерь реостатное регулирование скорости вращения асинхронного двигателя при постоянном моменте нагрузки и длительной работе нецелесообразно.

## 3. Регулирование скорости вращения АД изменением числа полюсов.

Синхронная угловая скорость асинхронного двигателя зависит от частоты питающего напряжения  $f_1$  и от числа пар полюсов  $p$

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

У двигателей с переключением числа полюсов обмотка каждой фазы состоит из двух одинаковых частей, в одной из которых изменяется направление тока.

1. Диапазон регулирования достигает (6:1)-(8:1). Увеличивать этот диапазон нецелесообразно, так как при синхронной скорости ниже  $n_1=375$  об/мин значительно увеличиваются габариты двигателя.

2. Регулирование ступенчатое (на практике используются двух-, трех- и четырехскоростные двигатели).

3. Регулирование скорости изменением числа полюсов является весьма экономичным.

4. Механические характеристики обладают большой жесткостью, а следовательно и высокой стабильностью работы.

Благодаря своим преимуществам двигатели с переключением полюсов находят широкое применение там, где не требуется плавного регулирования скорости, например в некоторых металлорежущих станках (в целях уменьшения количества передач), для привода вентиляторов, насосов и т.д.

#### *4. Регулирование скорости вращения АД изменением частоты.*

Для получения регулируемой частоты применяются специальные генераторы или преобразователи частоты: электромашинные (синхронные и асинхронные), и полупроводниковые.

При регулировании частоты необходимо стремиться к тому. Чтобы характеристики во всем диапазоне отличались высокой жесткостью, а двигатель обладал достаточной перегрузочной способностью. Этого можно добиться сохраняя постоянным магнитный поток.

Для асинхронного двигателя можно приближенно принять

$$U = f \cdot \Phi$$

Поэтому для сохранения постоянства магнитного потока необходимо производить регулирование с неизменным соотношением

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} = \text{const}$$

1. Регулирование двухзонное - вниз ( $U_1/f_1 \approx \text{const}$ ) и вверх ( $U_1 = U_{1н}$ ,  $f_1 > f_{1н}$ ) от основной скорости.

2. Диапазон регулирования в разомкнутой структуре (8-10):1.

3. Стабильность скорости - высокая.

4. Регулирование плавное.

5. Допустимая нагрузка -  $M = M_n$  при регулировании вниз от основной скорости ( $\Phi \approx \text{const}$ ),  $P = P_n$  при регулировании вверх ( $\Phi < \Phi_n$ ).

6. Способ экономичен в эксплуатации - нет дополнительных элементов, рассеивающих энергию, малы потери в переходных процессах.

7. Несомненное достоинство - гибкость управления координатами.

8. Способ требует использования преобразователя частоты (ПЧ) - устройства, управляющего частотой и амплитудой выходного напряжения. Такие устройства - совершенные и доступные - появились в последнее десятилетие, однако они ещё сравнительно дороги - около 100 \$/кВт.

#### *5. Регулирование скорости вращения АД изменением подводимого напряжения.*

1. Регулирование однозонное - вниз от основной скорости

2. Диапазон регулирования в замкнутой структуре (3-4):1; стабильность скорости удовлетворительная.

3. Плавность высокая.

3. Допустимая нагрузка резко снижается с уменьшением скорости, поскольку магнитный поток  $\Phi \propto U_1$  при  $f_1 = \text{const}$ .

4. Таким образом, рассмотренный способ регулирования очевидно неэффективен для использования в продолжительном режиме.

5. Преобразователь напряжения ПН - простое устройство в 3-4 более дешевое, чем преобразователь частоты.

## 1. 8 Лекция №10, 11, 12, 13 ( 8 часов).

### Тема: «Переходные процессы ЭП»

#### 1.8.1 Вопросы лекции:

1. Общие положения
2. Дифференциальное уравнение движения электропривода.
3. Приведение моментов (сил) статического сопротивления и моментов (масс) инерции к валу электродвигателя
4. Расчет продолжительности переходных процессов электропривода
5. Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения
6. Статическая устойчивость электропривода
7. Динамическая устойчивость электропривода

#### 1.8.2. Краткое содержание вопросов:

##### 1. Общие положения

Переходные процессы имеют место при пуске, торможении, реверсировании электропривода (ЭП), при изменении нагрузки и условий питания двигателя.

Переходный процесс сопровождается изменением скорости ЭП, момента и тока электродвигателя и температуры его нагрева.

Режим перехода ЭП из одного установившегося состояния в другое, в процессе которого происходит изменение соответствующих видов энергии, называют переходным процессом или динамическим режимом электропривода.

При переходном процессе одновременно и взаимосвязано изменяются механическая (кинетическая), электромагнитная и тепловая энергия системы ЭП.

Состояние электропривода в любой момент времени определяется текущими значениями переменных и внешними воздействиями.

Переменные величины системы ЭП, как и переходные процессы. Подразделяют на:

- механические (моменты, силы, скорости, ускорения);
- электромагнитные (токи обмоток, ЭДС и т.д.);
- тепловые (потери мощности и энергии, температуры частей электродвигателя.)

Из-за инерционности системы ЭП любой переходный процесс происходит в течение определенного интервала времени.

Поэтому рассмотрение переходных процессов ЭП сводится к определению и анализу зависимостей изменения различных переменных системы ЭП во времени, например  $\omega=f(t)$ ,  $M=f(t)$ ,  $I=f(t)$  и т.д.

В установившемся режиме момент двигателя развиваемый на валу, уравновешен статическим моментом, действующим на валу со стороны нагрузки  $M=M_c$ ,  $M_{изб}=0$ .

Если  $M_{изб} \neq 0$ , то установившийся режим нарушается и движение электропривода будет происходить с ускорением, то есть дополнительно возникает динамическая нагрузка ( $M_{изб}=M_{дин}$ ).

Таким образом, момент электродвигателя  $M$  всегда уравновешен суммой статического  $M_c$ , и динамического  $M_{дин}$

Статический момент действует постоянно, а динамический – только в переходных режимах.

$$M = M_c + M_{дин}.$$

##### 2. Дифференциальное уравнение движения электропривода

Кинетическую энергию  $A_k$ , Дж, движущихся в системе электропривода масс можно записать в виде

$$A_k = \frac{J\omega^2}{2} \quad 23$$

где  $J$  – момент инерции всех движущихся масс относительно угловой скорости вала электродвигателя,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$\omega$  – угловая скорость вала электродвигателя,  $\text{с}^{-1}$ .

С изменением скорости изменяется во времени и кинетическая энергия системы электропривода, при этом на валу электродвигателя возникает динамическая нагрузка мощностью

$$D_{\text{дв}} = \frac{dA_{\text{дв}}}{dt} = \frac{d\left(J \frac{\omega^2}{2}\right)}{dt} = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}.$$

Учитывая, что мощность и момент связаны через угловую скорость, получаем

$$M_{\text{дин}} = \frac{P_{\text{дин}}}{\omega} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}.$$

Изменение момента целесообразно связать не со временем, а с углом поворота вала электродвигателя

$$\omega = d\alpha / dt \Rightarrow dt = d\alpha / \omega \Rightarrow$$

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}.$$

Так как  $M_{\text{изб}} = M_{\text{дин}}$ , а  $M_{\text{изб}} = M - M_c$ , то получим

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}.$$

- Дифференциальное уравнение движения электропривода.

В большинстве случаев  $J = \text{const}$ , то есть  $dJ/d\alpha = 0$ , поэтому

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

- Второй закон ньютона для вращательного движения.

$M_{\text{изб}} = 0$  – система электропривода находится в состоянии покоя или установившегося движения,  $M_{\text{изб}} > 0$  – происходит ускорение,  $M_{\text{изб}} < 0$  – замедление системы электропривода.

Изложенное справедливо и для ЭП поступательного движения, с той лишь разницей, что вместо момента инерции необходимо использовать массу инерции  $m$ , вместо моментов  $M$  – силу  $F$ , а вместо угловой скорости  $\omega$  – линейную скорость  $v$ .

Применительно к поступательному движению

$$F - F_c = m \cdot \frac{dv}{dt}.$$

3. Приведение моментов (сил) статического сопротивления и моментов (масс) инерции к валу электродвигателя

Для того, чтобы анализировать поведение ЭП как механической системы с использованием дифференциального уравнения движения ЭП, необходимо все



статические моменты и массы инерции, действующие в реальной системе ЭП, приводить к валу электродвигателя.

При этом производится пересчет сил, моментов, масс и моментов инерции относительно двигателя электропривода. Этот расчёт называется операцией приведения, а сами пересчитанные переменные и параметры – приведёнными. В этом случае реальная механическая часть электропривода заменяется расчётной моделью.

Для определения приведённого момента инерции  $J$  необходимо приравнять выражения кинетической энергии в реальной и расчётной схемах

$$\frac{J\omega^2}{2} = \frac{J_a\omega^2}{2} + \frac{J_1\omega^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega_a^2}{2} + \frac{mv^2}{2},$$

где  $J_1$  – суммарный момент инерции элементов, вращающихся со скоростью  $\omega$  (кроме двигателя),

$J_2$  – момент инерции элементов, вращающихся со скоростью барабана  $\omega_b$ .

Умножая обе части этого выражения на  $2 / \omega^2$ , получим

$$J = J_d + J_1 + J_2 \cdot \frac{\omega_b^2}{\omega^2} + m \cdot \frac{v^2}{\omega^2},$$

Введем коэффициент, учитывающий момент инерции механической передачи, а также учтем, что отношение угловых скоростей двигателя и рабочей машины есть передаточное отношение

$$k = 1,05 \dots 1,2; \quad i = \frac{\omega}{\omega_a} \Rightarrow J = k \cdot J_a + \frac{J_i}{i^2} + m \cdot \frac{v^2}{\omega^2},$$

Момент инерции простых тел можно рассчитать. Например, момент инерции цилиндра,  $m_{ц}$  с внешним  $R_{ц}$  и внутренним  $r_{ц}$  радиусами относительно продольной оси

$$J_{\phi} = m_{\phi} \cdot (R_{\phi}^2 - r_{\phi}^2) / 2.$$

Для тел сложной конфигурации и совершающих сложные движения используют методы экспериментального определения момента инерции.

Приведение моментов и сил статического сопротивления может быть выполнено на основании энергетического баланса для механической части ЭП. В общем случае энергетический баланс сводится к равенству мощности, которую развивает электродвигатель в установившемся режиме работы, когда  $M=M_c$ , мощностям нагрузок вращательного ( $M_m, \omega_m$ ) и поступательного ( $F_m, v_m$ ) движений.

С учетом КПД передачи получим

$$M_c \omega = \frac{M_{MC} \omega_M}{\eta_{n\omega}} + \frac{F_M v_M}{\eta_{nv}}$$

Разделим обе части уравнения на  $\omega$  и с учетом того, что передаточное отношение механической передачи  $i = \omega / \omega_m$ , получим

$$M_c = \frac{M_{MC}}{i \eta_{n\omega}} + \frac{F_M v_M}{\omega \eta_{nv}}$$

#### 4. Расчет продолжительности переходных процессов электропривода

Исходя из основного уравнения движения электропривода с постоянным моментом инерции можно записать

$$dt = J d\omega / M_{изб}.$$

Для определения продолжительности механического переходного процесса достаточно проинтегрировать это выражение.

Из-за сложности представления аналитической зависимости избыточного момента от скорости вращения

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

и последующего его интегрирования прибегают к приближенному решению уравнению методом конечных приращений.

Суть метода конечных приращений сводится к замене дифференциалов переменных величин  $dt$  и  $d\omega$  их конечными малыми приращениями  $\Delta t$  и  $\Delta\omega$  на каждом  $i$ -м участке разгона или торможения электропривода.

$$\Delta t_i = J \Delta\omega_i / M_{изб}.$$

При определенном малом приращении  $\Delta\omega_i$  на  $i$ -м участке избыточный момент этого участка можно считать постоянным и равным среднему значению.

Таким образом, полная продолжительность переходного процесса электропривода будет равна

$$t_{nn} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta t_i,$$

где  $n$  – число участков, на которые разбивают скоростной интервал.

С учетом предыдущего выражения это соотношение может быть представлено в виде

$$t_{nn} = J \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta\omega_i}{M_{изб.ср i}}.$$

### 5 Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения

Общие потери мощности в электродвигателе  $\Delta P$  содержат постоянную  $K$  и переменную  $V$  составляющие.

Под постоянными потерями подразумеваются потери мощности, не зависящие от нагрузки электродвигателя. К ним относятся потери в стали магнитопровода, механические потери от трения в подшипниках и вентиляционные потери. Постоянные потери мощности равны

Под переменными потерями подразумеваются потери, выделяемые в обмотках электродвигателей при протекании по ним токов, определяемых механической нагрузкой электропривода.

Переменные потери мощности в электродвигателях постоянного тока:

$$V = I_2 \cdot R.$$

В трехфазных асинхронных электродвигателях

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1'^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2'.$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – соответственно потери мощности в цепях обмоток статора и ротора.

При использовании Г-образной схемы замещения электродвигателя

$$V_1 = 3I_2'^2 R_1 \Rightarrow V_2 = M \cdot \omega_0 \cdot S.$$

$$V = 3I_2'^2 (R_1 + R_2') = 3I_2'^2 R_2' \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = V_2 \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right).$$

Переменные потери мощности, выделяющиеся в роторе асинхронного электродвигателя, могут быть определены через механические переменные и параметры

$$\text{Тогда полные переменные потери будут равны } V = M\omega_0 S \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right).$$

Большое значение определение потерь электроэнергии в переходных процессах имеет для электродвигателей, у которых динамический режим является основным.

К ним относятся электроприводы прокатных станов, подъемных кранов, строгальных станков, лифтов и т.д.

Потери энергии при пуске АД практически полностью определяются электрическими потерями энергии в обмотках, которые прямо пропорциональны квадрату силы тока

Процессы пуска и торможения связаны с потерями энергии в обмотках электродвигателя, которые оказывают существенное влияние на его нагрев. Особенно это сказывается при частых пусках и торможениях асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, которые имеют значительные пусковые токи.

При прямом пуске асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором токи статора и ротора примерно равны.

Для АД с короткозамкнутым ротором эквивалентное значение тока за период пуска составляет примерно 0,9 его пускового значения при  $\omega=0$

$$\int_0^{t_n} i_n dt = 0,9 I_n \cdot t_n.$$

$$\Delta A_n = 0,81 \Delta P_n \cdot i_n^2 \cdot t_n.$$

С учетом этого

Номинальные электрические потери мощности электродвигателя равны

$$\Delta P_n = P_n \cdot \frac{1 - \eta_n}{\eta_n (1 + \alpha)},$$

где  $\alpha$  – коэффициент равный отношению постоянных потерь мощности к номинальным переменным,  
 $\alpha=0,5 \dots 0,7$  для АД общего назначения;  
 $\alpha=0,4 \dots 1$  для крановых АД.

С учетом предыдущего соотношения расчетная формула для определения потерь энергии при пуске имеет вид

$$\Delta A_n = 0,81 \cdot P_n \cdot \frac{1 - \eta_n}{\eta_n (1 + \alpha)} \cdot i_n^2 \cdot t_n.$$

Через механические переменные и параметры потери мощности при пуске электродвигателя без нагрузки ( $M_c=0$ ) определяют по формуле

$$\Delta A_{II} = \int_0^t M \omega_0 S dt = \int_0^t M (\omega_0 - \omega) dt.$$

$$dt = \frac{J d\omega^0}{M}$$

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - S) \Rightarrow d\omega = -\omega_0 \cdot dS$$

$$dt = -\frac{J \omega_0 dS}{M} \quad 27$$

$$\Delta A_{II} = \int_{S_{нач}}^{S_{кон}} M \omega_0 S \left( -\frac{J \omega_0 dS}{M} \right) = -J \omega_0^2 \int_{S_{нач}}^{S_{кон}} S dS = -J \omega_0^2 \frac{S_{нач}^2 - S_{кон}^2}{2}$$

При пуске электродвигателя и динамическом торможении

$S_{нач}=1, S_{кон}=0$ , тогда

$$\Delta A_{II} = \frac{J \omega_0^2}{2}.$$

При торможении противовключением  $S_{нач}=2, S_{кон}=1$ , а потери энергии

$$\Delta A_{II} = 3 \frac{J \omega_0^2}{2}$$

При реверсе  $S_{нач}=2, S_{кон}=0$  и потери энергии

$$\Delta A_{II} = 4 \frac{J \omega_0^2}{2}$$

Потери энергии, а соответственно и нагрев электродвигателей в переходных режимах можно уменьшить следующими путями:

- сократив продолжительность переходного процесса;
- применив специальные электродвигатели с пониженной кратностью пускового тока и повышенными постоянными потерями мощности по отношению к переменным;
- применив ступенчатое поочередное переключение ЭП с меньшей скорости на большую (большой избыточный момент электродвигателя при пуске);
- используя специальные АД с короткозамкнутым ротором крановых серий, с повышенным скольжением (большой избыточный момент за переходный период).

### 6 Статическая устойчивость электропривода

При рассмотрении динамики различных электроприводов возникает задача оценки их устойчивой работы при возникновении внешних механических воздействий, приводящих к возникновению в системе электропривода избыточного момента (это может произойти, например, при изменении нагрузки или условий питания).

Статическую устойчивость ЭП рассматривают в том случае, если длительность избыточного момента нагрузки превышает длительность возникшего переходного процесса.

Динамическую устойчивость рассматривают при кратковременном возникновении избыточного момента.

При возникновении в системе электропривода внешнего воздействия уравнение движения можно записать в виде

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

С учетом

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} \approx \frac{\Delta M}{\Delta \omega}$$

Получим  $\Delta \omega(\beta - \beta_c) = J \frac{d(\Delta \omega)}{dt}$ , где  $\beta, \beta_c$  – жесткости механических характеристик электродвигателя и рабочей машины.

Разделяя переменные, запишем дифференциальное уравнение

$$\frac{\beta - \beta_c}{J} dt - \frac{d(\Delta\omega)}{\Delta\omega} = 0,$$

решая которое будем иметь

$$\frac{\beta - \beta_c}{J} t - \ln \Delta\omega + \ln c = 0,$$

где  $c$  – постоянная интегрирования.

Из начальных условий при  $t=0$   $\Delta\omega = \Delta\omega_{\text{нач}}$ . Тогда на основании последнего соотношения  $c = \Delta\omega_{\text{нач}}$ . Следовательно

$$\frac{\beta - \beta_c}{J} t = \ln \frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{\text{нач}}}.$$

$$\Delta\omega = \Delta\omega_{\text{нач}} e^{\frac{\beta - \beta_c}{J} t}.$$

Окончательно

Из предыдущего уравнения следует, что для обеспечения статической устойчивости необходимо, чтобы при  $t \rightarrow \infty$   $\Delta\omega \rightarrow 0$ , а это возможно при условии  $\beta_c > \beta$ .

Это соотношение служит критерием устойчивости электропривода, согласно которому работа ЭП устойчива, если жесткость механической характеристики статической нагрузки больше жесткости механической характеристики электродвигателя в точке их пересечения.

#### 7 Динамическая устойчивость электропривода

При работе ЭП момент статического сопротивления перегрузки  $M_{\text{сп}}$ , действующий со стороны нагрузки, может превышать максимально допустимый момент электродвигателя  $M_1$  в течение небольшого интервала времени, общая длительность которого меньше длительности возникшего электромеханического переходного процесса.

При динамической устойчивости работоспособность ЭП сохраняется за счет дополнительного действия кинетической энергии движущихся масс электропривода при формально статической неустойчивости

$$M_{\text{сп}} > M = \lambda \cdot M_n.$$

Рабочий участок механической характеристики аппроксимируется прямой. В этом случае при ударной нагрузке увеличение момента электродвигателя происходит по экспоненциальному закону

$$M = M_0 + (M_{\text{сп}} - M_0) \cdot (1 - e^{-t/T_m}),$$

где  $M_0$  – момент электродвигателя при работе до перегрузки, Н·м;

$T_m$  – электромеханическая постоянная времени электропривода, с.

Для электропривода с асинхронным электродвигателем

$$T_m = J \cdot \omega_0 \cdot S_{(n)} / M_n,$$

где  $S_n$  – скольжение АД при номинальном моменте нагрузки.

Момент электродвигателя достигает максимального значения по истечении некоторого допустимого времени перегрузки.

$$M = M_0 + (M_{\text{сп}} - M_0) \cdot (1 - 2e^{-t/T_m}),$$

$$M = \lambda \cdot M_n.$$

$$t_{on} = T_m \ln \frac{M_{cn} - M_o}{M_{cn} - \lambda \cdot M_n}.$$

Если фактическая продолжительность приложения ударной нагрузки  
то работа электропривода динамически устойчива.

Если же  $t_{нз} \geq t_{он}$ , то работоспособность ЭП нарушается.

## 1. 9 Лекция №14, 15, 16, 17 ( 8 часов).

**Тема: «Теория нагрева и расчёт необходимой мощности электродвигателя»**

### 1.9.1 Вопросы лекции:

1. Основные положения
2. Уравнения теплового баланса, нагрева и охлаждения электродвигателя.
3. Способы определения постоянного нагревания
4. Факторы, определяющие мощность электродвигателей

### 1.9.2 Краткое содержание вопросов:

#### 1. Основные положения

Мощность электродвигателей выбирается, исходя из необходимости обеспечить выполнение заданной работы электропривода, при соблюдении нормального теплового режима и допустимой механической перегрузки двигателя.

Поэтому выбор мощности двигателя производится исходя из основного условия: обеспечения его номинального нагрева для конкретного режима работы.

Правильный выбор электродвигателей имеет большое значение, так как определяет первоначальные затраты, а так же величину эксплуатационных расходов.

Применение двигателей недостаточной мощности приведет к возникновению аварий и преждевременному выходу их из строя. В свою очередь использование электродвигателей завышенной мощности ухудшает экономические показатели установки, ведет к ее удорожанию (увеличивается стоимость электропривода) и большим потерям энергии (за счет снижения КПД, коэффициента мощности).

Затем мощность двигателя в зависимости от его режима работы и характера нагрузки уточняется по дополнительным условиям:

- обеспечению пуска электропривода с учетом возможного снижения напряжения;
- перегрузочной способности (обеспечение статической и динамической устойчивости ЭП);
- перегреву при затяжном пуске;
- частоте включений.

Основой расчета мощности электродвигателя в любом режиме служит нагрузочная диаграмма, показывающая зависимость выбранного показателя нагрузки электродвигателя от времени:

$$M = f(t); P = f(t); I = f(t).$$

Нагрузочные диаграммы электропривода получают расчетным путем или экспериментально.

## 2 Уравнения теплового баланса, нагрева и охлаждения электродвигателя

В тепловом отношении электрическая машина – сложный объект: она неоднородна по материалу, имеет рассредоточенные внутренние источники тепла, интенсивность которых зависит от режима, от режима работы также зависит направление тепловых потоков, теплоотдача зависит от скорости и т.п.

Условия нагревания отдельных частей электрической машины различны (большому нагреву подвергаются те части обмотки, которые находятся во внутренних областях машины).

Выделение тепла при различных режимах также неодинаково, поэтому направление тепловых потоков внутри машины не остается постоянным. Чаще всего тепло при холостом ходе тепло передается от более нагретой стали двигателя к менее нагретым его обмоткам, а при нагрузке обмотки по сравнению со сталью обычно бывают более нагретыми, чему отвечает обратное направление тепловых потоков.

Все эти обстоятельства усложняют тепловые расчеты.

В целях упрощения решения принимают ряд допущений:

- отдельные части электрических машин однородны с бесконечно большой теплопроводностью, благодаря чему температура всех его точек одновременно достигает одинакового значения температуры;
- теплоту, отдаваемую излучением, ввиду малости не учитывают;
- теплоотдача электродвигателя пропорциональна первой степени превышения температуры электродвигателя над температурой окружающей среды;
- нагрузка на валу электродвигателя, потери мощности и температура окружающей среды в момент рассмотрения неизменны.
- В электродвигателе в виде теплоты выделяется энергия  $\Delta P dt$ , одна часть которой  $c dt$  будет затрачена на нагрев самого двигателя, а другая  $A dt$  будет отдана в окружающую среду. Таким образом справедливо равенство

Разделим переменные

$$\Delta P dt = A \tau dt + c d\tau, \text{ Дж}$$

$$(\Delta P - A \tau) dt = c d\tau \Rightarrow dt = \frac{c \cdot d\tau}{\Delta P - A \tau}.$$

$$t = -\frac{c}{A} \ln(\Delta P - A \tau) + K$$

После интегрирования получим

Постоянную интегрирования К получим из условия, что при  $t=0$ ,  $\tau=\tau_0$ :

$$K = \frac{c}{A} \ln(\Delta P - A \tau_0).$$

Подставив полученное значение К в предыдущее уравнение получим

$$t = -\frac{c}{A} \ln(\Delta P - A \tau) + \frac{c}{A} \ln(\Delta P - A \tau_0) = -\frac{c}{A} \ln \frac{\Delta P - A \tau}{\Delta P - A \tau_0}.$$

Решим уравнение относительно  $\tau$ :

$$-\frac{c}{A} t = \ln \frac{\Delta P - A \tau}{\Delta P - A \tau_0}.$$

Потенцируя левую и правую часть получим

$$e^{-\frac{A}{c} t} = \frac{\Delta P - A \tau}{\Delta P - A \tau_0}$$

Отсюда

$$(\Delta P - A_0)e^{-\frac{A}{c}t} = \Delta P - A\tau; (\Delta P - A\tau_0)e^{-\frac{A}{c}t} - \Delta P = -A\tau;$$

$$\tau = \frac{\Delta P}{A} \left( 1 - e^{-\frac{A}{c}t} \right) + \tau_0 e^{-\frac{A}{c}t}. \quad \tau = -\frac{\Delta P}{A} e^{-\frac{A}{c}t} + \frac{A\tau_0}{A} e^{-\frac{A}{c}t} + \frac{\Delta P}{A};$$

Обозначим  $\tau_y = \frac{\Delta P}{A}$  -установившееся превышение температуры;

$T_n = \frac{c}{A_n}$  -постоянная времени нагревания,

$$\tau = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T_n}}.$$

Постоянная времени нагрева  $T_n$  характеризует скорость нагревания двигателя.

Постоянную нагревания можно представить как время, в течение которого двигатель достиг бы установившейся температуры, если бы отдача тепла в окружающую среду отсутствовала.

В реальных условиях при наличии теплоотдачи температура двигателя за время  $T_n$  повысится лишь до значения

$$\tau = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{T_n}{T_n}} \right) = \tau_y (1 - e^{-1}) = 0,632\tau_y.$$

### 3 Способы определения постоянной нагревания

Постоянная времени нагрева может быть определена следующими методами:

- по значению  $\tau_{уст}$ ;
- по методу касательных;
- по методу трех температур.

В реальных условиях, как и показывают многочисленные эксперименты, кривая нагрева электродвигателя отличается от теоретической, выведенной с рядом допущений. В начале процесса нагрева действительное превышение температуры электродвигателя несколько больше, чем это предусматривается теоретической кривой. Лишь при превышениях температуры  $\tau=0,5\tau_{уст}$  реальная кривая приближается к теоретической экспоненциальной.

Соответственно и постоянная времени реального процесса нагрева электродвигателя непостоянна. Она имеет наименьшее значение в начале процесса и наибольшее в конце.

Средняя постоянная времени нагрева в минутах может быть рассчитана по соотношению

$$T_n = 6 \frac{m \tau_n \eta_n}{P_n (1 - \eta_n)}.$$

Ухудшение теплоотдачи электродвигателя в неподвижном состоянии по отношению к теплоотдаче при вращении учитывают коэффициентом  $\beta_0$

$$\beta_0 = A_0 / A_n \Rightarrow T_0 = T_n / \beta_0.$$



Значение коэффициента  $\beta_0$  для электродвигателей различного исполнения составляет:

- закрытого с посторонней принудительной вентиляцией – 0,9...1;
- закрытого с наружным охлаждением от собственного вентилятора – 0,45...0,55;
- защищенного с самовентиляцией – 0,25...0,35.

#### 4 Факторы, определяющие мощность электродвигателей

В номинальном режиме работы потери мощности  $\Delta P_n$  электродвигателя связаны с мощностью на валу  $P_n$  через КПД

$$\Delta P_n = P_n \cdot \frac{1 - \eta_n}{\eta_n(1 + \alpha)},$$

$$\tau_{yn} = \Delta P_n / A_n \Rightarrow \Delta P_n = A_n \cdot \tau_{yn} \Rightarrow P_n = A_n \cdot \tau_{yn} \cdot \eta_n \cdot (1 + \alpha) / (1 - \eta_n).$$

Основные параметры, влияющие на мощность электродвигателя по нагреву:

- теплоотдача электродвигателя при нагрузке  $A_n$ ;
- нормированное (предельно допустимое) превышение температуры, зависящее от нагревостойкости изоляции электродвигателя;
- КПД электродвигателя.

Для повышения мощности электродвигателя при сохранении его габаритов, а следовательно и расхода активных материалов необходимо:

- увеличивать теплоотдачу электродвигателя при нагрузке  $A_n$ ;
- повышать нормированное (предельно допустимое) превышение температуры, зависящее от нагревостойкости изоляции электродвигателя;
- Повышать КПД электродвигателя.

Для увеличения теплоотдачи корпус электродвигателя закрытого исполнения делают ребристым, а у электродвигателей защищенного исполнения предусматривают вентиляционные каналы. Применяют принудительный обдув от собственного вентилятора, а для крупных электродвигателей – от отдельного специально для этого предназначенного.

Все изоляционные материалы, идущие на изготовление электрических машин, подразделяют на 5 классов нагревостойкости: А, Е, В, F, Н.

Каждый класс изоляции характеризуется предельно допустимой температурой нагрева, до которой изоляция не теряет своих диэлектрических свойств.

Номинальную нагрузку электродвигателя более рационально устанавливать по нормированному превышению температуры.

Если температура окружающей среды ниже 40<sup>0</sup>С, то нагрузку электродвигателя увеличивать не следует.

Объясняется это тем, что при большей разности температур между температурой электрической машины и температурой окружающей среды будет происходить не тепловой износ изоляции, а физический, который вызовет ее растрескивание. Тепловой износ изоляции имеет место лишь при температурах электрической машины выше нормированного значения.

#### Температурная характеристика классов изоляции

Класс изоляции	А	Е	В	F	Н	С
Предельно допустимая температура, °С	105	120	130	155	180	180
Предельно допустимое превышение температуры, °С	60 <sup>33</sup>	75	80	100	125	125

Согласно известному правилу Монзингера превышение температуры обмотки статора над номинальным значением на каждые  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $13^{\circ}\text{C}$  соответственно для классов изоляции В и F сокращает срок службы изоляции в два раза.

### **1. 10 Лекция №18, 19 ( 4 часа).**

**Тема:** «Автоматическая защита электроприводов»

#### **1.10.1 Вопросы лекции:**

1. Назначение и классификация аппаратуры управления и защиты.
2. Аппаратура защиты.
3. Автоматические выключатели.
4. Предохранители.
5. Тепловые реле

#### **1.10.2 Краткое содержание вопросов:**

##### *1 Назначение и классификация аппаратуры управления и защиты*

Составной частью любой технологической электроустановки является управляющее устройство, назначение которого управлять процессом преобразования электрической энергии в другие виды и защищать технологическую установку от аварийных режимов работы.

К силовоточной аппаратуре относят коммутационную и регулировочную аппаратуру силовых цепей:

- выключатели (в том числе автоматические);
- предохранители;
- контакторы, магнитные и полупроводниковые пускатели;
- реостаты;
- реакторы и т.п.

Слаботочная аппаратура, используемая в цепях управления, включает в себя:

- контактные и бесконтактные реле;
- кнопки и кнопочные станции;
- первичные измерительные преобразователи (датчики) электрических и неэлектрических величин;
- аппаратуру сигнализации.

##### *2. Аппаратура защиты*

К основным аварийным ситуациям относятся:

- перегрузка рабочей машины,
- работа в неполнофазном режиме;
- работа при пониженном напряжении;
- работа при несимметрии напряжения;
- затяжной пуск;
- ухудшение охлаждения.

##### *3 Автоматические выключатели*

Автоматические выключатели совмещают защитную и коммутационную функции и являются аппаратами многократного действия. Защитные функции выполняют расцепительные устройства, которые могут быть тепловыми, электромагнитными и полупроводниковыми.

Для защиты электродвигателей от этих аварийных режимов используются различные аппараты защиты. К наиболее распространенным защитным аппаратам относятся автоматические выключатели, плавкие предохранители, тепловые реле.

Расцепитель срабатывает при определенных токах, на которые рассчитаны калиброванные нагревательные элементы. Тепловые расцепители предназначены в основном для защиты от перегрузок.

Автоматические выключатели могут быть оснащены одним или несколькими расцепителями. Некоторые из них имеют возможность регулирования тока уставки.

Автоматические выключатели могут быть оснащены одним или несколькими расцепителя. Некоторые из них имеют возможность регулирования тока уставки.

#### 4. Предохранители

Плавкий предохранитель - это аппарат, автоматически отключающий электрическую цепь, в которую он включен, при коротких замыканиях или больших токовых перегрузках.

Действие предохранителя основано на том, что при прохождении тока по плавкой вставке она нагревается и, если сила тока превысит допустимый предел, вставка расплавляется и отключает нагрузку.

Разборные предохранители допускают замену элементов после срабатывания на месте эксплуатации, у неразборных предохранителей замене подлежит вся плавкая вставка.

По степени закрытия плавкого элемента и, следовательно, по внешнему эффекту, возникающему при отключении тока, различают предохранители: с открытым плавким элементом с полужакрытым патроном и с закрытым патроном.

$$U_{н.пр.} = U_{н.уст.}; I_{в.} \geq I_{р.};$$

$I_{в.} \geq \frac{I_{max.}}{\alpha}$ ,  
 $\alpha$  - коэффициент, зависящий от пускового режима защищаемых двигателей,  $\alpha=1,6...2,5$ .

$$I_{н.вст.} = \sum_{i=1}^m I_{ni} + \frac{I_{пуск. max}}{\alpha},$$

$\sum_{i=1}^m I_{ni}$  - сумма номинальных токов  $m$  электродвигателей, работающих одновременно в момент включения двигателей наибольшей мощности

#### 5 Тепловые реле

Тепловые реле предназначены для защиты электродвигателей от перегрузок. Устройство тепловых реле аналогично устройству тепловых расцепителей автоматических выключателей.

В некоторых тепловых реле, например типа ТРН, предусмотрен регулятор тока уставки, позволяющий изменить ток уставки в небольших пределах от 0,8 до 1,25 номинального тока.

Кроме двухэлементных тепловых реле (ТРН) промышленностью выпускается несколько типов тепловых реле: одноэлементные (ТРП), трехэлементные (РТЛ, РТТ) для совместного использования с пускателями.

Выбор тепловых реле производится по условиям:

$$U_{н.р.} \geq U_{н.у.};$$

$$I_{н.р.} \geq I_{н.у.};$$

$$I_{н.тр.} \geq I_{р. max}.$$

$I_{н.р.}, I_{н.т.р.}$  - номинальный ток теплового реле и

теплового расцепителя соответственно, А.

### **1. 11 Лекция №20, 21 ( 4 часа).**

**Тема: «Автоматическое управление электроприводами»**

#### **1.11.1 Вопросы лекции:**

1. Аппаратура управления.
2. Магнитные пускатели.
3. Реле управления.
4. Датчики скорости.
5. Датчики положения.

#### **1.11.2. Краткое содержание вопросов:**

##### *1 Аппаратура управления*

Для выработки законов управления двигателем системы управления электроприводом содержат управляющие элементы:

1. Задающие (программные) устройства, определяющие уровень и характер изменения регулируемой координаты.
2. Датчики регулируемых координат и технологических параметров, дающие информацию о ходе технологического процесса и работе самого электропривода.
3. Регуляторы и функциональные преобразователи, вырабатывающие сигнал управления на основе сигналов задающих устройств и датчиков координат и параметров.
4. Согласующие элементы, позволяющие соединить в единую систему все указанные за счёт согласования их выходных и входных сигналов по роду тока, уровням и виду сигналов.

К аппаратуре управления могут быть отнесены рубильники, выключатели, переключатели, кнопочные станции, магнитные пускатели, реле управления, различного рода датчики, конечные выключатели, реостаты и другие аппараты.

##### *2 Магнитные пускатели*

Магнитный пускатель представляет комплексный аппарат, предназначенный главным образом для управления трёхфазными потребителями ( в частности электродвигателями) – подключения к сети (отключения), обеспечения тепловой защиты и сигнализации о режимах работы.

Магнитный пускатель предназначен для частых дистанционных коммутаций силовых цепей.

Неподвижную часть магнитопровода 5 называют сердечником, подвижную – якорем. Якорь механически соединен с контактами 2. При включении электрический ток проходит по катушке, создает магнитное поле, которое притягивает якорь к сердечнику 5, и тем самым замыкает контакты 2 и 3 пускателя ; при отключении якорь под действием возвратных пружин 7 (а в некоторых магнитных пускателях под действием собственного веса) отходит от сердечника, и контакты размыкаются.

В сельском хозяйстве применяют магнитные пускатели общепромышленного назначения, например серий ПМЕ, ПА, ПМЛ.

Пускатели ПМЛ имеют широкое применение. В настоящее время выпускаются только с первой величины по пятую.

Изготавливаются по лицензии и технологии фирмы Telemecanique Electrique (Франция). Отличаются современной конструкцией, допускающей смену управляющей катушки без нарушения регулировки пускателя.

Под номинальным током пускателя понимают наибольший ток продолжительного режима работы, который определяет условия допустимого нагрева элементов главной цепи.

Устанавливается на фронтальной поверхности пускателя и имеет с ним механическую связь.

Позволяет при необходимости увеличить количество дополнительных контактов.

Приставки выпускаются в нескольких модификациях по времени срабатывания и имеют плавную регулировку.

По принципу действия относятся к пневматическим реле. Устанавливается на фронтальной поверхности пускателя и имеет с ним механическую связь, при этом применить приставку ПКЛ нельзя.

Пускатели ПМЛ могут комплектоваться так же тепловыми реле РТЛ, которые предназначены для защиты управляемых трехфазных асинхронных электродвигателей от перегрузок недопустимой продолжительности, в том числе при обрыве одной из фаз.

Магнитные пускатели могут осуществить нулевую защиту потребителей. Нулевая защита действует при исчезновении или резком снижении напряжения питающей сети. В подобных режимах электродвигатель должен отключаться от сети и оставаться в этом состоянии и при восстановлении напряжения. Чтобы его включить, нужно нажать на кнопку пуск.

### *3 Реле управления*

Реле применяется для коммутаций слаботочных цепей и действует аналогично контактору. Оно используется в качестве датчиков тока и напряжения, как промежуточный элемент для передачи команд из одной цепи в другую и размножении сигналов, как датчик времени, как выходной элемент различных датчиков координат электропривода и как датчик технологических параметров рабочих машин и механизмов.

Вихревые токи в медном кольце замедляют уменьшение (увеличение) магнитного потока, и значит и возвращение якоря в исходное положение. Поскольку контакты реле коммутируют небольшие токи (5 – 10 А), они обычно не имеют дугогасительных камер.

В реле с пневматическим замедлением выдержка времени обеспечивается временем заполнения камеры воздухом.

В электронных реле времени используются полупроводниковые элементы (транзисторы) и конденсаторы. Время заряда или разряда конденсаторов обеспечивает выдержку времени переключая транзисторы из закрытого состояния в открытое.

### *4 Датчики скорости*

Скорость двигателей постоянного и переменного тока определяет их движущую силу. Тогда, используя ЭДС двигателя в качестве измеряемой или контролируемой переменной, можно получить информацию о скорости электропривода.

Они могут быть как аналоговыми, так и цифровыми.

- Электромеханическое реле контроля скорости (РКС), работающего по принципу асинхронного двигателя, используется при автоматизации процесса торможения, когда требуется отключения двигателя от сети после снижения его скорости до нуля.

Реле срабатывает при определённой скорости двигателя в зависимости от положения движка реостата R и своими контактами осуществляет коммутацию цепей управления.

- Импульсный индукционный датчик скорости является дискретным датчиком. Это зубчатый диск 1, соединённый с валом двигателя или рабочей машины.

Изменяющийся поток индуцирует в обмотке 3 ЭДС, частота которой пропорциональна числу зубцов и скорости вращения диска. Эта ЭДС через конденсатор подаётся на вход усилителя, который формирует импульсы с частотой, пропорциональной измеряемой скорости вращения.

Далее эти импульсы при помощи цифрового блока преобразуются в двоичное число. При необходимости этот переменный по частоте сигнал можно преобразовать в

напряжение постоянного тока, для использования в аналоговых системах управления электроприводом.

#### *5 Датчики положения*

Они применяются для получения электрического сигнала, пропорционального положению рабочего механизма или вала двигателя.

Датчики могут быть аналоговыми и цифровыми. Это путевые и конечные выключатели, сельсины, вращающиеся трансформаторы, цифровые фотоэлектрические датчики и др.

Под конечными (путевыми, концевыми) выключателями и переключателями понимают аппараты, на которые воздействует непосредственно сам механизм во время его передвижения. Они предназначены для ограничения движения узлов или механизмов (например, мобильных кормораздатчиков), а также для изменения направления их движения. Конечные выключатели могут быть рычажными или шпиндельными.

В схемах автоматического управления сельскохозяйственным производством все более широко применяются бесконтактные элементы положения механизмов, которые не имеют подвижных частей, не подвержены влиянию внешней среды, и в меньшей степени нуждаются в обслуживании.

У них отсутствует электрический и механический контакты, благодаря чему обеспечивается высокая надежность, быстродействие, долговечность, независимость срока службы от числа срабатываний, герметизация с помощью эпоксидных компаундов, что позволяет применять их при наличии пыли, влаги, вибраций. Эти преимущества позволяют заменять ими контактные путевые переключатели и таким образом повышать надежность схем управления.

### **1. 12 Лекция №22,23 ( 4 часа).**

#### **Тема: «Оценка и выбор электропривода»**

##### **1.12.1 Вопросы лекции:**

1. Методика выбора электропривода
2. Основные понятия и определения.
3. Выбор электропривода для различных систем.

##### **1.12.2 Краткое содержание вопросов:**

###### *1 Методика выбора электропривода*

Выбор двигателя для проектируемого электропривода включает в себя:

- выбор конструкции (исполнения) двигателя;
- выбор двигателя по скорости;
- выбор двигателя по мощности.

При выборе двигателя по конструктивному исполнению необходимо учитывать режим работы электропривода и условия эксплуатации оборудования, под которым и следует понимать условия окружающей среды (содержание пыли, коррозионно-активных элементов, взрыво- и пожароопасных смесей и т.п.), воздействие климатических факторов и т.д.

Выбор двигателя по конструктивному исполнению состоит в применении в проектируемом электроприводе двигателя, подходящего по способу защиты от воздействия окружающей среды (закрытый, защищенный и т.д.), способу вентиляции (с самовентиляцией, с независимой вентиляцией и т.д.), по наличию или отсутствию встроенного тахогенератора и другим конструктивным особенностям, которые указываются в каталогах и справочниках на электрические машины.

Выбор двигателя по скорости должен при известной кинематической схеме рабочей машины обеспечить требуемые скорости технологического процесса. При этом предварительно должен быть намечен способ регулирования скорости двигателя,

обеспечивающий наилучшие технико-экономические показатели.

Основной скоростью движения электропривода будем называть скорость на естественной механической характеристике при номинальных напряжении, частоте, потоке двигателя. Так, если рабочий ход (при пониженной скорости) выполняется на естественной характеристике, а возвратный ход (на повышенной скорости) - при ослабленном потоке, то основной скоростью будет скорость рабочего хода, а выбранная система электропривода обеспечивает двухзонное регулирование скорости. При однозонном регулировании скорости (реостатном, якорном) основной скоростью будет скорость на естественной характеристике. При реостатном регулировании на основной скорости будет выполняться возвратный ход, а рабочий ход - на пониженной скорости с введенными резисторами в силовой цепи.

Выбор двигателя по мощности проводится, как правило, по критерию нагрева с последующей проверкой по перегрузочной способности. Для использования критерия нагрева необходимо знать нагрузки двигателя, которые зависят и от параметров двигателя. В связи с этим приходится производить сначала предварительный выбор двигателя, рассчитывать для него нагрузки при заданных условиях работы электропривода, а затем проверять предварительно выбранный двигатель по критериям нагрева, перегрузочной способности и по условиям пуска.

Предварительный расчет мощности двигателя производится приближенно, поскольку на данном этапе проектирования неизвестна полная нагрузка двигателя. На основе исходных данных могут быть достаточно близко рассчитаны лишь статические нагрузки. Динамические же нагрузки, которые в значительной степени зависят от параметров двигателя, пока еще не известны.

Наиболее простой метод предварительного расчета мощности двигателя основан на учете лишь статических нагрузок. При этом для эквивалентирования нагрузки нескольких участков нагрузочного графика (различающихся как значениями сил сопротивления, так и скоростями движения рабочей машины) используется метод среднеквадратичного момента. Из сказанного ясно, что такой расчет не может дать точного результата, получается лишь ориентировочное значение мощности двигателя, подлежащее в дальнейшем проверке.

При задании допустимого ускорения исполнительного органа рабочей машины представляется возможным на стадии предварительного расчета мощности двигателя определить не только статические нагрузки, но и часть динамических нагрузок электропривода, обусловленных изменениями скорости движущихся масс рабочей машины.

## *2 Основные понятия и определения*

Надёжность — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.<sup>[1]</sup>

Интуитивно надёжность объектов связывают с недопустимостью отказов в работе. Это есть понимание надёжности в «узком» смысле — свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. Иначе говоря, надёжность объекта заключается в отсутствии непредвиденных недопустимых изменений его качества в процессе эксплуатации и хранения. Надёжность тесно связана с различными сторонами процесса эксплуатации. Надёжность в «широком» смысле — комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать в себя свойства безотказности.

Для количественной оценки надёжности используют так называемые единичные показатели надёжности (характеризуют только одно свойство надёжности) и комплексные показатели надёжности (характеризуют несколько свойств надёжности)

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Ремонтопригодность — свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Долговечность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность от начала эксплуатации до наступления предельного состояния, то есть такого состояния, когда объект изымается из эксплуатации.

Сохраняемость — свойство объекта сохранять работоспособность в течение всего периода хранения и транспортировки.

### *3 Выбор электропривода для различных систем.*

При подборе центробежных насосов для конкретных установок необходимо знать зависимость одних параметров от других. В качестве независимого переменного параметра при построении характеристик принимают подачу насоса  $Q$ , так как она непосредственно связана с расходом жидкой среды в системе трубопроводов данной насосной установки. Изменение же остальных параметров насоса зависит от подачи.

Статической характеристикой сети (трубопровода) называется зависимость между расходом жидкости через трубопровод и напором  $H$ , который требуется для обеспечения этого расхода. Она описывается уравнением:

где:  $H_{ст}$  - статическая составляющая напора, в нашем случае равна нулю,  $R$  - сопротивление сети, не является постоянной величиной, изменяется в зависимости от состояния сети от  $100R_б$  при отсутствии потребления воды из сети до  $R_б$  при максимуме потребления воды из сети, здесь  $R_б$  = - базовое сопротивление сети (сопротивление сети при максимальном потреблении воды из нее).

При отсутствии потребления воды из сети, сопротивление сети имеет значение  $100R_б$  т.к. в этом случае идет сток воды через обратный трубопровод, а также имеются утечки воды (например, в неплотных соединениях и т.д.).

Статической (напорной) характеристикой насоса называется зависимость напора  $H$  от подачи насоса  $Q$  при постоянной частоте вращения  $n$  рабочего колеса:

где:  $H_0$  - напор, соответствующий нулевой подаче, м;  $C$  - коэффициент, определяемый как , здесь  $H_1 = 25,7$  м и  $Q_1 = 60$  м<sup>3</sup>/ч - некоторые точки на характеристике насоса;  $n$ ,  $n_{ном}$  - соответственно текущая и номинальная скорость вращения насоса.

Характеристики строим для  $n_{ном} = 2900$  об/мин;  $n = 2489$  об/мин;  $n = 1993$  об/мин, что необходимо для поддержания напора соответственно при максимальном потреблении воды из сети, потреблению воды из сети равному 50%, максимальному потреблению воды из сети.

## **1. 13 Лекция №24 ( 2 часа).**

### **Тема: «Расчёт электрической сети при питании электроприводов»**

#### **1.13.1 Вопросы лекции:**

1. Выбор электропривода для различных систем
2. Расчет площади сечения проводников.

#### **1.13.2 Краткое содержание вопросов:**

##### *1 Выбор электропривода для различных систем*

При подборе центробежных насосов для конкретных установок необходимо знать зависимость одних параметров от других. В качестве независимого переменного



параметра при построении характеристик принимают подачу насоса  $Q$ , так как она непосредственно связана с расходом жидкой среды в системе трубопроводов данной насосной установки. Изменение же остальных параметров насоса зависит от подачи.

Статической характеристикой сети (трубопровода) называется зависимость между расходом жидкости через трубопровод и напором  $H$ , который требуется для обеспечения этого расхода. Она описывается уравнением:

где:  $H_{ст}$  - статическая составляющая напора, в нашем случае равна нулю,  $R$  - сопротивление сети, не является постоянной величиной, изменяется в зависимости от состояния сети от  $100R_б$  при отсутствии потребления воды из сети до  $R_б$  при максимуме потребления воды из сети, здесь  $R_б$  = - базовое сопротивление сети (сопротивление сети при максимальном потреблении воды из нее).

При отсутствии потребления воды из сети, сопротивление сети имеет значение  $100R_б$  т.к. в этом случае идет сток воды через обратный трубопровод, а также имеются утечки воды (например, в неплотных соединениях и т.д.).

Статической (напорной) характеристикой насоса называется зависимость напора  $H$  от подачи насоса  $Q$  при постоянной частоте вращения  $n$  рабочего колеса:

где:  $H_0$  - напор, соответствующий нулевой подаче, м;  $C$  - коэффициент, определяемый как , здесь  $H_1 = 25,7$  м и  $Q_1 = 60$  м<sup>3</sup>/ч - некоторые точки на характеристике насоса;  $n$ ,  $n_{ном}$  - соответственно текущая и номинальная скорость вращения насоса.

Характеристики строим для  $n_{ном} = 2900$  об/мин;  $n = 2489$  об/мин;  $n = 1993$  об/мин, что необходимо для поддержания напора соответственно при максимальном потреблении воды из сети, потреблению воды из сети равному 50%, максимальному потреблению воды из сети.

## *2 Расчет площади сечения проводников.*

Одним из важнейших условий соответствия любой электропроводки требованиям надежности и безопасности является верный выбор проводов и кабелей по площади поперечного сечения их жил.

Величина этого параметра (в дальнейшем, упрощенно - сечения), как видно из формулы на фото жилы провода в поперечном разрезе имеет прямую зависимость от ее диаметра  $D$ . Таким образом, предельно упростив, можно сказать, что толще жила, тем большим будет и ее сечение.

Расчет сечения жил проводов должен осуществляться на этапе проектирования, исходя прежде всего, из величин предполагаемых максимальных токов, потребляемых нагрузкой, протяженности питающих линий, материалов из которого они изготовлены и рабочего напряжения.

Несоответствие сечений жил перечисленным выше условиям наиболее опасно в случае их занижения: результатом недопустимого нагрева проводов это может стать повреждение, пробой их изоляции, что чревато уже возникновением пожароопасной ситуации.

Несмотря на куда более меньшую опасность использования проводов и кабелей с необоснованно завышенными сечениями жил, такое несоответствие, также имеет свои недостатки: в первую очередь - это увеличение сметных затрат на материалы и возможные сложности при монтаже и подключениях к зажимам конечных электроприемников.

Мощность и рабочее напряжение нагрузки. В предложенной таблице указаны максимально допустимые токовые значения, соответствующие сечениям стандартного ряда медных и алюминиевых жил кабелей и проводов. Из таблицы видно, что медные жилы, обладая большей удельной проводимостью, способны выдерживать большие токовые нагрузки, чем алюминиевые того же сечения.

Медные жилы проводов и кабелей					Алюминиевые жилы проводов и кабелей				
Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Напряжение 220 В		Напряжение 380 В		Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Напряжение 220 В		Напряжение 380 В	
	Ток, А	Мощн, кВт	Ток, А	Мощн, кВт		Ток, А	Мощн, кВт	Ток, А	Мощн, кВт
1,5	19	4,1	16	10,5	2,5	22	4,4	19	12,5
2,5	27	5,9	25	16,5	4	28	6,1	23	15,1
4	38	8,3	30	19,8	6	36	7,9	30	19,8
6	46	10,1	40	26,4	10	50	11	39	25,7
10	70	15,4	50	33	16	60	13,2	55	36,3
16	85	18,7	75	49,5	25	85	18,7	70	46,2
25	115	25,3	90	59,4	35	100	22	85	56,1
35	135	29,7	115	75,9	50	135	29,7	110	72,6
50	175	38,5	145	95,7	70	165	36,3	140	92,4
70	215	47,3	180	118,8	95	200	44	170	112,2
95	260	57,2	220	145,2	120	230	50,6	200	132
120	300	66	260	171,6					

Кроме того, очень важной составляющей расчета является рабочее напряжение нагрузки; провода одинаковых сечений жил при напряжении 380 В. способны длительно “держат” токи больших значений, чем при 220 В.

При включении однофазной (несимметричной) нагрузки в трехфазную питающую сеть, сечение нулевого рабочего проводника должно быть не меньшим сечений жил фазных проводников.

Протяженность и температура среды эксплуатации питающих линий. Для питающих линий большой протяженности для снижения падения напряжения в проводах, выбирать сечение рекомендуется с некоторым “запасом” - в сторону увеличения, начиная от ближайших значений существующего стандартного ряда.

Для увеличения срока службы изоляции кабелей, в случае их эксплуатации при внешней температуре, превышающей 40°, сечение жил, также должно быть увеличено минимум на 20%.

Характер нагрузки. Не менее важно при расчетах учитывать и характер нагрузки. Так, при наличии преобладающей реактивной нагрузки (прежде всего, устройств с электроприводом), часть электроэнергии расходуется на образование электромагнитных полей, что увеличивает полную электрическую мощность устройства.

Например, полная мощность электродрели мощностью 600 Вт с  $\cos \varphi$  равным 0,8 (указывается на шильдике прибора) составит уже 750 Вт ( $600/0,8$ ), что, конечно тоже должно быть учтено при расчетах сечений питающих проводов.

Говоря о нагрузке, содержащей электропривод нельзя не упомянуть о высоких пусковых токах электродвигателей. Возникающие при запуске в питающей цепи “стартовые” токи могут превышать в несколько раз номинальные.

Поэтому, несмотря на их кратковременность, выбор сечения жил питающих электродвигательную нагрузку проводов следует сделать так-же, с некоторым запасом; определив соответствующее току нагрузки и, взяв большее ближайшее значение из стандартного ряда .

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### 2.1 Лабораторная работа №1 ( 2 часа).

Тема: «Тарировка балансировочного механизма»

#### 2.1.1 Цель работы: Знакомство с методикой проведения лабораторных работ

#### 2.1.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с устройством универсального лабораторного стенда аудитории
2. Методика тарировки весового механизма для измерения вращающего момента
3. Правила при выполнении лабораторных работ

### **2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Фронтальный универсальный лабораторный стенд
2. Мультимедиапроектор

### **2.1.4 Описание (ход) работы:**

Групповые лабораторные работы организованы таким образом, что вся группа или подгруппа студентов, находящаяся в аудитории, изучает один и тот же объект и решает одну и ту же задачу по исследованию его свойств коллективно. При этом каждый выполняет свою часть общей работы под наблюдением всех остальных студентов, присутствующих в аудитории. Конечный результат решения поставленного в работе задания есть итог труда каждого участника эксперимента. Такая постановка работы в аудитории прививает выпускникам ВУЗа навыки работы в трудовых и творческих коллективах (отделах, бюро и пр.), решающих общие производственные, технические или научные задачи и проблемы. Работы проводятся с использованием универсального лабораторного стенда.

#### **Устройство универсального лабораторного стенда аудитории 210**

Универсальный лабораторный стенд размещён на фронтальной стене аудитории и представляет собой каркас с расположенными на нём панелями приборов и оборудования, набор которых достаточен для выполнения любой из лабораторных работ цикла. Выводы приборов и оборудования осуществлены на клеммы пронумерованных панелей, с помощью которых через соединительные провода с наконечниками приборы соединяются в схемы. Для соединения приборов, находящихся на противоположных сторонах стенда, служат переходные клеммы, расположенные на двух нижних рейках стенда, имеющие номера от 1 до 18 с каждой стороны стенда. Клеммы, имеющие одинаковый номер, соединены между собой проводом-удлинителем.

На стенде имеется 3 автоматических выключателя QF1...QF3, с помощью которых на стенд подаётся трёхфазное напряжение соответственно 21/36, 127/220 и 220/380 вольт, автоматический выключатель QF4 для подачи постоянного напряжения -25 – 0 - +25 В и автоматические выключатели QF5 и QF6 для подачи переменного и постоянного напряжения соответственно 127 и 220 вольт. Сигнальные лампы, расположенные между выключателями, указывают на подачу напряжения до автоматических выключателей, а лампы, расположенные непосредственно у клемм – на наличие напряжения непосредственно на клеммах.

Перед фронтальным стендом (в центре аудитории напротив доски) смонтирован нагрузочный стенд, основу которого составляет машина постоянного тока параллельного возбуждения (балансирная машина). Статор машины закреплён на подшипниках и имеет противовес, что обеспечивает поворот статора на определённый угол при приложении к валу машины определённого вращающего момента. По углу отклонения при соответствующей тарировке легко определяется момент на валу машины. С валом нагрузочной машины соединяется вал испытуемой машины (вентилятора, генератора, электродвигателя) и производится экспериментальное определение её характеристик на различных частотах вращения. Для питания нагрузочной машины и для питания испытуемой машины имеется также расположенные рядом две спарки типа «генератор-двигатель». Выводы всех этих машин осуществлены на панели фронтального стенда.

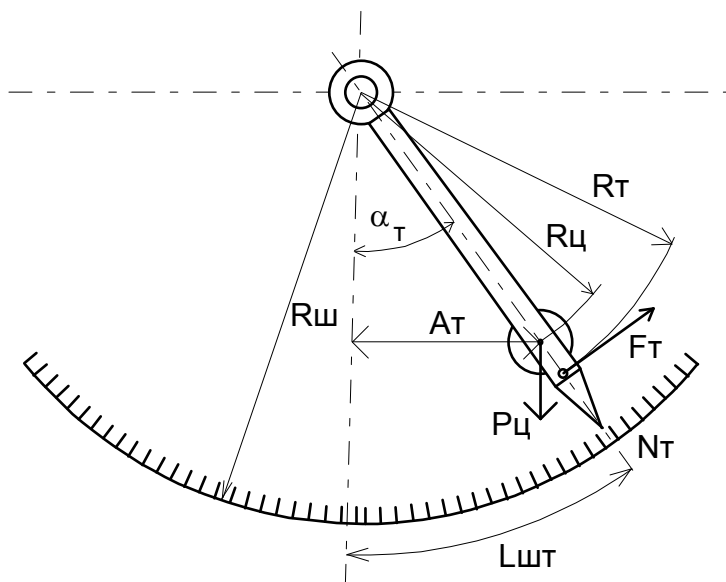
## Методика тарировки весового механизма для измерения вращающего момента

К плечу  $R_T$  балансирующего устройства, длину которого предварительно измеряют, прикладывается сила  $F_T$ , такой величины, чтобы стрелка указателя момента отклонилась не менее, чем на  $2/3$  максимальной длины шкалы (См. рисунок). Количество делений шкалы  $N_T$ , на которое стрелка отклонилась, фиксируется и рассчитывается соответствующая отклонению длина дуги шкалы

где  $\mu_{\text{ш}}$  - масштаб шкалы, дел./м. Так, если деления на шкале нанесены или пронумерованы через каждый миллиметр  $\mu_{\text{ш}} = 1000$  дел./м.

Измерение силы осуществляется динамометром или взвешиванием грузов, с помощью которых эта сила обеспечивается. При этом

где  $m_T$  - масса грузов, кг;



**Рис. 1: Кинематическая схема к тарировке балансирующего устройства.**

$$M_T = F_T * R_T(\text{HM})$$

уравновешивается противодействующим моментом, равным произведению веса балансирующего устройства  $P_{\text{ц}}$  на смещение  $A_{\text{т}}$  центра тяжести от вертикальной линии, проходящей через ось балансирующего устройства

$$M_T = M_{\text{пр}} = P_{\text{ц}} A_T = P_{\text{ц}} R_{\text{ц}} \sin \alpha_T = P_{\text{ц}} R_{\text{ц}} \sin \frac{L_{\text{шт}}}{R_{\text{ш}}} = P_{\text{ц}} R_{\text{ц}} \sin \frac{N_T}{\mu_{\text{ш}} R_{\text{ш}}}.$$

Откуда

$$P_{\text{ц}} R_{\text{ц}} = M_T \Big/ \sin \frac{N_T}{\mu_{\text{ш}} R_{\text{ш}}}.$$

Тогда момент при произвольном отклонении стрелки

$$M = P_{\text{ц}} R_{\text{ц}} \sin \frac{N}{\mu_{\text{ш}} R_{\text{ш}}} = \frac{M_T}{\sin \frac{N_T}{\mu_{\text{ш}} R_{\text{ш}}}} \sin \frac{N}{\mu_{\text{ш}} R_{\text{ш}}}.$$

Например, при тарировке стенда для исследования пусковых свойств асинхронного электродвигателя сила  $F_T$  создавалась весом груза, подвешенного через шкив. При этом были измерены и получены следующие данные:  $R_T=0,415\text{м}$ ;  $m_T=0,31\text{кг}$ ;  $N_T=194\text{дел}$ ;  $R_{\text{ш}}=0,473\text{м}$ ;  $\mu_{\text{ш}}=1000\text{дел/м}$  (деления на шкале пронумерованы через 1 мм, нанесены через 5 мм). Подставив эти данные в уравнение момента, получим

$$M = \frac{9,81 * 0,31 * 0,415}{\sin \frac{194}{1000 * 0,473}} \sin \frac{N}{1000 * 0,473} = 3,16 \sin \frac{N}{473}.$$

Таким образом, если при измерении стрелка отклонилась на  $N$  делений, то искомый момент, действующий на весовой механизм,

$$M = 3,16 \sin \frac{N}{473} (\text{Нм}),$$

где  $\frac{N}{473}$  - угол отклонения стрелки в радианах.

### **Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ**

Используемое на лабораторном стенде напряжение опасно для жизни и может привести к смертельному исходу. В связи с этим при выполнении лабораторных работ необходимо выполнять следующие меры предосторожности:

- Перед началом работы убедитесь, что все автоматические выключатели отключены;
- Включение экспериментальной схемы осуществлять после проверки и по разрешению преподавателя в строго регламентированной в инструкции последовательности;
- При работе со схемой не прикасаться к токоведущим частям оборудования, проводам и клеммам;
- Изменение режимов работы оборудования и его отключение осуществлять в соответствии с приведённой в методическом указании инструкции;
- Перед разборкой схемы, убедитесь, что все вводные автоматические выключатели обесточены;
- По окончании работы схему разобрать полностью, провода убрать на место хранения.

### **Правила сборки электрических схем**

Преподаватель распределяет узлы собираемой схемы по исполнителям.

Получив задание на сборку определённого узла схемы, очередной студент выполняет следующие действия:

1. Каждую клемму, входящую в узел, последовательно:

- показывает указкой на плакате;
- называет выводом какого элемента и какого аппарата она является;
- находит и показывает всем студентам эту клемму на стенде.

2. После того как все клеммы, входящие в узел, будут перечислены, указка откладывается в сторону, берутся соединительные провода и производится сборка в следующем порядке:

- Выбирается самая левая клемма на стенде из показанных и присоединяется к ней наконечник провода, длина которого достаточна для присоединения к ближайшей клемме, расположенной правее;
- К этой клемме добавляется наконечник следующего провода, длина которого достаточна для присоединения к клемме расположенной правее;
- Действия повторяются, пока не будут соединены все клеммы, входящие в узел.

Примечание. При недостаточной длине проводов можно соединить два провода последовательно с помощью свободных клемм на аппаратах, не связанных с собираемой цепью электрически. При переходе на правую часть стенда воспользоваться переходными клеммами стенда. Клеммы следует закручивать плотно, но не чрезмерно.

### **Основные правила составления и чтения схем электроустановок**

#### ***Определение, виды и типы схем***

**Специальные чертежи**, на которых отображаются различные цепи устройств и установок, а также сообщаются сведения о их монтаже и эксплуатации, *называются схемами*.

**Схема** – это графический конструкторский документ, на котором при помощи условных графических обозначений (**УГО**) изображены электрические, механические, гидравлические, пневматические и другие **составные части** изделия и **связи** между ними.

В зависимости от **вида** элементов, входящих в устройство, различают схемы:

- Кинематические – **К**;
- Пневматические – **П**;
- Гидравлические – **Г**;
- Электрические – **Э**;
- Комбинированные – **С**.

В зависимости от **назначения** различают следующие **типы** схем:

- Структурные – **1**;
- Функциональные – **2**;
- Принципиальные (полные) – **3**;
- Монтажные (соединений) – **4**;
- Подключения – **5**;
- Общие – **6**;
- Расположения – **7**.

При выполнении лабораторных работ в основном будут необходимы электрические принципиальные и монтажные схемы.

**Электрическая принципиальная схема** (**Э3**) включает в себя **полный состав** электрических **элементов** устройства и определяет **взаимосвязь** между элементами в устройстве. **Используется** эта схема для изучения принципа работы устройства, а также при его наладке, регулировке, контроле и ремонте. По ней могут быть составлены другие схемы, например, монтажная схема.

**Электрическая монтажная схема** (**Э4**) показывает размещение элементов в устройстве, способы и пути их соединения, места соединения. **Она служит** в основном

для установки и соединения элементов при монтаже, но может использоваться и при наладке.

Основные правила выполнения и чтения электрических схем, а также условные графические обозначения элементов электрооборудования и их позиционные обозначения были изучены на втором курсе по дисциплине «Монтаж электрооборудования и средств автоматизации»

## **2.2 Лабораторная работа №2 ( 2 часа).**

**Тема: «Исследование электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения»**

**2.2.1 Цель работы:** Научиться производить сборку схемы, осуществлять запуск электродвигателя, производить регулирование частоты вращения, изменять устанавливая и измерять параметры режимов работы.

### **2.2.2 Задачи работы:**

Снять зависимость частоты вращения электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения от напряжения на якоре на холостом ходу. *(Согласно выражению (1) ожидаемая экспериментальная зависимость – прямая линия.)*

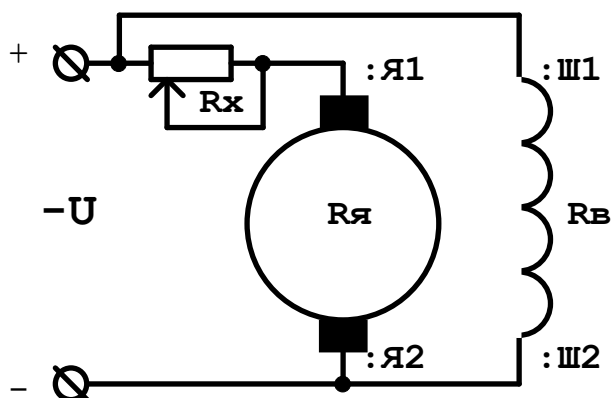
### **2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Асинхронный электродвигатель Тип 4АМ 100
2. Мультимедиапроектор
3. Диоды Д245
4. Амперметр 20А
5. Вольтметр 250В
6. Автоматический выключатель ~220В
7. Автоматический выключатель ~127В
8. Автоматический выключатель -127В
9. Центробежный вентилятор
10. Автотрансформатор
11. Машина постоянного тока тип ПН-28,5
12. Машина постоянного тока тип П- 31
13. Асинхронный двигатель Тип 4 АН 1006 2 У3.

### **2.2.4 Описание (ход) работы:**

#### **Краткие теоретические положения**

Электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения (шунтовой) имеет расположенную на полюсах статора обмотку возбуждения, выполненную из большого количества витков медного изолированного провода, и многосекционную обмотку якоря, уложенную по окружности в пазы железа якоря, набранного из отдельных, изолированных друг от друга листов электротехнической стали. Секции соединены между собой последовательно. Точки соединения секций выведены на пластины коллектора. Подвод тока к коллектору производится через угольные, графитовые или медно-графитовые щётки. Условное графическое обозначение, маркировка выводов и подключение к сети шунтового ЭД осуществляется следующим образом:



**Рис. 1: Схема включения электродвигателя.**

Под действием приложенного напряжения через обмотку возбуждения протекает ток возбуждения  $I_{\text{в}} = U/R_{\text{в}}$ , который создают между полюсами статора магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий обмотку якоря. В обмотке якоря под действием этого же напряжения возникает пусковой ток  $I_{\text{яп}} = U/(R_{\text{я}} + R_{\text{х}})$ . В результате взаимодействия тока и магнитного потока образуется пусковой вращающий момент  $M_{\text{п}} = k\Phi I_{\text{яп}}$ , где  $k$  - конструктивный коэффициент машины, учитывающий размеры, число витков и тип обмотки. При этом якорь стронется с места и начнёт увеличивать частоту вращения  $\omega$ .

Пересечение витками обмотки якоря силовых линий магнитного поля вызовет наведение в обмотке электродвижущей силы  $E = k\Phi\omega$ , направленной навстречу приложенному к обмотке напряжению. Поэтому ток якоря и, следовательно, вращающий момент уменьшатся соответственно до  $I_{\text{я}} = (U - E)/(R_{\text{я}} + R_{\text{х}})$  и  $M = k\Phi I_{\text{я}}$ . Уменьшение будет происходить до тех пор пока развиваемый электродвигателем момент не сравняется с моментом сопротивления рабочей машины, связанной с валом электродвигателя.

Механическая характеристика электродвигателя  $M = f(\omega)$  или  $\omega = f(M)$  описывается уравнением прямой линии

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{(k\Phi)^2} M, \quad (1)$$

Анализ уравнения показывает, что на холостом ходу, угловая частота прямо пропорциональна приложенному напряжению.

#### ***Дополнительная литература***

*Лекция по теме: «Механические характеристики и регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения».*

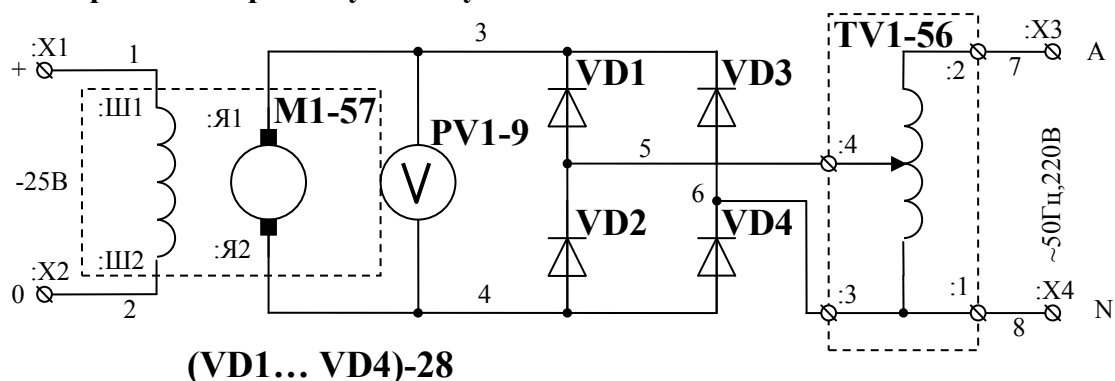
#### **Порядок выполнения задания**

**1 Знакомимся с основными техническими данными и расположением оборудования**

*Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии*



## 2 Собираем электрическую схему:



**Рис.2: Принципиальная схема установки для испытания электродвигателя.**

*Сидоров – узел 1; Козлов – узел 2 и так далее.*

## 3. Заготавливаем таблицу записи наблюдений:

**Данные опытов и расчётов**

**Таблица 2**

Исполнитель	Сидоров	Козлов	Т. д.						
U, В	10	5	0	5	0	5	0	5	0
n, об/мин									
$\omega$ , 1/с									

## 4. Записываем действия при определении параметров точек экспериментальной зависимости, заданных второй строкой таблицы 2:

- Устанавливаем заданное напряжение;
- Измеряем тахометром скорость вращения вала электродвигателя в оборотах в минуту;
- Рассчитываем и заносим в таблицу частоту вращения;

## 5. Осуществляем запуск электродвигателя в следующей последовательности:

- Подадим напряжение постоянного тока 25 вольт на клеммы обмотки возбуждения.
- Установим движок автотрансформатора TV1 в нулевое положение (*против часовой стрелки до упора, что соответствует нижнему положению движка автотрансформатора на схеме*).
- Подадим напряжение 220 вольт на вход автотрансформатора.
- Медленно увеличиваем напряжение на выходе автотрансформатора, следя за тем, чтобы электродвигатель начал вращаться (*неподвижность якоря при напряжении 10 и более вольт может свидетельствовать об аварийном режиме: отсутствии тока в обмотке возбуждения или замыкании или обрыве цепи якоря*).

- Доводим напряжение до 20...30 вольт

*Работу выполняет очередной студент и передаёт установку с вращающимся электродвигателем студенту, осуществляющему измерение параметров первой точки экспериментальной кривой.*

## 6. Снимаем данные и заполняем ячейки таблицы

*Каждый из ответственных за точку зависимости, заносит показания в таблицу, проводит расчёты, и результаты также заносит в таблицу. Все остальные студенты переносят эти данные в тетради.*

## 7. Строим график экспериментальной зависимости

*Старший по работе на доске, а все остальные студенты у себя в тетрадях, заготавливают оси координат. Каждый из ответственных за точку наносит её на поле*

графика, расположенного на доске. Старший на доске, а все остальные студенты у себя в тетрадях проводят аппроксимирующую линию.

**8. Продолжаем полученную прямую до пересечения с осью координат и определяем напряжение трогания**

*Старший по работе это делает на доске*

**9. Оцениваем, насколько близко опытные данные согласуются с теоретическими данными**

*В тетрадях привести комментарии.*

### **Контрольные вопросы**

1. Устройство шунтового электродвигателя.
2. Схема включения э. д.
3. Написать уравнение тока возбуждения э. д.
4. Чему равен пусковой ток э.д.?
5. Чему равен пусковой момент э.д.?
6. Что учитывает конструктивный коэффициент машины?
7. Чему равна ЭДС в обмотке якоря?
8. Написать уравнение механической характеристики шунтового электродвигателя.
9. Начертить две механические характеристики э.д. для двух различных напряжений.
10. Показать на схеме (рис. 2) путь тока в цепи якоря при прямой и обратной полярности питающего напряжения.

***Сдать на проверку преподавателю отчёт и ответить на один из вопросов по выбору преподавателя***

*Материальное обеспечение - универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 210 (источник питания постоянного тока 25В; источник питания переменного тока 220В; электродвигатель постоянного тока на панели №57; вольтметр на 50В на панели №9; автотрансформатор на панели №56; диоды на 5А, 300В на панели №28; тахометр переносной на 10000 об/мин).;*

## **2.3 Лабораторная работа №3 ( 2 часа).**

**Тема: «Исследование центробежного вентилятора»**

**2.3.1 Цель работы:** Ознакомиться с устройством и принципом действия центробежного вентилятора, научиться снимать и строить характеристики вентилятора.

### **2.3.2 Задачи работы:**

Снять зависимость мощности на валу вентилятора  $P_B$ , момента на валу вентилятора  $M_B$ , напора  $H$ , расхода  $Q$  и коэффициента полезного действия вентилятора  $\eta_B$  от частоты вращения  $M_B, H, Q, \eta_B = f(\omega)$ , а также мощности вентилятора  $P_B$  от расхода  $P_B = f(Q)$ .

### **2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Мультимедиапроектор
2. Машина постоянного тока Тип ПН-10
3. Вольтметр 50В
4. Амперметр 75А
5. Диоды Д245

## 6. Автотрансформатор

### 2.3.4 Описание (ход) работы:

#### Краткие теоретические положения

Центробежный вентилятор совершает работу по перемещению воздушной массы. Эта работа идёт на увеличение кинетической энергии потока воздуха. Если через поперечное сечение  $S$  нагнетающего трубопровода вентилятора перемещается воздух со скоростью  $v$ , то расход  $Q$  воздуха, равный объёму воздуха, прошедшего через поперечное сечение трубопровода за одну секунду,

$$Q = S v \text{ (м}^3\text{/с)}, \quad (1)$$

а масса

$$m = Q \rho = S v \rho \text{ (кг/с)}, \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность воздуха, равная 1,29 кг/м<sup>3</sup>.

Так как до входа во всасывающий патрубок вентилятора скорость воздуха была равна нулю, а на выходе  $v$ , то следовательно, прошедшей массе воздуха было сообщено  $W_k$  джоулей кинетической энергии, равное в данном случае (время равно 1 секунде) мощности передачи энергии

$$P = \frac{m v^2}{2} = \frac{S v \rho v^2}{2} = Q \frac{\rho v^2}{2} \text{ (Вт)}. \quad (3)$$

С другой стороны, если в потоке воздуха выделить сечение  $S$  (Смотри рис. 1), то эта мощность по преодолению сил инерции потока воздуха будет равна произведению скорости перемещения сечения на силу, приложенную к сечению

$$P = v F_{\text{дин}} = v S H_{\text{дин}} = Q H_{\text{дин}}, \quad (4)$$

где  $H_{\text{дин}}$  - динамический напор, Па.

Сравнивая (3) и (4), получим уравнение для определения динамического (скоростного) напора

$$H_{\text{дин}} = \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

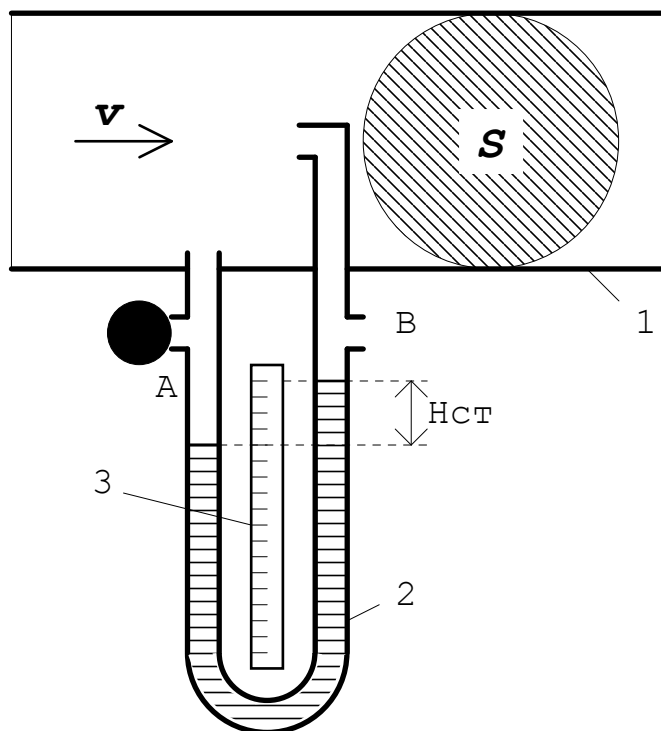
Его можно измерить с помощью трубки Пито, изображённой на рисунке 1, и по его величине подсчитать скорость воздушного потока

$$v = \sqrt{\frac{2 H_{\text{дин}}}{\rho}}, \quad (6)$$

подсчитать расход по выражению (1) и мощность по выражению (4). Однако следует иметь в виду, что мощность расходуется не только на сообщение кинетической энергии потоку, но и на преодоление потерь напора в напорном трубопроводе. Поэтому в уравнении (4) вместо динамического напора необходимо подставлять полный напор

$$P = Q H = Q (H_{\text{дин}} + H_{\text{ст}}), \quad (7)$$

где  $H_{\text{ст}}$  – статический напор, Па.



**Рис. 1: Схема измерения напоров.** (1-трубопровод, 2- трубка Пито, 3- мерная линейка, А и В- отверстия для рассоединения концов трубки)

Если закрыть пальцами отверстия А и В одновременно, то разность уровней в трубках покажет динамический напор в мм водяного столба (1 мм водяного столба равен 9,8 Па). При закрытом отверстии А (как показано на рисунке) измеряется статический напор, а при закрытом отверстии В – полный. При этом, если повышение уровня происходит в сторону открытого отверстия, то напор положителен, а в сторону закрытого - отрицателен.

#### **Дополнительная литература**

- Шичков Л. П. Электрический привод. – М.: КолосС, 2006. с. 162...163, 173...181.
- Лекции по теме: «Механические характеристики рабочих машин»; «Механические характеристики и регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения».

#### **Порядок выполнения задания**

**1. Знакомимся с составом и основными техническими данными электрооборудования, используемого в лабораторной работе**

*Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии*

**2. Собираем электрическую схему:**

*Сидоров – узел 1; Козлов – узел 2 и так далее. Во время сборки перечертить схему в тетради.*



Па												
$H_{CT}, \text{Па}$												
$H, \text{Па}$												
$v, \text{м/с}$												
$Q, \text{м}^3/\text{с}$												
$P_1=UI,$ Вт												
$P_2=P_B=$ $M\omega, \text{Вт}$												
$P_{BП}=QH$ , Вт												
$\eta_D = P_{2D}$												
$\eta_B = P_{BП}$												
$\eta_{BП} = \eta_D$												

**4. Записываем действия при определении параметров точки экспериментальной зависимости, заданной третьей и четвёртой строками таблицы 2:**

- Устанавливаем заданное напряжение и сечение трубопровода;
- Измеряем тахометром скорость вращения вала электродвигателя в оборотах в минуту, момент в мм шкалы, ток якоря электродвигателя  $I$  в амперах и напоры в мм водяного столба;
- Рассчитываем и заносим в таблицу на доске: частоту вращения, момент  $\{M=15,8\sin(M_{ш}/135)\}$  и напоры в Паскалях. Кроме того, по вышеприведённым формулам находим скорость воздуха, расход, мощности и коэффициенты полезного действия.

**5. Измеряем диаметр и рассчитаем сечение напорного трубопровода ( $D=?$   $S=\pi D^2/4$ )**

*Работу выполняет очередной студент.*

*Старший распределяет точки экспериментальной зависимости по исполнителям и записывает фамилии исполнителей в строку таблицы*

**6. Осуществляем запуск электродвигателя в следующей последовательности:**

А) Устанавливаем движок автотрансформатора TV1 в нулевое положение (*против часовой стрелки до упора, что соответствует левому положению движка автотрансформатора на схеме*).

Б) С помощью QF1 подаём напряжение 380 В на зажимы асинхронного электродвигателя. *Проверяем направление вращения электродвигателя. Если оно не по стрелке, меняем фазировку напряжения на зажимах электродвигателя.*

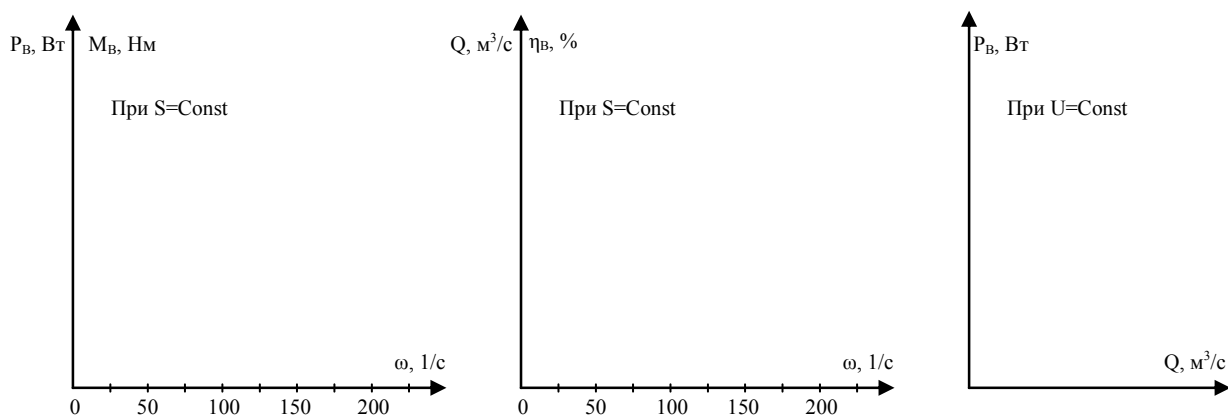
В) С помощью QF2 подаём напряжение 127 вольт на вход автотрансформатора и выпрямленное напряжение 127 вольт на обмотку возбуждения электродвигателя М3. *Так как напряжение на выходе автотрансформатора равно нулю, равно нулю и напряжение на обмотке возбуждения генератора М2. Следовательно, на выходных зажимах якоря генератора М2 напряжение, подаваемое и на якорь электродвигателя М3, также равно нулю и электродвигатель не вращается.*

Г) Медленно увеличиваем напряжение на выходе автотрансформатора, следя за тем, чтобы электродвигатель начал вращаться (*неподвижность якоря при напряжении 10 и более вольт может свидетельствовать об аварийном режиме: отсутствии тока в обмотке возбуждения; замыкании или обрыве цепи якоря*).

Д) Доводим напряжение до 30...50 вольт.

Работу выполняет очередной студент и передаёт установку с вращающимся электродвигателем студенту, осуществляющему измерение параметров первой точки экспериментальной зависимости.

### 7. По опытным и расчётным данным строим графики



**Рис. 3: Графики искомых зависимостей**

Старший по работе заготавливает оси координат на доске, все остальные студенты в тетрадях.

7.1. Нанести каждую точку зависимости на поле графика

(кроме того, каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске)

7.2. Провести на графике аппроксимирующие линии

(ведущий это делает на доске)

**8. Оцениваем, насколько близко опытные данные согласуются с теоретическими данными**

#### Контрольные вопросы:

1. Как измерить полный, статический и динамический напоры?
2. Как подсчитать скорость воздушного потока и расход воздуха?
3. Дать определение коэффициентам полезного действия: электродвигателя, вентилятора, и вентиляторной установки.
4. Назовите возможные нарушения в электрической схеме, которые могут привести к аварийному состоянию установки.
6. Назовите возможные неправильные действия студента при проведении опыта, которые могут привести к повреждению установки.
7. Как подсчитать необходимую мощность электродвигателя для привода вентилятора?
8. Проанализировать распределение и ход энергии, потребляемой установкой из сети (начертить энергетическую диаграмму).
9. В какой аналитической зависимости находятся мощность вентилятора, момент на валу и скоростной напор от частоты вращения?
10. Устройство и принцип действия центробежного вентилятора.

**Подготовить ответы на вопросы, сдать на проверку преподавателю отчёт и ответить на один из вопросов по выбору преподавателя**

Материальное обеспечение - универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 210 (источник питания переменного тока 127В; источник питания переменного тока 220В; центробежный вентилятор; электрическая машина постоянного тока с выводами на панель №52; балансирующая электрическая машина постоянного тока с выводами на панель №50; асинхронная машина с выводами на панель №52; автотрансформатор на панели №56; вольтметр на 250В постоянного тока на

панели №16; амперметр постоянного тока на 20А на панели №15а; диоды на 5А, 300В на панели №28; тахометр переносной на 10000 об/мин):

## 2.4 Лабораторная работа №4 ( 2 часа).

**Тема: «Механические характеристики электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения»**

**2.4.1 Цель работы:** Научиться производить сборку схемы, осуществлять запуск системы электродвигателей, производить регулирование величины напряжения и нагрузки, устанавливать и измерять параметры режимов работы, снимать и строить механические характеристики.

### 2.4.2 Задачи работы:

Снять и построить зависимость момента на валу шунтового электродвигателя от частоты вращения  $M = f(\omega)$  для различных значений потока возбуждения, напряжения и сопротивления в цепи якоря.

### 2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Мультимедиапроектор
2. Машина постоянного тока параллельного возбуждения Тип АТЭ-1
3. Вольтметр 50В
4. Диоды Д245
5. Автотрансформатор

### 2.4.4 Описание (ход) работы:

#### Краткие теоретические положения

Момент, развиваемый электродвигателем постоянного тока параллельного возбуждения (шунтовым),  $M = k \Phi I_{\text{я}}$ , ток якоря  $I_{\text{я}} = \frac{U - E}{(R_{\text{я}} + R_{\text{х}})}$ , а ЭДС  $E = k\Phi\omega$ .

где  $U$  – напряжение на зажимах якоря, В;

$\Phi$  – магнитный поток, Вб;

$k$  – конструктивный коэффициент машины;

$R_{\text{я}}$  и  $R_{\text{х}}$  - соответственно сопротивление якоря, и добавочное сопротивление в цепи якоря, Ом.

Подставив в уравнение момента выражение тока и ЭДС, получим уравнение механической характеристики электродвигателя  $M = f(\omega)$

$$M = \frac{k \Phi U}{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}} - \frac{(k\Phi)^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}} \omega \quad (1)$$

Или, выразив в явном виде частоту вращения вала электродвигателя,

$$\omega = \frac{U}{k \Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{(k \Phi)^2} M, \quad (2)$$

Оба уравнения это уравнения прямой линии, не проходящей через начало координат. Первый член первого уравнения это пусковой момент, а второго уравнения – частота идеального холостого хода. Коэффициент при втором члене – тангенс угла наклона характеристики. Характеристика падающая, так как коэффициент меньше нуля.

Параметры характеристики зависят от напряжения, величины магнитного потока и сопротивления в цепи якоря. Анализ уравнения характеристики показывает, что с



изменением напряжения характеристика перемещается параллельно самой себе, с изменением добавочного сопротивления изменяет наклон, а при изменении величины магнитного потока сдвигается вправо или влево с изменением наклона.

***Дополнительная литература***

- Шичков Л. П. Электрический привод. – М.: КолосС, 2006. с. 24...27.
- Лекции по теме: «Механические характеристики и регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

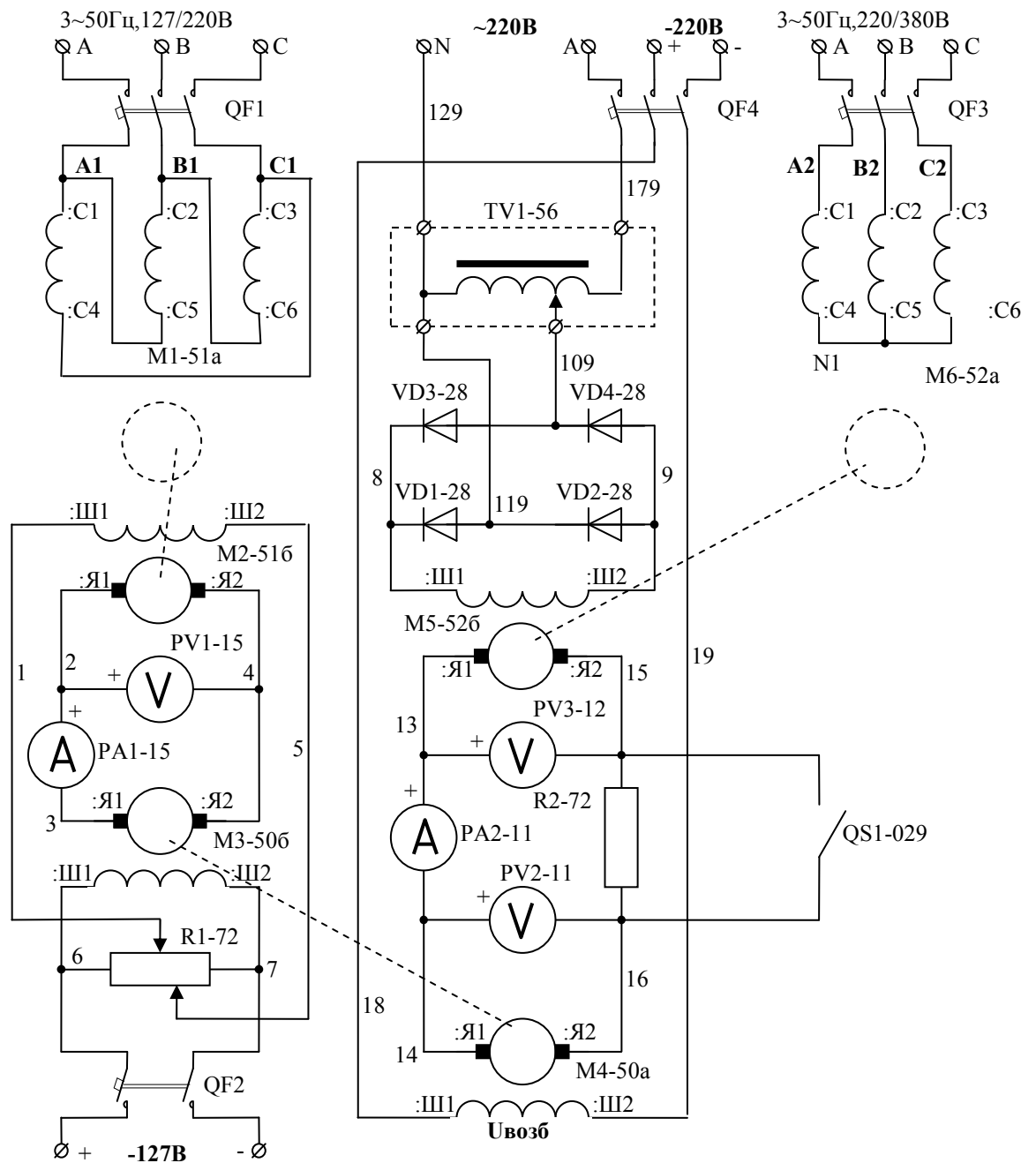
**Порядок выполнения задания**

**1 Знакомимся с основными техническими данными и расположением оборудования**

*Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии*

**2. Схема экспериментальной установки**

*Соберём электрическую схему. Сидоров собирает узел А1; Козлов – узел А2 и так далее.*



**Рис. 1: Принципиальная схема установки для испытания шунтового электродвигателя.**

### **3. Последовательность запуска установки**

а). Движок автотрансформатора устанавливаем в нулевое положение (против часовой стрелки до упора), движки потенциометра напротив друг друга, а контакты переключателя QS1 размыкаем.

б) Подаём возбуждение на обмотки машин постоянного тока включением автоматических выключателей QF2 и QF4.

в). Включаем автоматический выключатель QF3. Проверяем направление вращения машин M6 и M5.

г). Плавно увеличиваем напряжение на обмотке возбуждения машины M5, поворачивая движок автотрансформатора по часовой стрелке. Убеждаемся, что

напряжение ( $U_3$ ) на якоре машины также увеличивается. Доводим его до заданного в нижеследующей таблице.

д) Включаем автоматический выключатель QF1, запустив спарку M1-M2.

е) Устанавливаем движками потенциометра напряжение  $U_2$ , равным напряжению  $U_3$  (Ток  $I_1$  при этом будет близким к нулю).

ж) Замыкаем выключатель QS1.

#### 4. Действия по снятию параметров характеристики:

а). Устанавливаем заданную для данной точки величину тока  $I_1$ , раздвигая движки потенциометра R1;

б). Измеряем и заносим в таблицу на доске с учётом знака ток  $I_2$ , напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , количество делений шкалы, на которое отклонилась стрелка указателя момента  $M_{ш}$ , и число оборотов вала электродвигателя в минуту.

#### 5. Таблица записи наблюдений и обработки экспериментальных данных при снятии естественной механической характеристики

Распределяются исполнители.

Таблица 1

Исполнитель	Бойко	Абдулин	Абдурахманов	Ибаев	Акаров	Азатов	Абедков	Арокин	Аминов
Опытные данные									
$U_3=120В$			$R_2=0$			$U_{возб}=220В$			
$I_1, А$	17,5	15	10	5	0	5	0	5	0
$I_2, А$	9	7		,5	,5	1	5	8	1
								1	7
$U_1, В$	100	93	85	75	63	51	35	20	12
$U_2, В$	120	120	120	120	120	120	120	120	120
$M_{ш},$ дел	96	78	52	15	3	1	4	7	1
$n,$ об/мин	160	130	104	20	20	8	8	7	7
Расчётные данные									
$\omega=\pi n/30, 1/с$									
$M=15,8*\sin(M_{ш}/135), Нм$									
$P_B=M\omega, Вт$									
$P_{\Sigma 1}=U_1 I_1, Вт$									
$P_{\Sigma 2}=U_2 I_2, Вт$									
$P_{\Sigma 3}=U_3 I_3, Вт$									
$\eta_1=P_B/P_{\Sigma 1}$									
$\eta_2=P_{\Sigma 2}/P_{\Sigma 1}$									

$2/P_B$									
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Работу по пунктам 3 и 4 выполняет студент, снимающий первую точку зависимости. Его действия контролирует старший по работе, а студент, снимающий следующую точку поддерживает неизменным во время измерений напряжение  $U_3$ . Затем студент, снимающий первую точку садится, для расчёта и занесения в таблицу расчётных данных. К измерению, выполняя пункты 4, приступает следующий студент. И т. д. вплоть до последней точки. Далее одновременно отключаются машины переменного тока, а затем снимается напряжение с обмоток возбуждения машин постоянного тока.

**6. Таблица записи наблюдений и обработки экспериментальных данных при снятии реостатной механической характеристики ( $R_2 \neq 0$ )**

Таблица 2

Исполнитель	Бойко	Абдулин	Будурханов	Ибаев	Акаров	Азатов	Бьедков	Орокин	Имин
Опытные данные									
$U_3=120B$			$R_2=11,4$			$U_{возб}=220B$			
$I_1, A$	20	15	10	5	0	5	0	5	0
$I_2, A$			22		1,5	5	7	8	8
$U_1, B$			110	80	52	24	0	2	0
$U_2, B$			166	130	100	78	20	30	10
$M_{ш}, дел$			37	10	3	1	4	5	8
$n, об/мин$			356	065	50	40	20	1	0
Расчётные данные									
$\omega=\pi n/30, 1/c$									
$M=15, 8*\sin(M_{ш}/135), Нм$									
$P_B=M\omega, Вт$									
$P_{\Sigma 1}=U_1 I_1, Вт$									
$P_{\Sigma 2}=U_2 I_2, Вт$									
$P_{\Sigma 3}=U_3 I_3, Вт$									
$\eta_1=P_B/P_{\Sigma 1}$									
$\eta_2=P_{\Sigma 2}/P_B$									

Распределяются исполнители. Выполняются действия по пунктам 3 (кроме пунктов «е» и «ж») и 2 в порядке описанном выше.

**7. Таблица записи наблюдений и обработки экспериментальных данных при снятии механической характеристики при повышенном напряжении на якоре**

Таблица 3

Исполнитель	Бойко	Абдулин	Абдурахманов	Ибаев	Акаров	Азатов	Сабьедков	Сорокин	Симин
Опытные данные									
$U_3=180В$			$R_2=0$			$U_{возб}=220В$			
$I_1, А$	20	15	6	5	0	5	0	5	0
$I_2, А$			5		1,5	5	7,5	11,5	16
$U_1, В$			110	108	92	81	75	71	60
$U_2, В$			180	180	180	180	180	180	180
$M_{ш}, дел$			20	15	2	7	0	00	32
$n, об/мин$			480	450	330	280	225	270	190
Расчётные данные									
$\omega=\pi n/30, 1/c$									
$M=15, 8*\sin(M_{ш}/135), Нм$									
$P_B=M\omega, Вт$									
$P_{Э1}=U_1 I_1, Вт$									
$P_{Э2}=U_2 I_2, Вт$									
$P_{Э3}=U_3 I_3, Вт$									
$\eta_1=P_B/P_{Э1}$									
$\eta_2=P_B/P_{Э2}$									

Распределяются исполнители. Выполняются действия по пунктам 3 и 2 в порядке описанном выше.

**8. Таблица записи наблюдений и обработки экспериментальных данных при снятии механической характеристики при пониженном потоке возбуждения**

Таблица 4

Исполнитель	Бойко	Абдулин	Абдурахманов	Ибаев	Акаров	Азатов	Сабьедков	Сорокин	Симин
-------------	-------	---------	--------------	-------	--------	--------	-----------	---------	-------

Опытные данные									
$U_3=120B$			$R_2=0$			$U_{возб}=127B$			
$I_1, A$	20	15	10	5	0	5	1	1	0
$I_2, A$					1,5	10	17	25	
$U_1, B$			110	87	75	61	70	10	
$U_2, B$			120	120	120	120	120	120	
$M_{ш},$ дел			48	10	0	8	1	7	8
$n,$ об/мин			320	150	020	90	130	90	2
Расчётные данные									
$\omega=\pi n/30, 1/c$									
$M=15, 8*\sin(M_{ш}/135), Нм$									
$P_B=M\omega, Вт$									
$P_{Э1}=U_1 I_1, Вт$									
$P_{Э2}=U_2 I_2, Вт$									
$P_{Э3}=U_3 I_3, Вт$									
$\eta_1=P_B/P_{Э1}$									
$\eta_2=P_{Э2}/P_B$									

Распределяются исполнители. Обмотка возбуждения электродвигателя переключается на напряжение 127 В.. Выполняются действия по пунктам 3 и 2 в порядке описанном выше

#### 4.9. Графики механических характеристик

Старший по работе на доске все остальные студенты в тетрадях заготавливают оси координат с учётом, что на поле графика должны быть размещены все снятые характеристики. Для первой характеристики каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске. Старший по работе на доске, а все остальные студенты в тетрадях проводят аппроксимирующие линии

В таком же порядке строятся вторая, третья и четвёртая характеристики.

#### 10. Оценка опытных и теоретических данных

Сделать заключение, насколько экспериментальные характеристики соответствуют теоретическим предположениям.

#### Контрольные вопросы:

1. Устройство шунтового электродвигателя.
2. Схема включения шунтового электродвигателя.
3. Порядок запуска шунтового электродвигателя.
4. Чему равен пусковой ток шунтового электродвигателя?

5. Чему равен пусковой момент шунтового электродвигателя?
6. Как определить потери мощности в якоре электродвигателя?
7. Как определить по данным опыта мощность на валу электродвигателя?
8. Написать уравнение механической характеристики шунтового электродвигателя.
9. Начертить две механические характеристики шунтового электродвигателя для двух различных напряжений.
10. Как определить по данным опыта мощность на зажимах электродвигателя?
11. Чему равна частота идеального холостого хода шунтового э. д.?

## **2.5 Лабораторная работа №5, 6 ( 4 часа).**

**Тема: «Исследование механических характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя в режиме динамического торможения постоянного тока параллельного возбуждения»**

**2.5.1 Цель работы:** Научиться осуществлять запуск системы электродвигателей, производить регулирование величины напряжения и нагрузки, устанавливать и измерять параметры режимов работы, снимать и строить механические характеристики.

### **2.5.2 Задачи работы:**

Снять и построить зависимость момента на валу трёхфазного асинхронного электродвигателя от частоты вращения  $M = f(\omega)$  в режиме динамического торможения для различных значений сопротивления в цепи ротора.

### **2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Мультимедиапроектор
2. Асинхронный электродвигатель Тип АЦ 12
3. Патенциометр
4. Асинхронный электродвигатель Тип ATF 112-6У1
5. Резисторы
6. Диоды Д245
7. Автотрансформатор
8. Автоматический выключатель АП-50 -127
9. Автоматический выключатель АП-50 - ~220В

### **2.5.4 Описание (ход) работы:**

#### **Краткие теоретические положения**

При динамическом торможении обмотки статора электродвигателя отключаются от сети переменного тока, и на них подаётся напряжение постоянного тока. В результате таких подключений в статоре образуется постоянное не вращающееся магнитное поле, которое, как известно, стремится увлечь за собой ротор, т. е. в данном случае – остановить.

#### **Дополнительная литература**

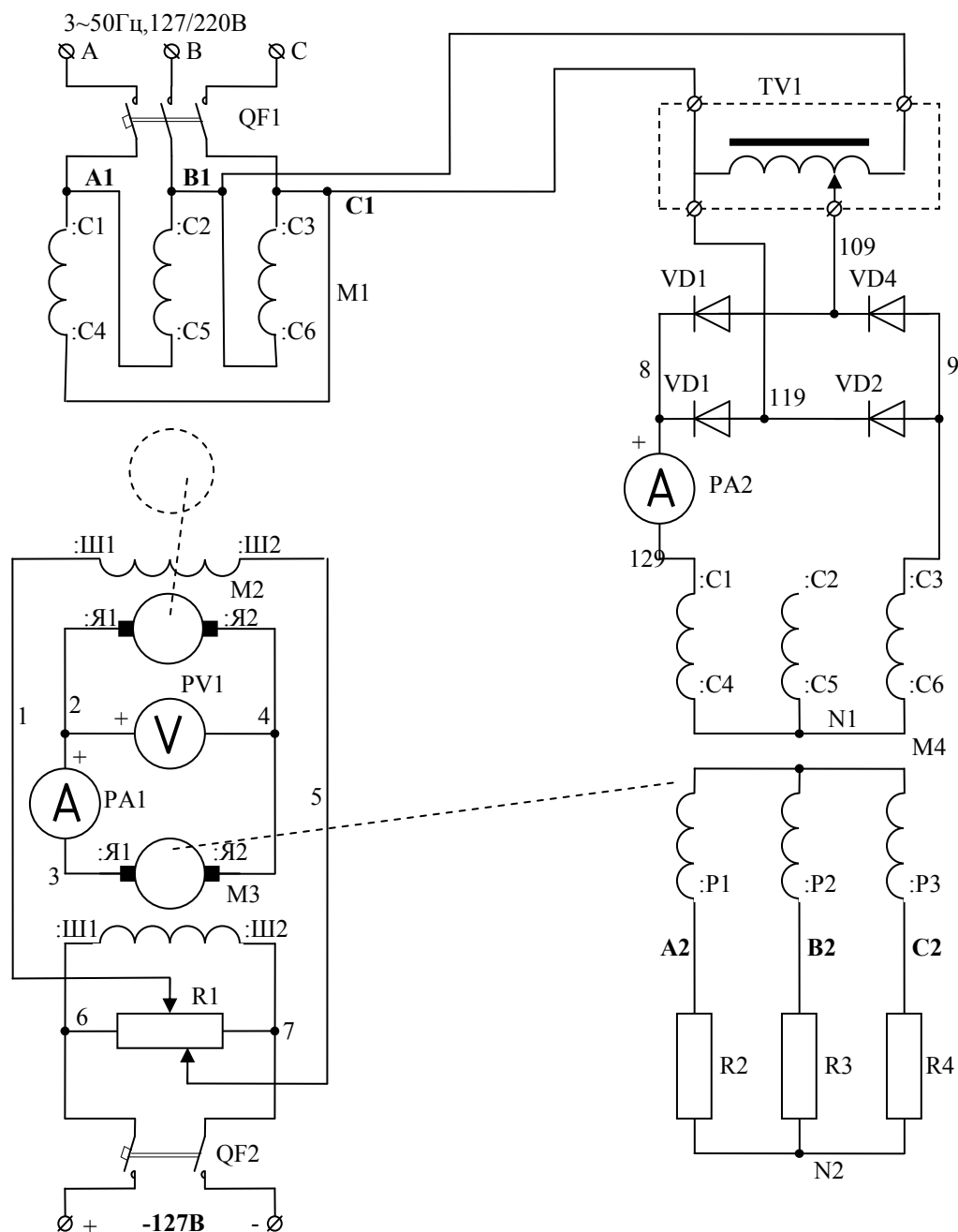
- Шичков Л. П. Электрический привод. – М.: КолосС, 2006. с. 35...37.
- Лекции по теме: «Механические характеристики и регулирование частоты вращения 3-х фазного асинхронного электродвигателя.

#### **Порядок выполнения задания**

**1 Знакомимся с основными техническими данными и расположением оборудования**

Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии

## 2. Собираем схему экспериментальной установки



**Рис. 1: Принципиальная схема установки для испытания электродвигателя.**

### 3. Записываем порядок запуска установки

а). Движок автотрансформатора устанавливается в нулевое положение (против часовой стрелки до упора), а движки потенциометра - напротив друг друга.

б) Подключается требуемое для снимаемой характеристики сопротивление в цепь ротора испытуемого электродвигателя М4;

в) Подаётся напряжение на обмотки возбуждения машин постоянного тока включением автоматического выключателя QF2.

г) Включается автоматический выключатель QF1, тем самым запускается спарка M1-M2;

д) С помощью автотрансформатора TV1 ток  $I_2$  в цепи обмоток статора устанавливается равным 5А.



**4. Записываем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:**

а). Устанавливается заданная для данного режима величина напряжения  $U_1$  смещением друг относительно друга движков потенциометра R1;

в). Измеряются и заносятся в таблицу на доске с учётом знака ток  $I_1$ , количество делений шкалы, на которое отклонилась стрелка указателя момента  $M_{ш}$ , и число оборотов вала электродвигателя в минуту.

**5. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных при снятии реостатной ( $R_2=22,5 \text{ Ом}$ ) механической характеристики в режиме динамического торможения**

*Распределяются исполнители*

**Таблица 1**

№ точки	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$M_{ш}, \text{дел.}$	$n, \text{об/мин}$	$M=15,8 \sin(180 M_{ш}/135\pi), \text{Нм}$	$\omega=\pi n/30, \text{1/с}$	$P_B=M\omega, \text{Вт}$	$P_{Э2,3}=U_1 I_1, \text{Вт}$	$\eta_3=P_B/P_{Э2,3}$
	130	12	58	290					
	115	12	56	160					
	100	12	55	150					
	85	12	55	040					
	70	10	49	80					
	55	9	44	10					
	40	8	40	20					
	25	7	30	80					
	5		0	20					
0	0	1	0	00					
1	5	2	5	00					
2	0	4	0	25					
3	5	5	0	210					

4	00	6	2	250					
5	15	7	3	300					
6	30	8	7	330					

Работу по пунктам 4.3 выполняет студент, снимающий первую точку зависимости. Затем он выполняет работу по пункту 4.4. Его действия контролирует старший по работе, а студент, снимающий следующую точку поддерживает неизменным во время измерений ток  $I_2$ . Затем студент, снимающий первую точку садится, для расчёта и занесения в таблицу на доске расчётных данных. К измерению, выполняя пункты 4.4, приступает следующий студент. И т. д. вплоть до последней точки. Далее одновременно отключаются машины переменного тока, а затем снимается напряжение с обмоток возбуждения машин постоянного тока.

**6. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных при снятии естественной ( $R_2=0$ ) механической характеристики в режиме динамического торможения**

Таблица 2

№ точки	$U_1, В$	$I_1, А$	$M_{ш}, дел.$	$n, об/мин$	$M=15,8\sin(180 M_{ш}/135\pi), Нм$	$\omega=\pi n/30, 1/с$	$P_B=M\omega, Вт$	$P_{Э2,3}=U_1 I_1, Вт$	$\eta_3=P_B/P_{Э2,3}$
	130	6	94	625					
	90	5,8	88	160					
	50	5,6	85	60					
	30	5,4	83	10					
	20	6,6	76	30					
	15	8	65	70					
	10	10	50	0					
	5	6	28						
		,1	8						
0	0	,5	5	5					
1	5		9	0					
2	0	,1	8	65					

3	0	,2	2	60					
4	0	,5	8	80					
5	0	,7	0	330					
6	30		5	010					

*Распределяются исполнители. Выводы ротора P1, P2 и P3 соединить между собой. Выполняются действия по пунктам 4.3 и 4.4 в порядке описанном выше.*

#### **7. Строим графики механических характеристик**

*Старший по работе на доске все остальные студенты в тетрадях заготавливают оси координат с учётом, что на поле графика должны быть размещены все снятые характеристики. Для первой характеристики каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске. Старший по работе на доске, а все остальные студенты в тетрадях проводят аппроксимирующие линии*

*В таком же порядке строится вторая характеристика.*

*Оставить место для графиков*

#### **8. Осуществляем сравнение опытных и теоретических данных**

*Сделать и записать заключение, насколько экспериментальные характеристики соответствуют теоретическим предположениям.*

##### **Контрольные вопросы:**

1. Устройство асинхронного электродвигателя.
2. Схема включения асинхронного электродвигателя в звезду и треугольник.
3. Как осуществляется режим динамического торможения асинхронного электродвигателя?
4. Как по каталожным данным определить пусковой ток асинхронного электродвигателя?
5. Как по каталожным данным определить пусковой момент асинхронного электродвигателя?
6. Как определить по паспортным данным номинальный момент асинхронного электродвигателя?
7. Как определить по данным опыта мощность на валу электродвигателя?
8. Написать уравнение механической характеристики асинхронного электродвигателя.
9. Начертить две механические характеристики асинхронного электродвигателя в режиме динамического торможения для двух различных напряжений.
10. Достоинства и недостатки режима динамического торможения по сравнению с режимом генераторного (рекуперативного) торможения.
11. Чему равна синхронная частота в режиме динамического торможения?
12. Где рассеивается при динамическом торможении кинетическая энергия механизма?

#### **2.6 Лабораторная работа №7 ( 2 часа).**

**Тема: «Механические характеристики асинхронного электродвигателя»**

**2.6.1 Цель работы:** Научиться производить сборку схемы, осуществлять запуск системы электродвигателей, производить регулирование величины напряжения и нагрузки, устанавливать и измерять параметры режимов работы, снимать и строить механические характеристики.

### 2.6.2 Задачи работы:

Снять и построить зависимость момента на валу асинхронного электродвигателя от частоты вращения  $M = f(\omega)$  для различных значений сопротивления в цепи якоря.

### 2.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Мультимедиапроектор
2. Универсальный измерительный комплект К 50
3. Асинхронный электродвигатель Тип АЦ 12
4. Асинхронный электродвигатель Тип АТБ 112-6У1
5. Автоматический выключатель АП-50 - ~220В
6. Резистор Я=22,5Ом
7. Размыкатель QS 1,

### 2.6.4 Описание (ход) работы:

#### Краткие теоретические положения

Момент, развиваемый асинхронной машиной  $M = k \Phi I_2 \cos \psi_2$ , ток ротора

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{s E_{21}}{\sqrt{r_2^2 + (s x_{21})^2}}, \text{ а } \cos \psi_2 = \frac{r_2}{Z_2} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (s x_{21})^2}}.$$

где  $k$  – конструктивный коэффициент машины;

$\Phi$  – величина вращающегося магнитного потока, Вб;

$s = (\omega_c - \omega) / \omega_N$  – скольжение ротора относительно магнитного поля статора;

$\omega_c$  – частота вращения магнитного поля (синхронная частота), 1/с;

$r_2 = r_p + R_x$  – суммарное сопротивление обмотки ротора и добавочного сопротивления в цепи ротора, Ом;

$E_2$  – ЭДС, наведённая в обмотке ротора при скольжении  $s$ , В;

$E_{21}$  – ЭДС, наведённая в обмотке заторможенного ротора (при  $s=1$ );

$x_2$  и  $x_{21}$  – реактивное сопротивление ротора соответственно при  $s$  и при  $s=1$ ;

$z_2$  и  $z_{21}$  – полное сопротивление цепи ротора соответственно при  $s$  и при  $s=1$ ;

$\psi_2$  – угол между векторами наведённой ЭДС и тока в цепи ротора.

Подставив в уравнение момента выражение тока и  $\cos \psi_2$ , получим уравнение механической характеристики электродвигателя  $M = f(s)$

$$M = k \Phi \frac{s E_{21}}{\sqrt{r_2^2 + (s x_{21})^2}} \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (s x_{21})^2}} = k \Phi \frac{s E_{21} r_2}{r_2^2 + (s x_{21})^2} = k_1 \frac{s r_2}{r_2^2 + (s x_{21})^2}, \quad (1)$$

где  $k_1 = k \Phi E_{21}$ .

Анализ уравнения (1) показывает, что при скольжении близком к нулю характеристика прямолинейна, а при скольжении близком к единице – гиперболическая. При этом максимальный (критический) момент  $M_{MAX} = M_K = k_1 / 2 x_{21}$  наблюдается при критическом скольжении  $s_K = r_2 / x_{21}$ . Подставив в уравнении (1)  $k_1 = 2 x_{21} M_K$  и  $x_{21} = r_2 / s_K$ , получим уравнение механической характеристики электродвигателя выраженной через каталожные данные (упрощенное уравнение Клосса)

$$M = \frac{2M_K}{S / S_K + S_K / S}. \quad (2)$$

При этом критическое скольжение находится по формуле

$$S_K = S_H (\mu_K + \sqrt{\mu_K^2 - 1}), \quad (3)$$

где  $\mu_K = M_K / M_H$  - перегрузочная способность электродвигателя.

Поскольку коэффициент  $k_1$  включает в себя магнитный поток  $\Phi$  и ЭДС  $E_{21}$ , пропорциональные приложенному (сетевому) напряжению, то следовательно момент пропорционален квадрату напряжения  $M \propto U^2$ .

#### **Дополнительная литература**

- Шичков Л. П. Электрический привод. – М.: КолосС, 2006. с. 13...23.
- Лекции по теме: «Механические характеристики и регулирование частоты вращения 3-х фазного асинхронного электродвигателя».

#### **Порядок выполнения задания**

##### **1 Знакомимся с основными техническими данными и расположением оборудования**

Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии

##### **2. Собираем схему экспериментальной установки**

Соберём электрическую схему по плакату. Сидоров собирает узел А1; Козлов – узел А2 и так далее. Во время сборки перечертим схему в тетради.



д). С помощью переключателя QS1 устанавливается необходимая, указанная в строке 3 таблицы записи наблюдений, величина добавочного сопротивления  $R_X$  (в данном случае  $R_2$ ) в цепи ротора.

#### 4. Записываем действия по снятию параметров характеристики:

а). Устанавливается заданная для данной точки величина тока  $I_1$ , смещением друг относительно друга движков потенциометра R1;

б). Устанавливается необходимый для конкретной точки (указанный в строке 5) предел измерения по току  $I_{П2}$ . Рассчитываются цены деления вольтметра PV2 ( $\Pi_{ДРPV2}=U_{П2}/150$ ), амперметра PA2 ( $\Pi_{ДРА2}=I_{П2}/150$ ) и ваттметра PW1 ( $\Pi_{ДРPW1}=U_{П2}I_{П2}/150$ ).

в). Измеряются и заносятся в таблицу на доске ток  $I_2$ , напряжение  $U_2$  и с учётом знака напряжение  $U_1$ , количество делений шкалы, на которое отклонилась стрелка указателя момента  $M_{Ш}$ , и число оборотов вала электродвигателя в минуту.

г). Переключатель предела измерения амперметра PA2 устанавливается на 25А.

#### 5. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных при снятии естественной механической характеристики

Старший по работе вычерчивает таблицу на доске, а все остальные в тетрадях. Распределяются исполнители.

**Таблица 1**

Исполнитель	$K_u$ м	Цой	И т. д.						
Опытные данные									
$R_2=0$									
$I_1, A$	20 -	15 -	10	5	0	5	1	5	10
$I_{П2}, A$									
$I_2, A$									
$U_1, B$									
$U_2, B$									
$P_1, Вт$									
$M_{Ш}$ , дел									
n, об/мин									
Расчётные данные									
$\omega=\pi n/30$ , 1/с									
$M=15, 8*\sin(M_{Ш}/135)$ , Нм									
$P_B=M\omega$ , Вт									
$P_{Э1}=U_1 I_1$ , Вт									
$P_{Э2}=3 P_1$ , Вт									

$\cos\varphi_2$ $=P_{\Sigma 2}/3U_2I_2$									
$\eta_1=P_B$ $/P_{\Sigma 1}$									
$\eta_2=P_{\Sigma 2}$ $/P_B$									

Работу по пунктам 4.3 и 4.4 выполняет студент, снимающий первую точку зависимости. Его действия контролирует старший по работе, а студент, снимающий следующую точку поддерживает неизменным во время измерений ток  $I_1$ . Затем студент, снимающий первую точку садится, для расчёта и занесения в таблицу на доске расчётных данных. К измерению, выполняя пункты 4.4, приступает следующий студент. И т. д. вплоть до последней точки. Далее одновременно отключаются машины переменного тока, а затем снимается напряжение с обмоток возбуждения машин постоянного тока.

**6. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных при снятии реостатной механической характеристики ( $R_2 \neq 0$ )**

**Таблица 3**

Исполнитель	$K_u$ м	Цой	И т. д.						
Опытные данные									
$R_2=0$									
$I_1, A$	20 -	15 -	10	5	0	5	10	15	20
$I_{\Pi 2}, A$									
$I_2, A$									
$U_1, B$									
$U_2, B$									
$P_1, Вт$									
$M_{\Pi 3},$ дел									
$n,$ об/мин									
Расчётные данные									
$\omega=\pi n/30, 1/c$									
$M=15, 8*\sin(M_{\Pi 3}/135), Нм$									
$P_B=M\omega, Вт$									
$P_{\Sigma 1}=U_1I_1, Вт$									
$P_{\Sigma 2}=3P_1, Вт$									
$\cos\varphi_2$ $=P_{\Sigma 2}/3U_2I_2$									



$\eta_1 = P_B / P_{\Sigma 1}$									
$\eta_2 = P_{\Sigma 2} / P_B$									

*Распределяются исполнители. Выполняются действия по пунктам 4.3 и 4.4 в порядке, описанном выше.*

### **7. Строим графики механических характеристик**

*Старший по работе на доске все остальные студенты в тетрадях заготавливают оси координат с учётом, что на поле графика должны быть размещены все снятые характеристики. Для первой характеристики каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске. Старший по работе на доске, а все остальные студенты в тетрадях проводят аппроксимирующие линии*

*В таком же порядке строится вторая характеристика.*

*Оставить место для графиков*

### **8. Осуществляем оценку опытных и теоретических данных**

*Сделать заключение, насколько экспериментальные характеристики соответствуют теоретическим предположениям.*

#### **Контрольные вопросы:**

1. Устройство асинхронного электродвигателя.
2. Схема включения асинхронного электродвигателя в звезду и треугольник.
3. Показать на полученной механической характеристике участки двигательного режима, режима противовключения и рекуперативного торможения.
4. Чему равен пусковой ток асинхронного электродвигателя?
5. Чему равен пусковой момент асинхронного электродвигателя?
6. Как определить по паспортным данным номинальный момент асинхронного электродвигателя?
7. Как определить по данным опыта коэффициент мощности электродвигателя?
8. Написать уравнение механической характеристики асинхронного электродвигателя.
9. Начертить две механические характеристики асинхронного электродвигателя для двух различных напряжений.
10. Достоинства и недостатки режима генераторного (рекуперативного) торможения.
11. Чему равна синхронная частота асинхронного электродвигателя?
12. Где рассеивается в режиме торможения противовключением кинетическая энергия механизма?

***Подготовить ответы на вопросы, сдать на проверку преподавателю отчёт и ответить на один из вопросов по выбору преподавателя***

*Материальное обеспечение - универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 208 (источник питания переменного трёхфазного тока 127/220В; источник питания постоянного тока 127В; электродвигатель постоянного тока на панели №51б; асинхронный электродвигатель на панели №51а; электродвигатель постоянного тока (балансирная машина) на панели №50б; испытуемый съёмный асинхронный электродвигатель с фазным ротором; амперметр на панели №15а; амперметр постоянного тока на панели №11а; вольтметр на панели №15б; ; вольтметр на панели №11б; вольтметр на панели №12; двухдвижковый реостат на панели №72; тахометр переносной на 10000 об/мин; переключатель на панели № ) плакат со схемой испытания электродвигателя:*

## 2.7 Лабораторная работа №8 ( 2 часа).

**Тема: «Исследование пусковых свойств однофазного асинхронного электродвигателя»**

**2.7.1 Цель работы:** Научиться измерять и рассчитывать параметры режимов работы, убедиться в справедливости теоретических положений относительно влияния напряжения и ёмкости пусковых конденсаторов на величину пускового момента.

### 2.7.2 Задачи работы:

Снять зависимость пускового момента и пускового тока от величины приложенного напряжения и величины ёмкости пускового конденсатора  $M_{\text{п}}, I_{\text{п}} = f(U)$  и  $M_{\text{п}}, I_{\text{п}} = f(C_{\text{п}})$ .

### 2.7.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Мультимедиапроектор
2. Автоматический выключатель АП-50 - ~220В
3. Автоматический магнитный пускатель ПА- 3
4. Вольтметр 250В
5. Амперметр 75А
6. Асинхронный электродвигатель с 3Ф кор. зам. Тип А031-4
7. Кнопочная станция, конденсаторы 1

### 2.7.4 Описание (ход) работы:

#### Краткие теоретические положения

Однофазный асинхронный электродвигатель имеет короткозамкнутый ротор с обмоткой типа беличьей клетки, ничем не отличающийся от ротора 3-х фазного асинхронного электродвигателя. На статоре же имеется только две обмотки: рабочая и сдвинутая относительно неё по окружности статора на  $90^\circ$  пусковая обмотка. Если через обмотки пропустить токи, сдвинутые друг относительно друга на четверть периода, то в статоре образуется вращающееся магнитное поле, увлекающее за собой ротор, так же как и в трёхфазном электродвигателе.

Сдвиг тока в пусковой обмотке осуществляется за счёт включения её в сеть через конденсатор. Ёмкость конденсатора, при которой поле статора близко к круговому, а пусковая обмотка не перегревается, считается рабочей и остаётся включённой в течение всего времени работы электродвигателя. Для увеличения пускового момента к ней добавляется пусковая ёмкость, большая по величине в 2...3 раза. Но тогда поле в статоре электродвигателя становится эллиптическим, электродвигатель при длительной работе перегревается. Поэтому пусковая ёмкость после завершения пуска отключается.

Момент однофазного электродвигателя (как и трёхфазного) сильно зависит от величины напряжения и пропорционален его квадрату.

В качестве однофазного можно использовать и трёхфазный электродвигатель, объединив две из его обмоток (соединив последовательно или параллельно). Именно это и сделано в лабораторной работе. Тогда объединённые обмотки образуют эквивалентную им обмотку, сдвинутую по окружности статора на  $90^\circ$  по отношению к оставшейся. Таким образом, приняв одну из них за рабочую, а другую за пусковую, мы по существу будем иметь однофазный электродвигатель. Мощность такого электродвигателя в однофазном режиме уменьшится примерно в два раза по сравнению с его работой в трёхфазном режиме.

#### *Дополнительная литература*

- Шичков Л. П. Электрический привод. – М.: КолосС, 2006. с. 19...21.

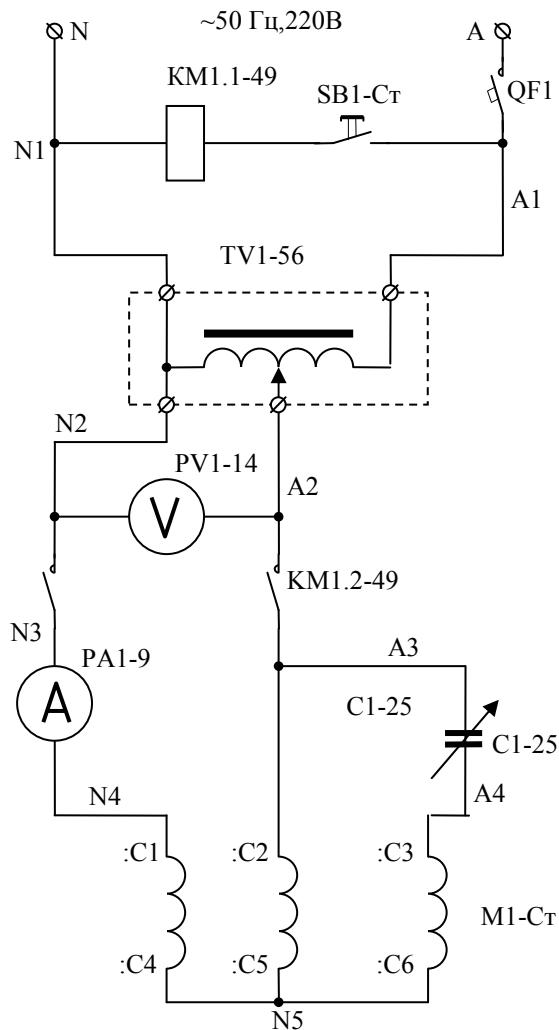
- Лекции по теме: «Устройство, принцип действия и механические характеристики однофазного асинхронного электродвигателя».

### Порядок выполнения задания

#### **1. Знакомимся с составом и основными техническими данными электрооборудования, используемого в лабораторной работе**

*Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии*

#### **2 Собираем схему экспериментальной установки:**



**Рис. 1: Принципиальная схема установки для испытания асинхронного электродвигателя в однофазном режиме.**

*Собрать электрическую схему: Сидоров собирает узел A1; Козлов – узел A2 и так далее.*

#### **3. Записываем действия при определении параметров точки экспериментальной зависимости**

а). Переключаем амперметр на указанный предел измерения, устанавливаем заданную величину пусковой ёмкости и с помощью автотрансформатора заданное напряжение.

б). Включаем установку и, нажав на несколько секунд кнопку SB1, фиксируем и затем записываем в таблицу, на какое количество делений отклонилась стрелка амперметра и стрелка указателя момента. Отключаем установку. *Во время фиксации один глаз прикрыть, а второй должен находиться точно напротив конца стрелки указателя момента.*

в). Рассчитываем цену деления амперметра

$$\Pi_{\text{д}} = I_{\text{пр}} / N_{\text{ш}} \text{ (А\дел)} \quad (1)$$

где  $N_{\text{ш}}$  - полное количество делений шкалы амперметра.

И далее пусковой ток

$$I_{\text{п}} = \Pi_{\text{д}} * N_{\text{I}} \text{ (А)} \quad (2)$$

и пусковой момент

$$M_{\text{п}} = 3,16 \sin \frac{N_{\text{M}}}{473} \text{ (Нм)}. \quad (3)$$

#### 4 Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Ведущий на доске, а все остальные студенты в тетради.

Данные опытов и расчётов

Таблица 1

очк и	Исполнитель	U, В	C <sub>п</sub> , мкФ	пр	N <sub>ш</sub> , дел	I <sub>п</sub> , А	N <sub>ш</sub> , дел	M <sub>п</sub> , Нм
	<b>I</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
	Сидоров	0	2	,5А				
	Козлов	0	2	,5А				
	И. т. д.	0	2	,5А				
		00	2	,5А				
		20	2	А				
		40	2	А				
		60	2	А				
		80	2	А				
		00	2	А				
<b>0</b>		20	2	,5А				
<b>1</b>		20	3	,5А				
<b>2</b>		20	9	,5А				
<b>3</b>		20	5	,5А				
<b>4</b>		20	1	,5А				
<b>5</b>		20	7	,5А				
<b>6</b>		20	3	,5А				
		2	0					

7		20		,5A				
---	--	----	--	-----	--	--	--	--

### 5. Строим графики экспериментальных зависимостей

А) Заготавливаем оси координат для первого и оси координат для второго графиков (ведущий на доске все остальные студенты в тетради).

Б). Наносим каждую точку зависимости на поле графиков (кроме того каждый из ответственных за точку наносит её на поле графиков, расположенных на доске)

В). Проводим на графиках аппроксимирующие линии (ведущий это делает на доске, а все остальные в тетради)

*Оставить место для графиков*

### 6. Оценим результаты испытаний

*Оценить и записать в тетрадь, насколько близко опытные данные согласуются с теоретическими.*

#### **Контрольные вопросы:**

1. Устройство однофазного асинхронного электродвигателя.
2. В какой зависимости находится пусковой момент от напряжения?
3. Как формируется вращающееся магнитное поле в однофазном электродвигателе?
4. Какой вид имеет механическая характеристика однофазного электродвигателя без пусковой обмотки?
5. Почему пусковая ёмкость отличается от рабочей ёмкости?
6. Как запустить однофазный электродвигатель при отсутствии пусковой обмотки?
7. В каком случае формируется эллиптическое поле в статоре однофазного электродвигателя и в каком случае круговое?
8. По какой формуле находится необходимая пусковая ёмкость для запуска 3-х фазного электродвигателя от однофазной сети?
9. В каком соотношении находятся пусковая и рабочая ёмкости?
10. Какую мощность может развивать 3-х фазный электродвигатель в однофазном режиме?

***Подготовить ответы на вопросы, сдать на проверку преподавателю отчёт и ответить на один из вопросов по выбору преподавателя***

*Материальное обеспечение - универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 210: источник питания переменного трёхфазного тока 220В; автотрансформатор на панели №56; амперметр многопредельный на панели №9; вольтметр переменного тока на 250В на панели №14; магнитный пускатель с катушкой на 220В на панели №49; батарея конденсаторов на 30 мкФ на панели № , плакат:*

### 2.8 Лабораторная работа №9, 10 ( 4 часа).

**Тема: «Исследование асинхронного электропривода генератора постоянного тока»**

**2.8.1 Цель работы:** Научиться производить сборку схемы, осуществлять запуск электродвигателя, производить регулирование величины напряжения и нагрузки генератора постоянного тока, устанавливать, измерять и рассчитывать параметры режимов работы.

### 2.8.2 Задачи работы:

Снять зависимость коэффициента мощности и коэффициента полезного действия асинхронного электродвигателя от коэффициента загрузки  $\cos \varphi, \eta = f(K_3)$ , а также построить механическую характеристику  $M = f(\omega)$ .

### 2.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Мультимедиапроектор
2. Фазометр соБф 0,5
3. Автотрансформатор
4. Диоды Д245
5. Резистор Я=4Ом
6. Амперметр -25А
7. Вольтметр -300В
8. Вольтметр 250В
9. Амперметр 75А
10. Асинхронный двигатель 4АМ10062У3
11. Машина постоянного тока тип ПН-10, автоматический

### 2.8.4 Описание (ход) работы:

#### Краткие теоретические положения

Генератор постоянного тока с независимым возбуждением используется как источник регулируемого напряжения для питания электродвигателей, нагревательных устройств в системах автоматического регулирования и для других целей. Приводится он во вращение асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором. В зависимости от величины тока возбуждения изменяется напряжение на сопротивлении нагрузки генератора и, следовательно, изменяется развиваемая им мощность, а вместе с ней и мощность на валу и на зажимах приводного электродвигателя. Реактивная же мощность, потребляемая им из сети, остаётся практически неизменной. Поэтому коэффициент мощности электродвигателя с изменением нагрузки также изменяется.

Изменяется и коэффициент полезного действия, поскольку изменяются теплотери, равные сумме постоянных потерь (а) и переменных (b), пропорциональных квадрату загрузки. При номинальной нагрузке мощность потерь равна

$$P_{\text{пн}} = a + b_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} (1 - \eta_{\text{н}}) \quad (1)$$

или

$$P_{\text{пн}} = a + b_{\text{н}} = P_{1\text{н}} - P_{2\text{н}} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\text{н}} - P_{2\text{н}}. \quad (2)$$

С учётом того, что для асинхронного электродвигателя отношение постоянных потерь к переменным при номинальной нагрузке

$$\alpha = \frac{a}{b_{\text{н}}} = 0,6, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - коэффициент потерь, получим:

$$a = \frac{3}{8} P_{\text{пн}}; \quad b_{\text{н}} = P_{\text{пн}}/1,6. \quad (4)$$

Подсчитав, таким образом,  $a$  и  $b$ , можно найти потери мощности при любой нагрузке по формуле

$$P_{\Pi} = a + b_{\Pi} \frac{P_2^2}{P_{2H}^2} \quad (5)$$

### **Дополнительная литература**

Лекции по темам: «Механические характеристики и регулирование частоты вращения 3<sup>х</sup> фазного асинхронного электродвигателя» и «Коэффициент мощности в электросиловых установках».

### **Порядок выполнения задания**

#### **1. Записываем технические данные оборудования:**

Старший по работе заготавливает таблицу на доске и распределяет задания по строкам таблицы. Ответственные за каждую из строк записывают технические данные оборудования в таблицу на доске, а все остальные в тетради.

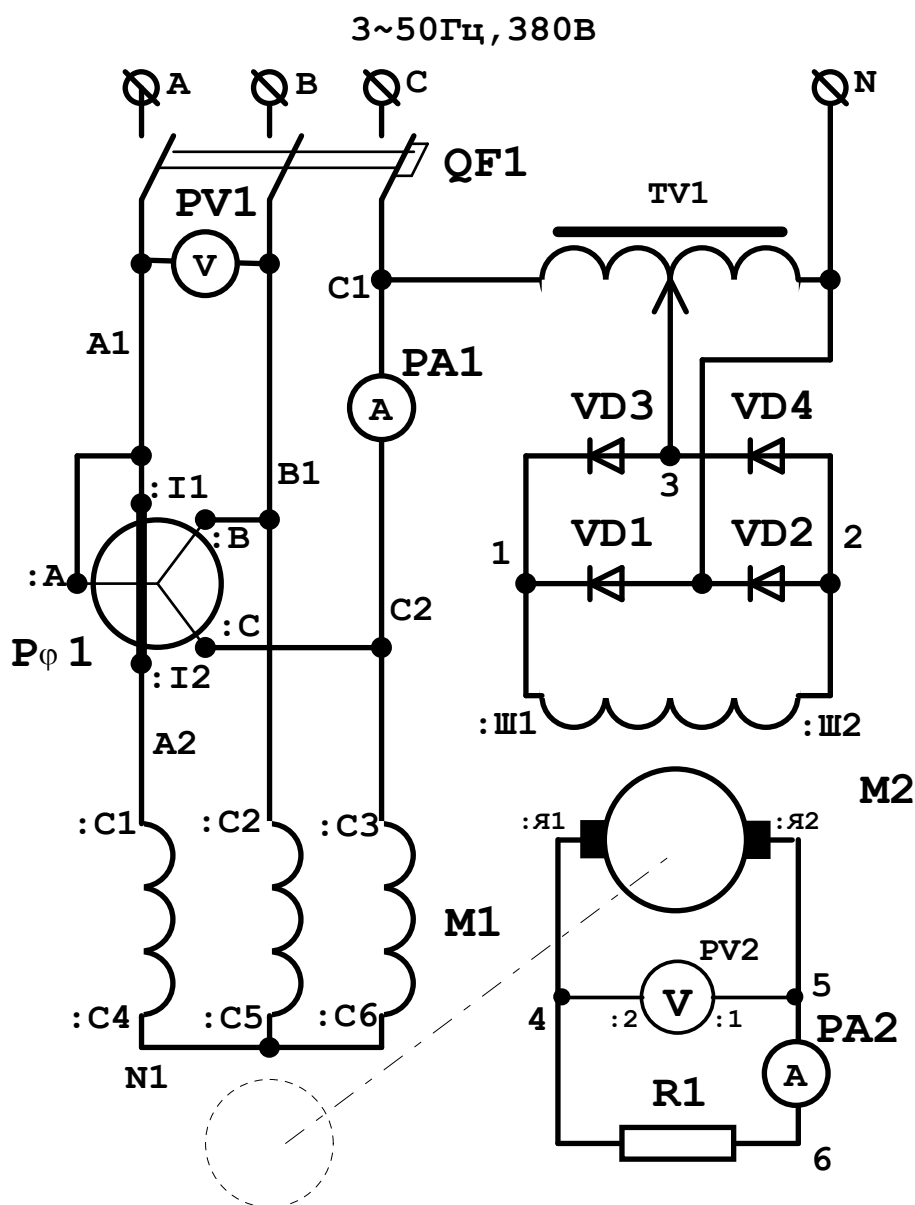
#### **Перечень элементов**

**Таблица 1**

Поз. обозн.	П	Наименование и основные технические характеристики	-во	Примечание
F1	Q	Волков		Панель №0С
1	M	Сидоров		Панель №52
2	M	Козлов		Панель №52
V1	P	И так далее		Панель №16б
V2	P			Панель №16а
A1	P			Панель №9
A2	P			Панель №15
φ1	P			Панель №4
V1	T			Панель №56
D1...V D4	V			Панель №28
1	R	R=11,4 Ом; I <sub>доп</sub> =20А		Панель №72а

#### **2. Собираем схему экспериментальной установки**

Собрать электрическую схему по плакату. Сидоров собирает узел A1, Козлов A2 и т. д.. Во время сборки перерисуем схему с плаката в тетради.



**Рис. 1: Принципиальная схема установки для испытания электропривода генератора.**

### **3 Записываем порядок запуска электродвигателя**

а). Установим движок автотрансформатора в нулевое положение (против часовой стрелки до упора).

б). Включаем автоматический выключатель QF1, убеждаемся, что электродвигатель вращается по стрелке.

в). Плавно увеличиваем напряжение на обмотке возбуждения генератора, убеждаемся, что напряжение на якоре и нагрузка увеличиваются.

### **4 Записываем действия по снятию и расчёту параметров характеристик**

а). Устанавливаем заданную величину коэффициента мощности;

б). Измеряем и заносим в таблицу на доске ток, напряжение, и число оборотов вала электродвигателя в минуту;

в). Рассчитываем и заносим в таблицу на доске частоту вращения, полную и активную мощности на зажимах;

г). По уравнениям (1)...(4) определим полные  $P_{\text{пн}}$ , постоянные  $a$  и переменные при номинальной нагрузке  $b_n$  потери;



д). По уравнению (5) определим потери в установленном режиме  $P_{\Pi}$ . Однако поскольку мощность на валу в установленном режиме нам не известна, заменим её величиной  $P_1 - P_{\Pi}$  и получим следующее выражение

$$P_{\Pi} = a + b_H \frac{(P_1 - P_{\Pi})^2}{P_{2H}^2}, \quad (6)$$

В данном выражении неизвестна только величина  $P_{\Pi}$ . После преобразований, получим квадратное уравнение вида

$$A P_{\Pi}^2 + B P_{\Pi} + C = 0, \quad (7)$$

$$\text{где: } A = b_H; B = -(P_{2H}^2 + 2b_H P_1); C = a P_{2H}^2 + b_H P_1^2.$$

Справка: квадратное уравнение вида  $a x^2 + b x + c = 0$  имеет решение

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

### 5. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных

*Старший по работе вычерчивает таблицу на доске, а все остальные в тетрадях. Распределяются исполнители.*

**Данные опытов и расчётов**

**Таблица 2**

Исполнитель	Жуков	Козлов	Иванов					
Опытные данные								
Cosφ	0,5	0,55	0,6	0,65	0,75	0,8	0,85	0,9
$U_l, B$								
$I_l, A$								
$n, \text{об/мин}$								
Расчётные данные								
$\omega, 1/c$								
$S_1, \text{кВА}$								
$P_1, \text{кВт}$								
$B$								
$C$								
$P_{\Pi}, \text{кВт}$								
$P_2, \text{кВт}$								
$M, \text{Нм}$								
$K_3$								
$\eta$								

*Работу по пункту 4.3 выполняет очередной студент и передаёт установку студенту, снимающему первую точку зависимости (Жукову).*

## **6. Строим графики искомых зависимостей**

*Старший по работе на доске, а все остальные студенты в тетрадях заготавливают оси координат. Каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске, а все остальные студенты в тетради. Проводятся на графиках аппроксимирующие линии. Старший это делает на доске.*

## **7. Оцениваем соответствие опытных и теоретических данных.**

*Оценивается и записывается в тетрадях, насколько близко опытные данные согласуются с теоретическими. Если имеются расхождения, объясняется их причина.*

### **Контрольные вопросы:**

1. Устройство асинхронного электродвигателя.
2. Схема включения э. д. в треугольник.
3. Написать уравнение активной мощности на зажимах асинхронного электродвигателя.
4. Чему равен пусковой ток асинхронного электродвигателя?
5. Чему равен пусковой момент асинхронного электродвигателя?
6. Как определить потери мощности при коэффициенте загрузки, отличном от единицы?
7. Что такое коэффициент загрузки и как он определяется в лабораторной работе?
8. Написать уравнение механической характеристики асинхронного электродвигателя.
9. Начертить две механические характеристики асинхронного электродвигателя для двух различных напряжений.
10. Как определить по данным опыта момент на валу электродвигателя?

***Подготовить ответы на вопросы, сдать на проверку преподавателю отчёт и ответить на один из вопросов по выбору преподавателя***

### ***Материальное обеспечение***

*Универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 208: - источник питания переменного трёхфазного тока 380В; плакат со схемой включения электродвигателя; электродвигатель постоянного тока на панели №52; асинхронный электродвигатель на панели №52; фазометр на панели №4; Амперметр на 7,5А на панели №9; амперметр постоянного тока на 20А на панели №9; вольтметр на 250В на панели №16б; вольтметр на панели №16а; автотрансформатор на панели №56; диоды на 5А, 300В на панели №28; тахометр переносной на 10000 об/мин; нагрузочное сопротивление на панели №72а.*

## **2.9 Лабораторная работа №11, 12 ( 4 часа).**

**Тема: «Схема управления электродвигателем с переключением со звезды на треугольник»**

**2.9.1 Цель работы:** Изучить схему управления электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия пневматического реле времени, научиться производить сборку схемы, убедиться в эффективности функционирования схемы.

### **2.9.2 Задачи работы:**

Собрать схему управления электродвигателем и испытать её в лабораторных условиях.

### **2.9.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Мультимедиапроектор
2. Автоматический выключатель АП-50 - ~220В

3. Асинхронный двигатель АБ-80-4
4. Магнитные пускатели
5. Реле времени
6. Фазометр
7. Амперметр
8. Вольтметр
9. Автоматический переключатель.

#### **2.9.4 Описание (ход) работы:**

##### **Краткие теоретические положения**

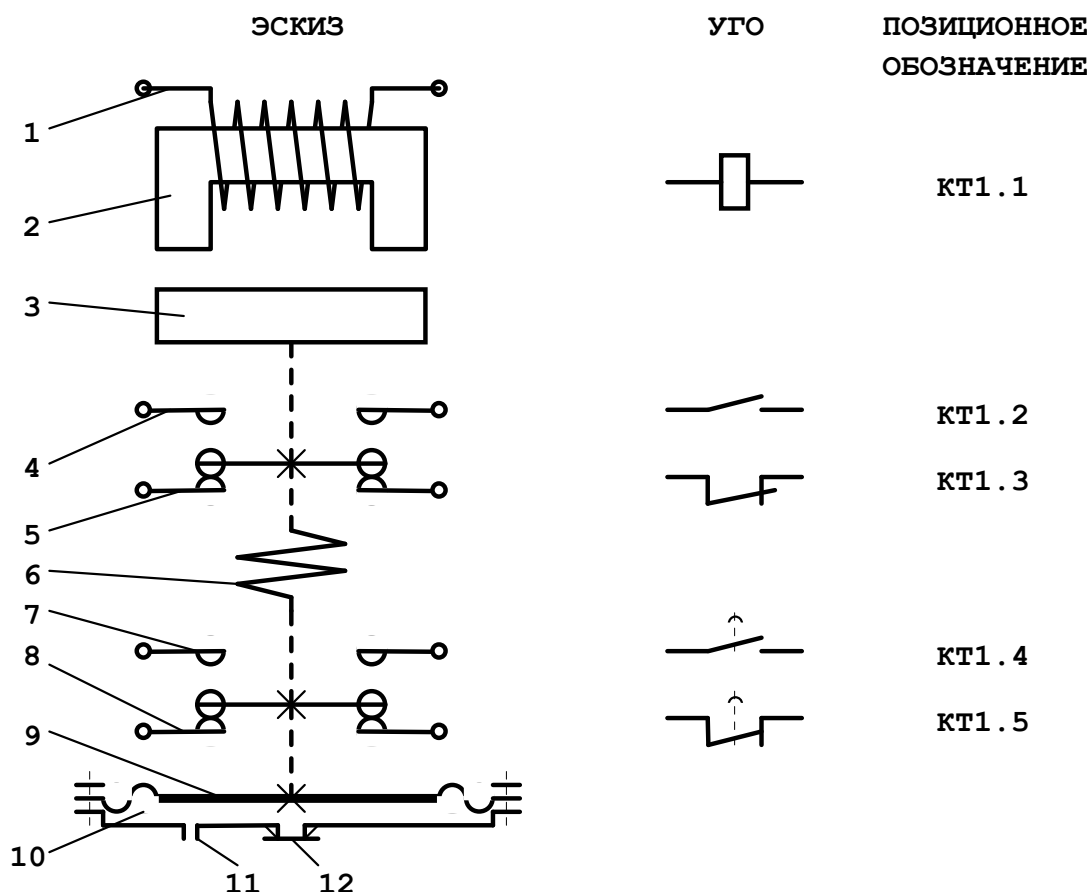
Переключение электродвигателя со звезды на треугольник производится, во-первых, при запуске электродвигателя с целью разгрузки маломощной электрической сети от повышенного пускового тока. При этом напряжение на обмотках при соединении их «звездой» по сравнению с соединением «треугольником» снижается в  $\sqrt{3}$  раз, во столько же раз снижается и фазный пусковой ток. Линейный же ток, что особенно важно для стабильности напряжения в питающей сети, снижается в три раза. К сожалению, поскольку момент пропорционален квадрату напряжения, в три раза снижается и пусковой момент. Поэтому данный способ запуска применим только для рабочих машин с малым моментом трогания.

Во-вторых, обратное переключение электродвигателя с треугольника на звезду производится с целью повышения коэффициента мощности при малой (не превышающей 30%) степени загрузки электродвигателя. В этом случае, хотя момент электродвигателя и снижается в три раза, но его оказывается достаточно для преодоления пониженного (при недогрузке) момента сопротивления рабочей машины.

Ниже приведена схема для управления электродвигателем с возможностью переключения со звезды на треугольник или наоборот. Она состоит из реверсивного магнитного пускателя КМ1-КМ2, переключателя режима работы SA1, трёхкнопочного поста управления SB1...SB3 и приборов для контроля параметров электродвигателя. В схеме задействовано пневматическое реле времени КТ1. Ниже приведен эскиз, раскрывающий устройство и принцип действия реле.

Оно состоит из катушки 1 медного изолированного провода, намотанной на неподвижный сердечник 2, взаимодействующий с подвижным сердечником 3. Сердечник механически связан с контактами 4 и 5 и через пружину 6 с контактами 7, 8 и мембраной 9, перекрывающей замкнутую полость 10. Полость связана с атмосферой через отверстие малого диаметра 11 и клапан 12.

При подаче напряжения на катушку (входной сигнал) подвижный сердечник притягивается к неподвижному и через механическую связь без выдержки времени замыкает контакты КТ1.2 и размыкает контакты КТ1.3. Одновременно под действием пружины по мере заполнения воздухом полости 10 через отверстие 11 начинается перемещение мембраны 9. Когда она переместится на достаточное расстояние, замкнутся контакты КТ1.4 и одновременно разомкнутся контакты КТ1.5. Возврат этих контактов при снятии напряжения с катушки осуществляется без выдержки времени, так как воздух из полости выходит через клапан 12 свободно и не препятствует перемещению мембраны.



**Рис. 1: Схема устройства реле времени.**

*Дополнительная литература - Лекция по теме: «Механические характеристики и регулирование частоты вращения асинхронного электродвигателя».*

**Порядок выполнения задания**

**1. Технические данные оборудования:**

*Старший по работе заготавливает таблицу на доске и распределяет задания. Ответственные за работу заносят технические данные в таблицу на доске, а все остальные студенты в свои тетради.*

**Перечень элементов**

**Таблица 1**

Поз. обозн.	Наименование и основные технические характеристики	-во	Примечание
QF1	<i>Козлов</i>		Панель №0B
M1	<i>Сидоров</i>		Панель №53
KM1, KM2	<i>И т. д.</i>		Панель №44
KT1			Панель №31a
Pφ1			Панель №6
PA1			Панель №9
PV1			Панель №14б
SA1			Панель

## 2 Схема управления электродвигателем

Схема изображена на плакате и рис. 2. Работает она следующим образом.

С помощью автоматического выключателя QF1 напряжение подаётся на обмотки электродвигателя и схему управления. Однако ток через обмотки электродвигателя, обмотки магнитных пускателей и реле времени не течёт поскольку разомкнуты силовые контакты КМ1.1 и КМ2.1 магнитных пускателей, а также блокировочные контакты КМ1.3, КМ2.3. Разомкнуты также контакты SB1.2, SB2.2 кнопок и контакты КТ1.2, КТ1.4 реле времени КТ1. Если переключатель SA1 находится в положении «РУЧНОЙ», то обмотка КТ1.1 реле времени КТ1 запитана быть не может и реле времени на работу схемы влияния не оказывает. В этом случае переключение со звезды на треугольник и наоборот осуществляется оператором.

При нажатии на кнопку SB1 «ЗВЕЗДА» размыкается контакт SB1.1 предотвращая включение катушки КМ2.2 магнитного пускателя КМ2 и замыкается контакт SB1.2. Начинает протекать ток по цепи: **фаза С сети – катушка КМ1.2, размыкающий контакт с выдержкой времени при размыкании КТ1.5 реле времени КТ1 – размыкающий контакт КМ2.4 магнитного пускателя КМ2 – размыкающий контакт SB2.1 кнопки SB2 – замыкающий контакт SB1.2 кнопки SB1 – размыкающий контакт кнопки SB3 – фаза А сети**. Магнитный пускатель КМ1 срабатывает. Замыкаются его силовые контакты КМ1.1, запитывающие обмотки электродвигателя М1 по схеме «звезда», размыкается контакт КМ1.4, предотвращая включение катушки КМ2.2, и замыкается контакт КМ1.3, резервируя цепь питания катушки КМ1.2 на случай, когда контакты SB1.1 при отпускании кнопки SB1 разомкнутся.

Электродвигатель будет работать по схеме «звезда» до тех пор, пока не будет нажата кнопка SB2 «ТРЕУГОЛЬНИК». В этом случае замкнутся контакты SB2.2, подготавливая цепь питания катушки КМ2.2, и разомкнутся контакты SB2.1. Катушка КМ1.2 потеряет питание, магнитный пускатель КМ1 разомкнёт свои силовые контакты КМ1.1 (электродвигатель на мгновение обесточится) разомкнёт блокировочные контакты КМ1.3, разблокировав контакты SB1.2, и замкнёт контакты КМ1.4. При этом запитается катушка КМ2.2 магнитного пускателя КМ2 по цепи: **фаза С – катушка КМ2.2 – контакты КМ1.4 магнитного пускателя КМ1 – контакты SB1.1 – контакты SB2.2 нажатой кнопки SB2 – кнопка SB3 – фаза А**. Магнитный пускатель КМ2 сработает: замкнёт свои силовые контакты КМ2.1, переключив обмотки ещё вращающегося по инерции электродвигателя М1 в треугольник; заблокирует контактами КМ2.3 замыкающие контакты SB2.2 на случай отпускания кнопки SB2; разомкнёт контакты КМ2.4, предотвращая возможность одновременного срабатывания обоих пускателей.

Отключение электродвигателя, независимо от того работает он в «звезду» или в «треугольник» осуществляется путём нажатия на кнопку SB3. При размыкании контакта этой кнопки теряет питание или катушка КМ1.2, или катушка КМ2.2 – электродвигатель отключается. При этом отпускание кнопки SB3 не приводит к повторному включению пускателей поскольку успевают разомкнуться блокировочные контакты КМ1.3 или КМ2.3 (в зависимости от того какой пускатель был включён)

Если же переключатель SA1 находится в положении «АВТОМАТИЧЕСКИЙ», подготовлена цепь питания катушки КТ1.1 реле времени. В этом случае при нажатии на кнопку SB1 электродвигатель запускается в звезду, как и в предыдущем случае, но одновременно с включением катушки магнитного пускателя КМ1 запитывается катушка КТ1.1 реле времени КТ1 по цепи: **фаза С – катушка КТ1.1 реле времени КТ1 – контакт 1-3 переключателя SA1 – контакт кнопки SB3 – фаза А сети**. Реле КТ1 сработает и своими замыкающими контактами КТ1.2 дополнительно заблокирует замыкающий контакт SB1.2 с тем, чтобы катушка реле не потеряла питание ни при отпускании кнопки SB1, ни при отключении магнитного пускателя КМ1. Через несколько секунд после того как электродвигатель развернется, разомкнётся контакт с выдержкой времени при

размыкании КТ1.5. Катушка КМ1.2 магнитного пускателя КМ1 потеряет питание. Электродвигатель отключится, но одновременно с этим через замкнувшиеся теперь контакты КМ1.4 будет подано напряжение на обмотку КМ2.2 магнитного пускателя КМ2 по цепи: фаза **С** – катушка **КМ2.2** – контакты **КМ1.4** магнитного пускателя **КМ1** – контакты **SB1.1** – контакты **КТ1.4** реле времени **КТ1** – кнопка **SB3** – фаза **А**. Магнитный пускатель КМ2 сработает: замкнёт свои силовые контакты КМ2.1, переключив обмотки ещё вращающегося по инерции электродвигателя М1 в треугольник; заблокирует контактами КМ2.3 замыкающие контакты SB2.2, разомкнёт контакты КМ2.4, предотвращая возможность одновременного срабатывания обоих пускателей.

Таким образом, в автоматическом режиме оператору не нужно отслеживать окончание запуска электродвигателя на соединении в «звезду» и не нужно нажимать кнопку SB2 для перевода электродвигателя на «треугольник». Эти функции взяло на себя реле времени. Отключение электродвигателя, как и в ручном режиме, осуществляется нажатием на кнопку SB3.

*Соберём электрическую схему.*

*Сидоров – собирает узел 1; Козлов – узел 2 и так далее.*

*Расположение выводов элементов реле времени на панели соответствует расположению выводов на эскизе реле (рис.1). Одновременно схема перечерчивается всеми студентами в тетради.*

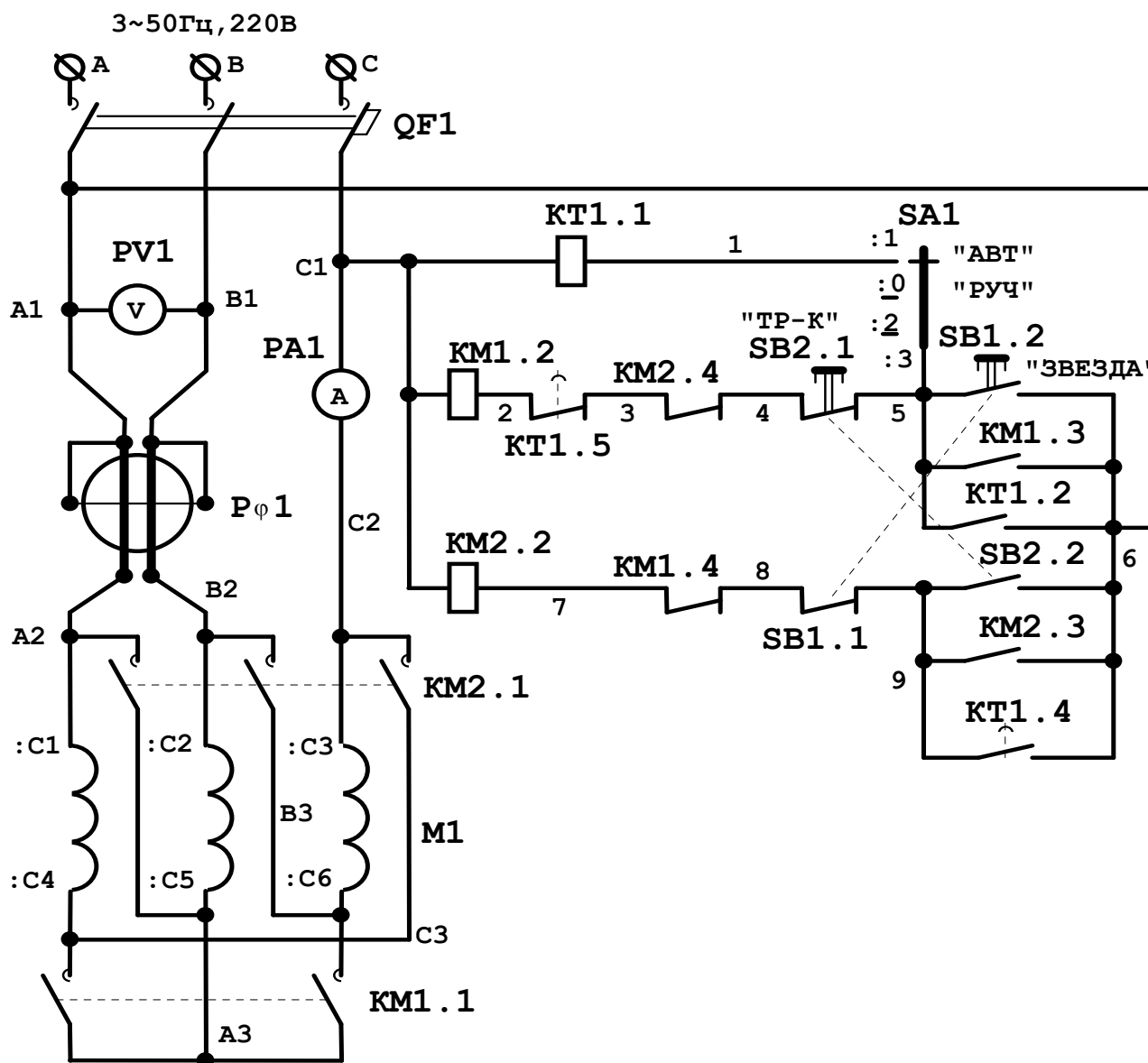


Рис.2: Принципиальная схема управления асинхронным электродвигателем с переключением со звезды на треугольник

### 3. Таблица записи наблюдений

Старший по работе заготавливает таблицу на доске, распределяются задания.

Данные опытов и расчётов

Таблица 2

Исполнитель	Схема соединения	Опытные данные			Расчётные данные	
		U, В	I, А	Cosφ	S, ВА	P, Вт
Сидоров	«Звезда»					
Козлов	«Треугольник»					

### 4 Осуществим испытание схемы

1. Симонов – устанавливает SA1 в положение «ПУЧ» объясняет, что произойдёт в схеме при включении QF1, подаёт напряжение и убеждает всех присутствующих в истинности им провозглашённого.

2. Сидоров – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB1; убеждает присутствующих в достоверности сказанного. Снимает и записывает показания приборов в таблицу на доске.

3. Козлов – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB2; убеждает присутствующих в достоверности сказанного. Снимает и записывает показания приборов в таблицу на доске.

4. Сорокин – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB3; убеждает присутствующих в достоверности сказанного.

5. Воронин – переводит переключатель SA1 в положение «авт». Объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB1; убеждает присутствующих в достоверности сказанного. Нажимает SB3.

6. Жириновский – регулирует выдержку реле времени. Показывает присутствующим результаты регулировки.

7. Старший по работе комментирует результаты измерений и расчётов и даёт команду на разборку схемы.

#### **Контрольные вопросы:**

1. С какой целью осуществляют перевод электродвигателя с треугольника на звезду при недогрузке электродвигателя?

2. Как расположены выводы обмоток трёхфазного электродвигателя на клеммной колодке с тем, чтобы было удобно с помощью перемычек переключать обмотки со звезды на треугольник?

3. Во сколько раз фазный и линейный пусковые токи электродвигателя с обмотками, соединёнными в «звезду», меньше фазных и линейных пусковых токов этого же электродвигателя с обмотками, соединёнными в «треугольник».

4. С какой целью осуществляют переключение со «звезды» на «треугольник» при пуске электродвигателя?

5. Показать цепь тока катушки магнитного пускателя при нажатии на кнопку SB1.

6. Во сколько раз уменьшается пусковой момент при переводе соединения обмоток электродвигателя с «треугольника» на «звезду»?

7. Как устроено пневматическое реле времени и какова схема реле, использованного в работе?

8. Как работает схема управления электродвигателем в автоматическом режиме?

9. Как работает схема управления электродвигателем в ручном режиме?

10. Как по показаниям приборов определить полную и активную мощности на зажимах электродвигателя?

11. Что произойдёт в схеме, если одновременно будут включены оба пускателя?

***Подготовить ответы на вопросы, сдать на проверку преподавателю отчёт и ответить на один из вопросов по выбору преподавателя***

***Материальное обеспечение:*** - универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 210; источник питания 3-х фазного переменного тока 127/220В; реле времени на панели №31; реверсивный магнитный пускатель на панели №44; трёхкнопочный пост управления на панели №23б; асинхронный электродвигатель на панели №53; амперметр на панели №9а; вольтметр переменного тока на панели №14б; фазометр на панели №6; плакаты: ***схема устройства пневматического реле времени; схема реверсивного управления асинхронным электродвигателем с переключением со звезды на треугольник.***

## **2.10 Лабораторная работа №13, 14 ( 4 часа).**

**Тема: «Изучение схемы управления асинхронным электродвигателем из двух мест с защитой от обрыва фазы»**

**2.10.1 Цель работы:** Изучить схему управления электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия реле обрыва фазы типа Е511,



научиться производить сборку схемы, убедиться в эффективности функционирования схемы.

#### **2.10.2 Задачи работы:**

Собрать схему управления электродвигателем и испытать её в лабораторных условиях.

#### **2.10.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

- 1.Мультимедиапроектор
2. Реле обрыва фаз
3. Тепловое реле
4. Магнитные пускатели
5. Асинхронный двигатель
6. Кнопочная станция
7. Автоматический выключатель АП-50 - ~220В

#### **2.10.4 Описание (ход) работы:**

##### **Краткие теоретические положения**

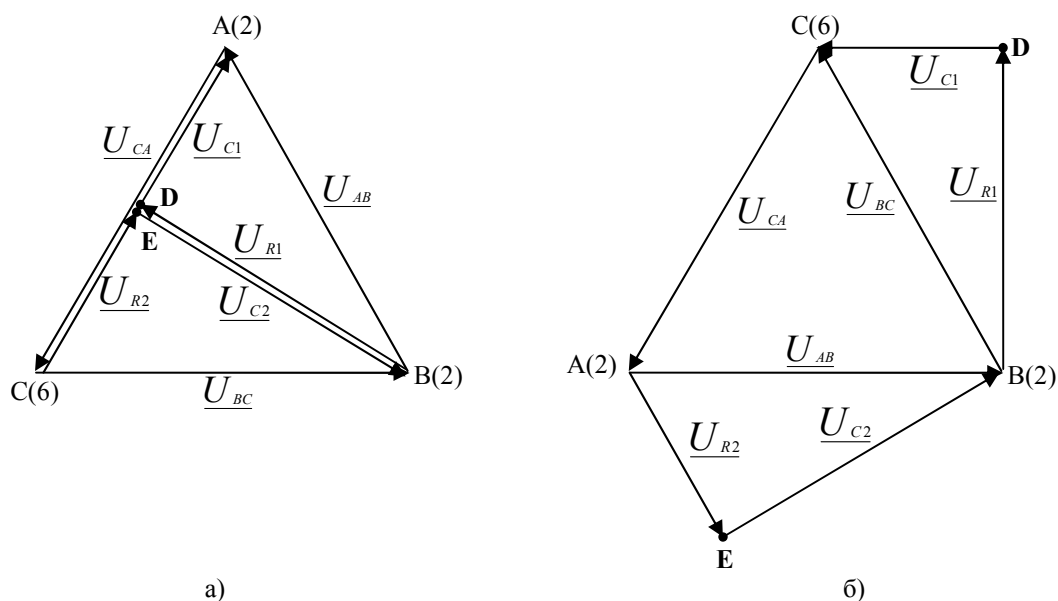
Схема предназначена для управления электродвигателем, работающим под наблюдением оператора, местонахождение которого в процессе работы может изменяться. Например, при обслуживании поточной технологической линии оператор может находиться или у центрального пульта управления, обзореая и управляя всеми машинами, реализующими технологический процесс, или непосредственно у отдельной рабочей машины, осуществляя её техническое обслуживание, наладку и регулировку. Поскольку оператор не может контролировать состояние электроприводов всех рабочих машин одновременно и в течение всего рабочего периода, каждый электродвигатель должен быть надёжно защищён от аварийных режимов. В первую очередь защищён от наиболее вероятных режимов перегрузки и неполнофазного режима.

Схема состоит (рис.2) из автоматического выключателя QFI, теплового реле КК1, реле обрыва фазы А1 типа Е 511 и из двух постов управления:

- 1 пост – кнопки SBC1 «пуск» и SBT2 “стоп”;
- 2 пост – кнопки SBC3 “пуск” и SBT4 “стоп”.

Для имитации режимов оборванной фазы в силовой цепи установлены кнопки SB5...SB7.

Реле А1 обрыва фазы типа Е511 состоит из 2-х цепей (R1, CI и R2, C2), соединенных последовательно и подключенных каждая на линейное напряжение электрической сети (клеммы 2 – фаза А, 4- фаза В, 6- фаза С).



**Рис. 1: Векторные диаграммы входных цепей реле обрыва фазы**

Емкости и сопротивления резисторов подобраны таким образом, что при симметричной системе напряжений в сети, а следовательно, и на клеммах 2, 4, 6 напряжение между точками **Д** и **Е** RC цепи равно нулю (рис. 1а). Поэтому равно нулю и напряжение на обмотке KL1.1 промежуточного реле KL1. Контакт этого реле KL1.2 замкнут и через него запитывается обмотка KL2.1 реле KL2 от фаз А и С электрической сети. Реле KL2 срабатывает, замыкается его контакт KL2.2 и тем самым подготавливает цепь для включения катушки KM1.1 магнитного пускателя KM1.

Если в сети произойдет обрыв одной из фаз или установится обратный порядок следования фаз (А,С,В), то между точками **Д** и **Е** RC цепи, а следовательно и на катушке KL1.1 появится напряжение (рис.1б). Реле KL1 сработает, разомкнет свой контакт KL1.2 в цепи катушки KL2.1. Реле KL2 вернется в исходное состояние и разомкнет свой контакт в цепи катушки KM1.1 магнитного пускателя KM1. Магнитный пускатель отключит электродвигатель М1, если он работал, и не позволит ему включиться, если до обрыва фазы он был отключен.

Тепловое реле КК1 служит для защиты электродвигателя М1 от перегрузки. Оно состоит из двух нагревательных элементов КК1.1 и КК1.2, включенных последовательно с обмотками электродвигателя в фазах А и С. При перегрузке электродвигателя биметаллическая пластина реле, расположенная вблизи нагревателей, перегревается, изгибается и через механические связи размыкает контакт КК1.3 теплового реле. Так как он включен последовательно с катушкой KM1.1, катушка обесточивается и магнитный пускатель своими силовыми контактами KM1.2 отключает электродвигатель.

Пуск электродвигателя оператором осуществляется кнопкой SBC1. При нажатии кнопки ее контакт замыкается, замыкая тем самым цепь: фаза С – KL2.2 – KM 1.1 – КК1.3 – SBC1 – SBT2 – N. Пускатель KM1 срабатывает, замыкаются его силовые контакты KM1.2, через которые запитываются обмотки электродвигателя М1. Одновременно замыкается блокировочный контакт KM1.3 магнитного пускателя, обеспечивая путь тока в обход контакта SBC1. Поэтому при отпускании кнопки SBC1 катушка KM1.1 пускателя не обесточивается и электродвигатель остается включенным. То же самое произойдет при нажатии на кнопку SBC3, расположенную в другом месте.

Отключение электродвигателя, независимо от того, с какого места он был включён, происходит при нажатии на кнопку SBT2 первого кнопочного поста управления или на кнопку SBT4 второго поста управления. Как в том, так и в другом случае разрывается цепь питания катушки KM1.1. Магнитный пускатель KM1 размыкает силовые контакты

КМ1.2, отключая электродвигатель. Размыкается и блокировочный контакт КМ1.3, что предотвращает повторное включение магнитного пускателя при отпускании кнопок SBT, когда их контакты снова замыкаются.

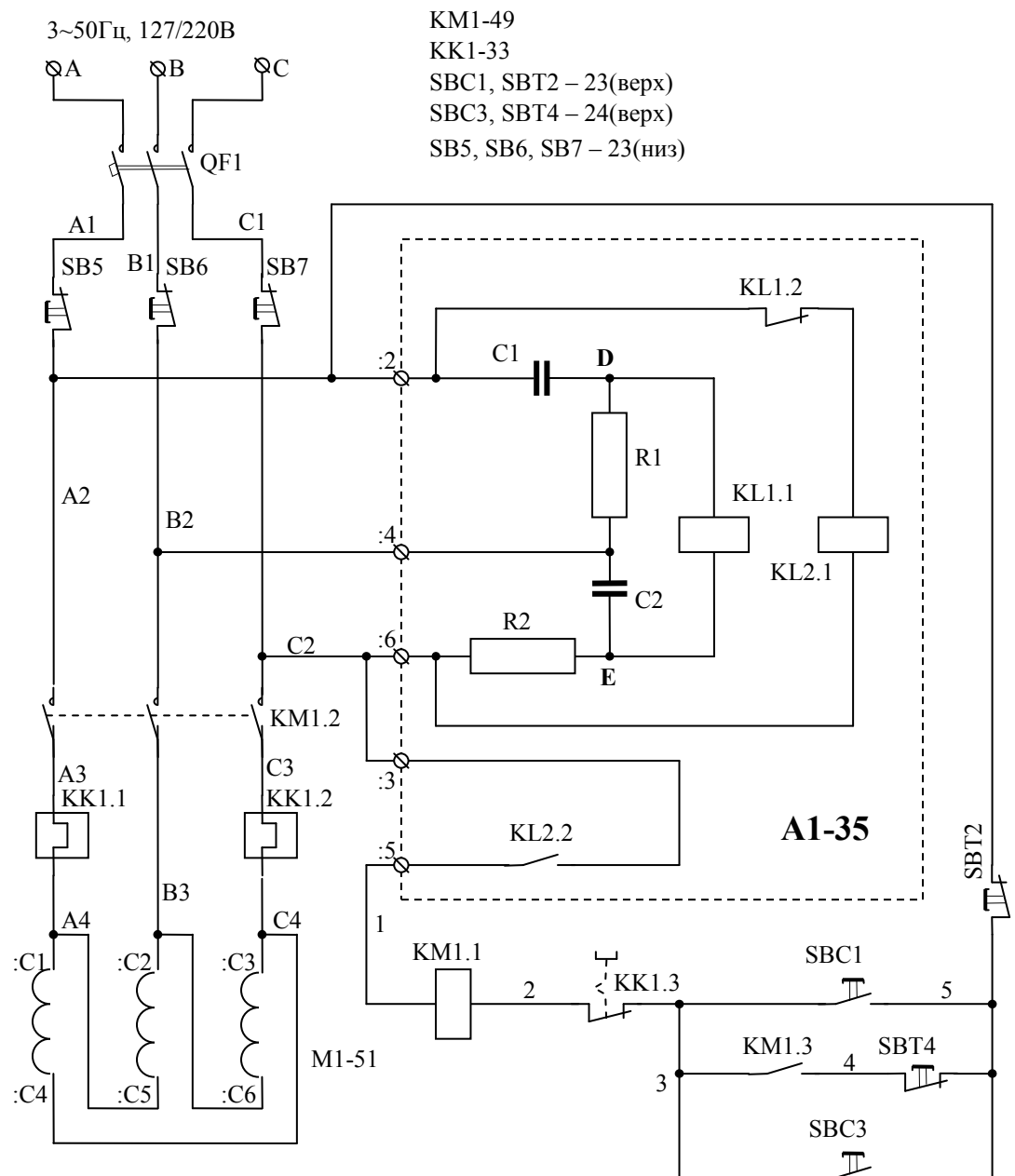
#### **Порядок выполнения задания**

**Знакомимся с основными техническими данными и расположением оборудования**

*Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии*

#### **Собираем схему экспериментальной установки**

*Соберём электрическую схему по плакату. Сидоров собирает узел А1; Козлов – узел А2 и так далее. Во время сборки перечертим схему в тетради.*



**Рис. 1: Схема включения электродвигателя с возможностью управления из двух мест.**

#### Осуществим испытание схемы

1. Сидоров – объясняет, что произойдёт в схеме при включении *QF1*. подаёт напряжение и убеждает всех присутствующих в истинности им провозглашённого.

2. Козлов – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки *SBC1*, а затем - кнопки *SBT2*; убеждает присутствующих в достоверности предсказания. То же самое проделывает с кнопками *SBC3* и *SBT4*.

3. Скворцов – демонстрирует возможности независимого управления из двух мест, включая электродвигатель в одном месте, а отключая в другом: нажимает сначала *SBC1*, а затем *SBT4*. Далее нажимает *SBC3*, а затем *SBT2*.

4. Сорокин – демонстрирует работу реле обрыва фазы: включает электродвигатель, а затем обрывает фазу **А**, нажав на кнопку *SBT5*. То же самое проделывает с фазами **В** и **С**. Меняет местами фазы **В** и **С**, убеждает аудиторию, что включения электродвигателя в

обратную сторону не происходит. Детально объясняет аудитории, что происходило в схеме при каждом из его действий.

5. Воронин – демонстрирует работу теплового реле: включает электродвигатель, доказывает присутствующим, что тепловое реле должно сработать, и терпеливо ожидает свершения этого предсказания.

**Контрольные вопросы:**

1. Устройство обозначение по ГОСТ и принцип действия кнопки, имеющей замыкающий и размыкающий контакты.
2. Устройство и принцип действия магнитного пускателя.
3. Устройство и принцип действия теплового реле.
4. Как устроено реле обрыва фазы E511?
5. Показать цепь тока катушки магнитного пускателя при нажатии на кнопку SBC3.
6. Как работает реле обрыва фазы E511?
7. Что произойдёт, если при подключении реле обрыва фазы перепутать клеммы :2 и :4?
8. Почему при отпускании кнопок SBT не происходит повторного включения электродвигателя?
9. Что произойдёт в схеме, если одновременно нажать кнопки SBC1 и SBT2?
10. Что произойдёт в схеме, если одновременно нажать кнопки SBC3 и SBT4?
11. Что произойдёт в схеме, если одновременно нажать кнопки SBC1 и SBT4?

**Подготовить ответы на вопросы, сдать на проверку преподавателю отчёт и ответить на один из вопросов по выбору преподавателя**

*Материальное обеспечение - универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 210 (источник питания 3-х фазного переменного тока 220/380В; реле обрыва фазы на панели №35; магнитный пускатель на панели №49; тепловое реле типа ТРН на панели №33; два двухкнопочных поста управления на панелях №23 и №24; один трёхкнопочный пост управления на панели №23; асинхронный электродвигатель на панели №51), плакат «Управление электродвигателем из двух мест с защитой от обрыва фазы».*

**2.11 Лабораторная работа №15, 16 ( 4 часа).**

**Тема: «Изучение схемы реверсивного управления асинхронным электродвигателем с защитой от заклинивания ротора»**

**2.11.1 Цель работы:** Изучить схему реверсивного управления электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия реле тока, научиться производить сборку схемы, убедиться в эффективности функционирования схемы.

**2.11.2 Задачи работы:**

Собрать схему управления электродвигателем и испытать её в лабораторных условиях.

**2.11.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

- 1.Мультимедиапроектор
2. Трёхфазный асинхронный двигатель
3. Магнитные пускатели
4. Реле времени
- 5.Амперметр
6. Вольтметр
7. Реле тока
8. Промежуточное реле

9. Резисторы
10. Кнопочная станция
11. Плавкий предохранитель.

#### 2.11.4 Описание (ход) работы:

##### Краткие теоретические положения

На практике часто используется схема реверсивного управления электродвигателями, осуществляющими через редуктор перемещение задвижек в системах нефте- водо- и газоснабжения производственных объектов. Запуск и остановка электродвигателя в прямом и обратном направлениях осуществляется по командам оператора, а отключение при достижении конечных положений задвижек автоматически с помощью конечных (путевых) выключателей.

Особенностью привода задвижек является то, что отключение электродвигателя при работе на закрытие задвижки должно происходить при полном её закрытии, исключая просачивание жидкости. Использовать для цели автоматизации отключения обычный путевой выключатель, реагирующий на положение задвижки, в данном случае нельзя, так как технически невозможно установить переключатель так, чтобы он размыкался точно в тот момент, когда задвижка плотно закрыта. Если выключатель сработает несколько раньше, задвижка будет приоткрыта, а если раньше задвижка сработает на упор, то выключатель вообще не отключит электродвигатель и он сгорит. Поэтому для отключения электродвигателя в момент плотного закрытия задвижки вместо конечного выключателя используют реле тока. Схема, реализующая данный принцип изображена на плакате и рисунке 1.

*Дополнительная литература - Лекция по теме: «Управление электроприводами».*

##### Порядок выполнения задания

Запишем технические данные оборудования

*Старший по работе заготавливает таблицу на доске и распределяет задания.*

##### Перечень элементов

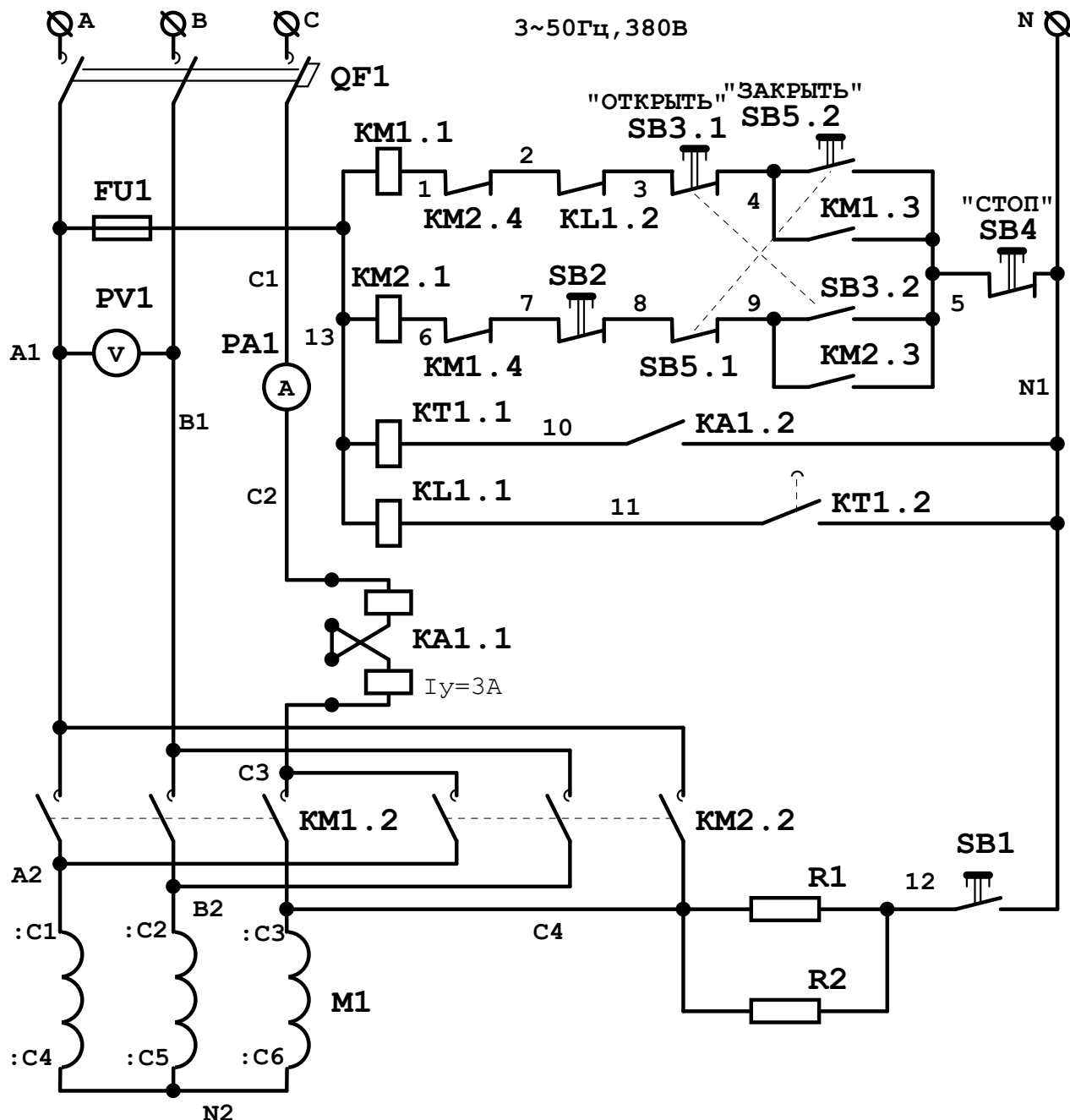
**Таблица 1**

Поз. обозн.	Наименование и основные технические характеристики	-во	Примечание
QF1	<b>Козлов</b>		Панель №0С
M1	<b>Сидоров</b>		Панель №55
KM1, KM2	<b>И т. д.</b>		Панель №44
KT1			Панель №32а
PA1			Панель №14а
PV1			Панель №16б
KA1			Панель №32б
KL1			Панель №30а
R1, R2			Панель №73
SB1 ...SB5			Панель №23

FU1			Панель №18
-----	--	--	---------------

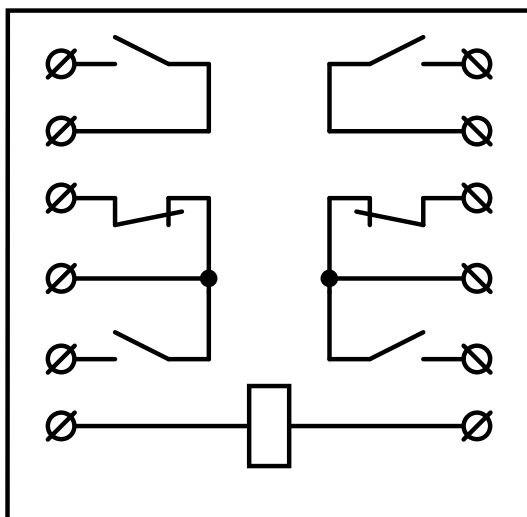
### Соберём электрическую схему

Сидоров – собирает узел 1; Козлов – узел 2 и так далее. Во время сборки осуществляется перечерчивание схемы с плаката в тетради.



**Рис. 1: Принципиальная схема реверсивного управления асинхронным электродвигателем с использованием реле тока.**

Расположение выводов элементов реле времени и реле тока приведено на табличках. Монтажная схема промежуточного реле изображена ниже.



**Рис.2: Монтажная схема промежуточного реле.**

Работает схема следующим образом. При включении автоматического выключателя QF1 напряжение сети подаётся на вход силовых контактов KM1.2 и KM2.2 магнитных пускателей KM1 и KM2, а также через предохранитель FU1 на схему управления. Так как силовые контакты и контакты в цепи управления разомкнуты, ток ни в одной из цепей не протекает.

Допустим, что задвижка в начальный момент находится в промежуточном положении. Если по ходу протекания технологического процесса возникла необходимость увеличить пропускную способность задвижки, нажимается кнопка SB3 «открыть». При этом размыкаются контакты SB3.1 кнопки, отключая или предотвращая включение магнитного пускателя KM1, срабатывающего на закрытие задвижки, и замыкаются контакты SB3.2. Получает питание катушка KM2.1 магнитного пускателя KM2 по цепи: фаза А – FU1 – KM2.1 – KM1.4 – размыкающий контакт кнопки SB2, имитирующей конечный выключатель, срабатывающий при полном открытии задвижки, - SB5.1 – SB3.2 – размыкающий контакт кнопки SB4 – нейтральный провод сети. Срабатывает магнитный пускатель KM2, и своими силовыми контактами KM2.2 включает электродвигатель привода задвижки на открывание. Одновременно контакт KM2.3 пускателя блокирует контакт SB3.2 кнопки SB3, исключая отключение электродвигателя при отпускании кнопки, а контакт KM2.4 разомкнётся, предотвращая случайное включение пускателя KM1.

Отключение электродвигателя может произойти в трёх случаях: а) Если оператор сочтёт, что задвижка открыта достаточно, и нажмёт кнопку SB4. б) Если задвижка открылась полностью и разомкнётся контакт SB2. в) Если оператор решил, что задвижка открылась излишне, и нажмёт кнопку SB5. В этом случае разомкнутся контакты SB5.1 кнопки, прервётся цепь питания катушки KM2.1, электродвигатель М1 отключится, открывание задвижки прекратится. Одновременно с этим замкнутся контакты SB5.2. Катушка KM1.1 магнитного пускателя KM1 получит питание по цепи: фаза А сети – FU1 – KM1.1 – KM2.4 - KL1.2 – SB3.1 – SB5.2 - контакт кнопки SB4 – нейтраль сети. Магнитный пускатель KM1 сработает и своими силовыми контактами включит электродвигатель на закрытие задвижки. Одновременно заблокирует контакты SB5.2 кнопки контактами KM1.3 и разомкнёт контакты KM1.4 в цепи катушки KM2.1.

Примечание. При каждом включении электродвигателя под действием пускового тока срабатывает реле тока КА1, замыкая контакт КА1.2 в цепи питания катушки КТ1.1 реле времени КТ1. Реле времени начинает отсчитывать время задержки срабатывания контакта с выдержкой времени при замыкании КТ1.2, которое установлено несколько больше, чем время пуска электродвигателя. Поэтому к концу пуска реле тока размыкает свой контакт КА1.2, обесточивает катушку КТ1.1 реле времени и замыкания контакта КТ1.2 не происходит.



Отключение электродвигателя с вращения на закрытие может произойти также в трёх случаях: а) Если оператор сочтёт, что задвижка прикрыта достаточно, и нажмёт кнопку SB4. б) Если оператор сочтёт, что задвижка прикрыта излишне, и нажмёт кнопку SB3. в) Если задвижка закрылась полностью (на упор). Тогда повысится ток электродвигателя до пускового. Сработает реле тока КА1. Замкнёт свой контакт КА1.2 в цепи питания катушки КТ1.1 реле времени КТ1. По истечении некоторого времени замкнётся контакт КТ1.2 с выдержкой времени на замыкание и включит катушку КЛ1.1 промежуточного реле КЛ1. Промежуточное реле, разомкнув свой размыкающий контакт КЛ1.2 в цепи питания катушки КМ1.1, отключит электродвигатель. При этом реле тока разомкнёт свой контакт, и последовательно отключатся катушки реле времени и промежуточного реле. Контакт КЛ1.2 замкнётся, но включение электродвигателя не произойдёт, так как успели разомкнуться контакты КМ1.3.

Предохранитель FU1 в цепи управления установлен для повышения чувствительности защиты от тока короткого замыкания в цепи управления, так как автоматический выключатель QF1, настроен на значительно больший ток короткого замыкания, который может возникнуть в силовой цепи. Рассмотренная схема может также использоваться для защиты электродвигателя от перегрузки и заклинивания ротора. Для этого ток срабатывания реле тока необходимо установить несколько больше рабочего тока электродвигателя

#### **Осуществляем испытание схемы**

1. Куропаткин объясняет, что произойдёт в схеме при включении QF1, подаёт напряжение и убеждает всех присутствующих в истинности им провозглашённого.

2. Иванов – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB3. Убеждает присутствующих в достоверности сказанного. Обращает внимание на кратковременность срабатывания реле тока и реле времени.

3. Сидоров – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB4; убеждает присутствующих в достоверности сказанного. Снова запускает электродвигатель на открытие и объясняет, что произойдёт в схеме при нажатии кнопки SB2, имитирующей конечный выключатель, срабатывающий при полном открытии задвижки. Демонстрирует предсказанное.

3. Козлов – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB5; убеждает присутствующих в достоверности сказанного. Снимает и записывает показания приборов в таблицу на доске.

4. Сорокин – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB4; убеждает присутствующих в достоверности сказанного.

5. Воронин – снова запускает электродвигатель на закрытие задвижки. Объясняет что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB1, имитирующей повышение тока при заклинивании электродвигателя. Убеждает присутствующих в достоверности сказанного.

6. Ведущий комментирует результаты измерений и расчётов и даёт команду на разборку схемы.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Почему нельзя для фиксации задвижки в закрытом состоянии использовать конечный выключатель?

2. Как устроено и работает реле тока?

3. Как устроено и работает реле времени часового типа?

4. Как по показаниям приборов, установленных в схеме, подсчитать полную мощность на зажимах электродвигателя?

5. Показать цепь тока катушки магнитного пускателя при нажатии на кнопку SB3.

6. Как происходит отключение электродвигателя при полном закрытии задвижки?

7. Как происходит отключение электродвигателя при полном открытии задвижки?

8. Какими путями может произойти отключение электродвигателя, работающего на открытие задвижки?

9. Какими путями может произойти отключение электродвигателя, работающего на закрытие задвижки?

10. Можно ли для предотвращения включения обоих пускателей одновременно использовать только размыкающие контакты кнопок?

11. В чём суть двойной электрической блокировки для предотвращения одновременного включения пускателей?

**Подготовить ответы на вопросы, сдать на проверку преподавателю отчёт и ответить на один из вопросов по выбору преподавателя**

*Материальное обеспечение - универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 210 (источник питания 3-х фазного переменного тока 220/380В; реле времени на панели №32а; реверсивный магнитный пускатель на панели №44; трёхкнопочный пост управления на панели №23б; двухкнопочный пост управления на панели №23а; асинхронный электродвигатель на панели №55; плакат; амперметр на панели №14а; вольтметр переменного тока на панели №16б; реле тока на панели №32б; реле промежуточное на панели №30а; предохранитель на панели №18.*

## **2.12 Лабораторная работа №17 ( 2 часа).**

**Тема: «Схема реверсивного управления асинхронным двигателем с торможением противовключением»**

**2.12.1 Цель работы:** Изучить схему реверсивного управления 3-х фазным асинхронным электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия реле контроля скорости, научиться производить сборку схемы, убедиться в эффективности функционирования схемы.

### **2.12.2 Задачи работы:**

Собрать схему управления электродвигателем и испытать её в лабораторных условиях.

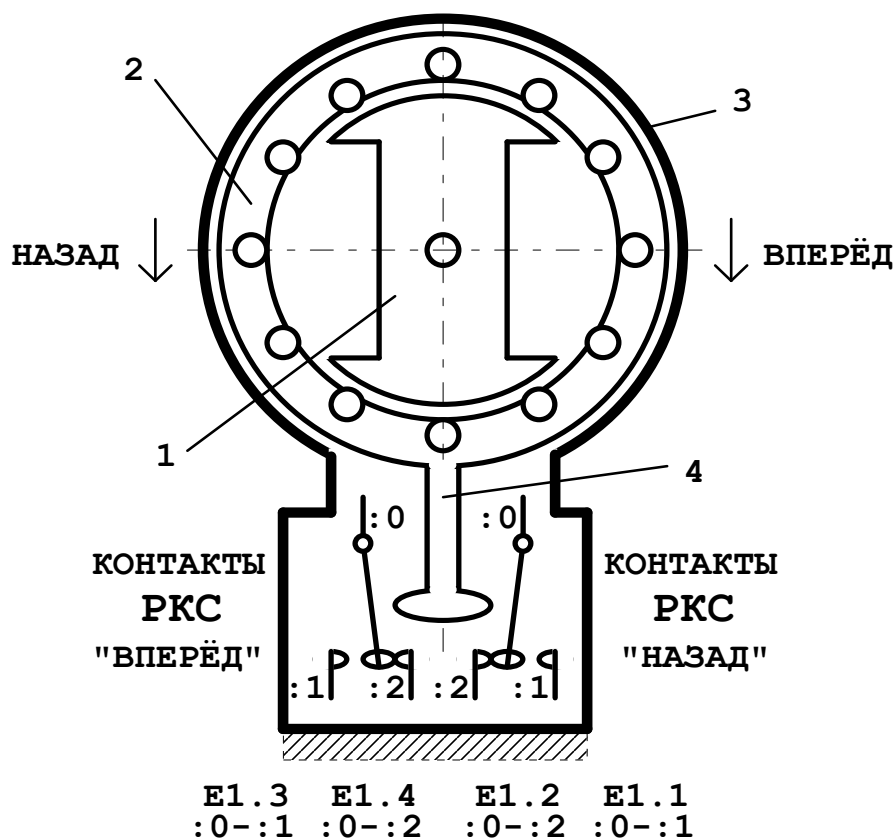
### **2.12.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Мультимедиапроектор
2. Трёхфазный асинхронный электродвигатель
3. Асинхронный двигатель АБ-80-4
4. Реле контроля скорости
5. Кнопочная станция
6. Магнитные пускатели
7. Автоматический выключатель

### **2.12.4 Описание (ход) работы:**

#### **Краткие теоретические положения**

На практике часто применяется способ быстрой остановки электродвигателя путем переключения электродвигателя на ходу на обратное вращение. После переключения электродвигателя магнитное поле начинает вращаться в обратном направлении, а ротор продолжает по инерции вращаться, быстро снижая частоту вращения до нуля. В этот момент напряжение с клемм электродвигателя нужно снять, иначе электродвигатель начнет вращение в обратном направлении. Вручную этот момент зафиксировать не удается, поэтому применяют специальное реле контроля скорости (РКС).



**Рис.1: Схема устройства реле контроля скорости.**

Реле состоит из постоянного магнита 1, вращающегося вокруг оси и соединенного с валом электродвигателя. Постоянный магнит помещен в цилиндр 2, представляющий собой устройство в виде беличьей клетки. Цилиндр укреплен на подшипниках в корпусе 3 и может поворачиваться на определенный угол до упора, при этом рычагом 4 переключаются контакты.

Если ротор электродвигателя вращается вперед вместе с ним вращается и электромагнит 1, который своим магнитным полем увлекает за собой цилиндр 2 и он поворачивается в сторону вращения, переключая контакты E1.3 и E1.4. При вращении ротора в обратном направлении переключаются контакты E1.1 и E1.2.

Схема управления электродвигателем с применением РКС приведена на плакате и рис. 2.

Работает схема следующим образом. При подаче напряжения на схему с помощью автоматического выключателя QFI ток в цепи не протекает, так как разомкнуты контакты KM1.3 и KM2.3, E1.1 и E1.3, SB1 и SB2. Нажимаем кнопку SB1. Начинает протекать ток по цепи: фаза С, катушка KM1.1, контакты KM2.4, E1.2, SB1, SB3, фаза А. Срабатывает магнитный пускатель KM1, включает электродвигатель M1 на вращение «вперед», блокирует кнопку SB1 и размыкает цепь питания катушки KM2.1, чем предотвращается одновременное включение магнитных пускателей. Как только электродвигатель начал вращаться вперед, контакты РКС E1.4 размыкаются, а E1.3 замыкаются.

Нажимаем кнопку SB3. Отключается магнитный пускатель KM1. Как только его контакт KM1.4 замыкается, получает питание катушка KM2.1 по цепи: фаза С-KM2.1-KM1.4-E1.3-фаза А. Магнитный пускатель KM2 срабатывает, включает электродвигатель на обратное вращение, что приводит к резкому торможению ротора. Когда частота вращения станет равной нулю, контакты РКС E1.3 разомкнутся, пускатель KM2 отключится, отключив электродвигатель. Через мгновение замкнутся контакты E1.4, но ток через катушку KM2.1 уже не пойдет, так как успели разомкнуться контакты KM2.3.

Аналогично работает схема и при нажатии кнопки SB2 «назад».

### Дополнительная литература

- Шичков Л. П. Электрический привод. – М.: КолосС, 2006. с. 35...37, 103...122.
- Лекция по теме тормозные режимы асинхронных электродвигателей.

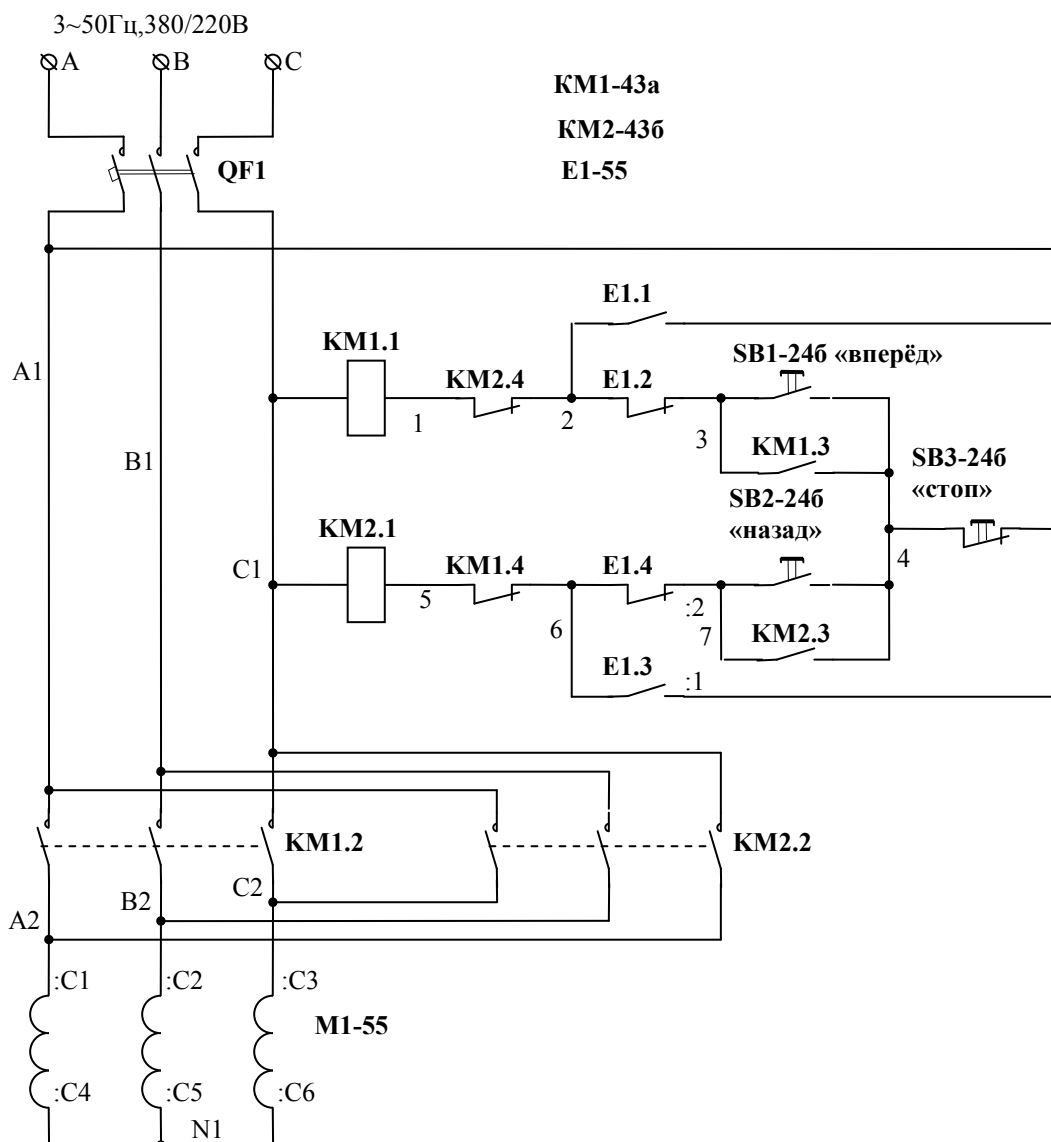
### Порядок выполнения задания

**Знакомимся с основными техническими данными и расположением оборудования**

*Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии*

### Собираем электрическую схему:

Сидоров – собирает узел 1; Козлов – узел 2 и так далее. Во время сборки схема перечерчивается в тетради.



**Рис. 2: Схема управления электродвигателем.**

### Осуществляем испытание схемы

1. Сидоров – объясняет, что произойдёт в схеме при включении QF1. подаёт напряжение и убеждает всех присутствующих в истинности им провозглашённого.

2. Козлов – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB1 и показывает работу схемы при данном воздействии.

3. Скворцов – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB2, демонстрирует сказанное.

4. Сорокин – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB3, демонстрирует сказанное

5. Воронин – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB2, демонстрирует сказанное.

7. Эйлер - демонстрирует работу схемы после нажатия кнопки SB3, предварительно объяснив ожидаемую реакцию схемы.

**Контрольные вопросы:**

1. Устройство реле контроля скорости
2. Устройство и принцип действия магнитного пускателя.
3. Принцип действия реле контроля скорости.
4. Что произойдёт, если перепутать контакты РКС «вперёд» с контактами РКС «назад»?
5. Что произойдёт, если поменять местами размыкающие контакты первого и второго пускателя?
6. Суть метода торможения противовключением.
7. Для чего предназначены контакты KM1.4 и KM2.4?
8. Электродвигатель работает «назад». Что произойдёт в схеме и в какой последовательности после нажатия кнопки SB3?
9. Перечислите все аппараты, которые входят в схему торможения электродвигателя методом противовключения.
10. Что происходит в схеме после включения QF1?
11. Что произойдёт в схеме если поменять местами KM1.4 и KM2.4?

**Подготовить ответы на вопросы, сдать на проверку преподавателю отчёт и ответить на один из вопросов по выбору преподавателя**

*Материальное обеспечение - универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 210 (источник питания 3-х фазного переменного тока 220/380В; реле контроля скорости на панели №55; магнитный пускатель на панели №43; асинхронный электродвигатель на панели №55; трёхкнопочный пост управления на панели №24б),*

### **2.13 Лабораторная работа №18, 19 ( 4 часа).**

**Тема: «Изучение схемы динамического торможения асинхронного электродвигателя»**

**2.13.1 Цель работы:** Изучить схему управления электродвигателем с возможностью динамического торможения, устройство и принцип действия реле времени, научиться производить сборку схемы, убедиться в эффективности функционирования схемы.

#### **2.13.2 Задачи работы:**

Собрать схему управления электродвигателем и испытать её в лабораторных условиях.

#### **2.13.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Мультимедиапроектор асинхронный электродвигатель Тип АЦ 12
2. Патенциометр
3. Асинхронный электродвигатель Тип MF 112-6У1
4. Промежуточное реле
5. Резисторы

6. Диоды Д245
7. Автотрансформатор
8. Автоматический выключатель АП-50 -127
9. Автоматический выключатель АП-50 - ~380В,

#### **2.13.4 Описание (ход) работы:**

##### **Краткие теоретические положения**

Динамическое торможение трёх- или однофазного асинхронного электродвигателя осуществляется путём подачи на обмотки электродвигателя на период торможения постоянного по величине напряжения. В результате вместо вращающегося магнитного поля в статоре образуется магнитное поле постоянное и по величине, и по направлению. Так как магнитное поле всегда стремится увлечь за собой ротор, он начинает быстро останавливаться или противодействовать вращению в случае, если рабочая машина имеет активный момент сопротивления (например, при движении транспортного средства под уклон, при спуске груза и в других подобных случаях). Ниже (*и на плакате*) приведена схема автоматического управления процессом динамического торможения, используемая для быстрой остановки электродвигателей деревообрабатывающих станков, центрифуг стиральных машин и в других случаях.

Она состоит из автоматического выключателя QF1, реверсивного магнитного пускателя KM1-KM2, реле времени KT1, промежуточных реле KL1 и KL2, ограничительного резистора R1, диодного моста VD1...VD4 и двухкнопочного поста управления SB1-SB2. Для контроля напряжения в электрической сети используется вольтметр PV1, а для контроля величины постоянного тока при торможении амперметр PA1.

Работает схема следующим образом. При замыкании контактов автоматического выключателя QF1 напряжение сети подаётся на входы силовых контактов магнитных пускателей KM1 и KM2 и схему управления. Ток ни по одной из цепей не протекает, так как разомкнуты силовые контакты и контакты в цепях управления: SB1, KM1.4, KL1.2, KL1.1, KM1.2, KT1.2.

Нажимаем кнопку SB1. Получает питание катушка KM1.1 магнитного пускателя KM1. Пускатель KM1 срабатывает, и своими силовыми контактами подаёт напряжение на обмотки электродвигателя. Одновременно размыкает контакты KM1.3, предотвращая случайное включение магнитного пускателя KM2, контактами KM1.4 блокирует кнопку «пуск», а контактами KM1.5 подаёт напряжение на обмотку KL1.1 промежуточного реле KL1. Реле срабатывает и замыкает контакты KL1.2 и KL1.3. Первые из них подготавливают цепь для включения катушек KM2.1 и KT1.1, а вторые блокируют контакты KM1.5.

При нажатии на кнопку SB2 размыкаются её контакты и обесточивается катушка KM1.1 магнитного пускателя KM1. Размыкаются силовые контакты пускателя, отключая электродвигатель M1 от сети переменного тока, размыкаются блокировочные контакты KM1.4, предотвращающие повторное включение пускателя KM1 при отпускании кнопки «стоп», и замыкаются контакты KM1.3. Катушки KM2.1 и KT1.1 получают питание, так как контакт KL1.2 замкнут.

Срабатывает магнитный пускатель KM2 и своими силовыми контактами подключает источник постоянного тока (диоды VD1...VD4 и резистор R1) к сети переменного тока и к нагрузке. В положительный полупериод сетевого напряжения ток будет протекать по цепи: фаза С – резистор R1 – VD1 – :C2-:C5 - :C6 - :C3 – PA1 - VD4 нейтральный провод сети. В отрицательный полупериод - по цепи: нейтральный провод сети – VD3 – :C2-:C5 - :C6 - :C3 – VD2 – резистор R1 – фаза С сети. Как видим через вторую и третью обмотки течёт ток одного и того же направления при любой полярности напряжения в сети. Его величина может устанавливаться изменением величины сопротивления резистора R1. Идёт процесс торможения электродвигателя.

Одновременно реле КТ1 отсчитывает время уставки, которое принято несколько больше времени остановки электродвигателя. После остановки электродвигателя и последующего замыкания контакта КТ1.2 с выдержкой времени при замыкании, получает питание катушка КЛ2.1, срабатывает промежуточное реле КЛ2 и обесточивает контактами КЛ2.2 катушку КЛ1.1 промежуточного реле КЛ1. Последнее в свою очередь, размыкая контакты КЛ1.2, обесточивает катушки КМ2.1 и КТ1.1. Магнитный пускатель снимает постоянное напряжение с обмоток электродвигателя, а реле времени размыкает контакт КТ1.2, обесточивая катушку КЛ2.1 реле промежуточного КЛ2. Реле КЛ2 замыкает свой контакт КЛ2.2 в цепи обмотки КЛ1.1, но срабатывание реле КЛ1 не происходит, так как разомкнулись контакты КЛ1.3. Таким образом, схема пришла в исходное состояние, в котором тока ни в одной из цепей нет.

*Дополнительная литература - Лекция по теме: «Механические характеристики и регулирование частоты вращения асинхронного электродвигателя».*

**Порядок выполнения задания**

**Записываем технические данные оборудования**

**Перечень элементов**

**Таблица 1**

Поз. обозн.	Наименование и основные технические характеристики	-во	Примечание
QF1	<b>Козлов</b>		Панель №0С
M1	<b>Сидоров</b>		Панель №55
KM1, KM2	<b>И т. д.</b>		Панель №44
KT1			Панель №32а
PA1			Панель №14а
PV1			Панель №16б
SB1, SB2			Панель №23а
VD1 ...VD4			Панель №28
KL1			Панель №30а
KL2			Панель №30б
R1			Панель №73

**Собираем электрическую схему:**

*Сидоров – собирает узел 1; Козлов – узел 2 и так далее. Во время сборки схема перечерчивается в тетради.*





2. Начертить механическую характеристику асинхронного электродвигателя в режиме динамического торможения.
3. Показать путь тока при положительной и отрицательной полуволнах напряжения в электрической сети при динамическом торможении.
4. Как изменится вид механической характеристики, если уменьшить величину сопротивления резистора R1?
5. Как поведёт себя схема, если не замкнутся при срабатывании реле контакты KL1.1?
6. Что произойдёт в схеме в случае одновременного срабатывания обоих магнитных пускателей?
7. Как устроено электромеханическое реле времени и какова схема реле, использованного в работе?
8. Как можно регулировать интенсивность торможения?
9. Можно ли по показаниям приборов PV1 и PA1 определить кажущуюся мощность, потребляемую электродвигателем из сети? Если нет, то что для этого нужно сделать?
10. Какие упрощения в схеме можно было бы произвести, если в наличии было бы реле времени, обладающее размыкающим контактом с выдержкой времени при размыкании?
11. Будет ли осуществляться торможение электродвигателя при изменении направления его вращения (например, при смене фаз С и В на вводе)?

**Подготовить ответы на вопросы, сдать на проверку преподавателю отчёт и ответить на один из вопросов по выбору преподавателя**

*Материальное обеспечение - универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 210 (источник питания 3-х фазного переменного тока 220/380В; реле времени на панели №32а; реверсивный магнитный пускатель на панели №44; трёхкнопочный пост управления на панели №23а; асинхронный электродвигатель на панели №55; амперметр на панели №14а; вольтметр переменного тока на панели №16б; диоды на панели №28; резистор на панели №73; Реле промежуточные на панели № 30а и 30б; плакат:*

## **2.14 Лабораторная работа №20, 21 ( 4 часа).**

**Тема: «Изучение схемы управления однофазным асинхронным двигателем»**

**2.14.1 Цель работы:** Изучить схему реверсивного управления однофазным асинхронным электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия реле тока и реле времени моторного типа.

### **2.14.2 Задачи работы:**

Собрать схему управления однофазным электродвигателем с помощью реле тока и схему управления электродвигателем с помощью реле времени. Испытать их в лабораторных условиях.

### **2.14.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Мультимедиапроектор
2. Автоматический выключатель АП-50 - ~380В
3. Кнопочная станция
4. Магнитные пускатели
5. Плавкий предохранитель
6. Реле тока
7. Конденсаторы 1-32 мкФ

8. Промежуточное реле
9. Амперметр.

#### 2.14.4 Описание (ход) работы:

##### Краткие теоретические положения

Однофазный асинхронный электродвигатель не развивает пускового момента. В связи с этим его снабжают специальной пусковой обмоткой, смещённой по окружности статора на  $90^\circ$  по отношению к рабочей обмотке. Если через пусковую обмотку пропустить ток, также сдвинутый по фазе на  $90^\circ$  по отношению к току в рабочей обмотке, в статоре образуется вращающееся магнитное поле и возникнет вследствие этого пусковой момент,

*Дополнительная литература - Лекция по теме: «Управление электроприводами».*

##### Порядок выполнения задания

**Записываем технические данные оборудования**

*Заготовить таблицу на доске и в тетрадях, распределить задания и записать основные технические характеристики используемого оборудования.*

##### **Перечень элементов**

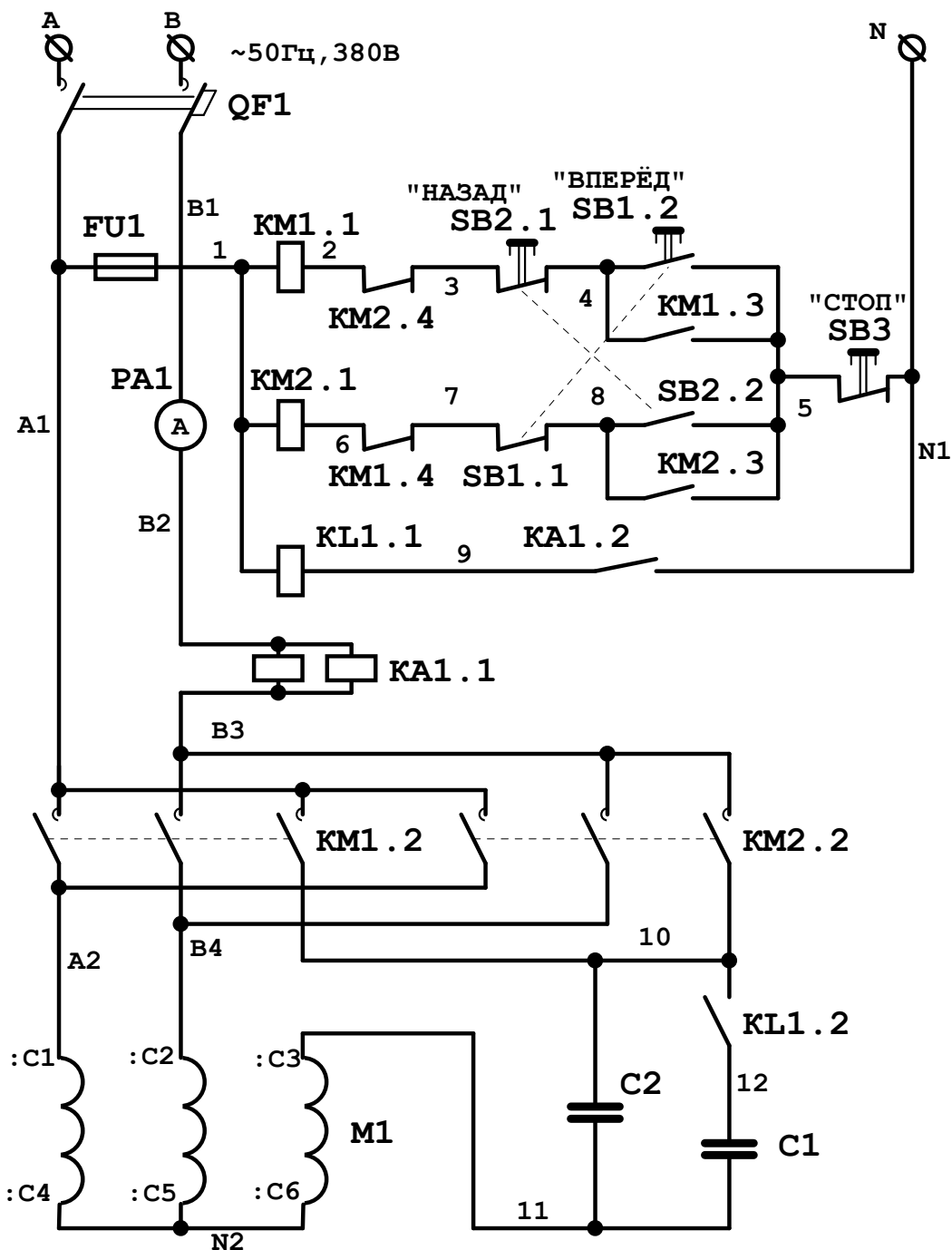
**Таблица 1**

Поз. обозн.	Наименование и основные технические характеристики	-во	Примечание
QF1	<b>Козлов</b>		Панель №0С
M1	<b>Сидоров</b>		Панель №55
KM1, KM2	<b>И т. д.</b>		Панель №44
KA1	I <sub>уст</sub> =3А		Панель №34
PA1			Панель №14а
KL1			Панель №30а
R1, R2			Панель №73
SB1 ...SB3			Панель №24б
FU1			Панель №
KT1			Панель №

##### **Описываем и собираем схему экспериментальной установки №1**

При замыкании автоматического выключателя QF1 напряжение прикладывается к силовым контактам магнитных пускателей KM1 и KM2, а также к разомкнутым контактам SB1.2, SB2.2, KA1.2, KM1.3 и KM2.3 в цепи управления. Ток ни в одной из цепей не протекает, так как контакты разомкнуты. При нажатии на кнопку SB1 размыкается её контакт SB1.1, разрывая цепь питания катушки KM2.1, и замыкается контакт SB1.2. При этом получает питание катушка KM1.1 магнитного пускателя KM1 по цепи: фаза А – предохранитель FU1 – катушка KM1.1 – размыкающие блокировочные контакты KM2.4 магнитного пускателя KM2 – размыкающий контакт SB2.1 кнопки SB2 – контакт SB1.2 – размыкающий контакт кнопки SB3 – нулевой провод. Магнитный пускатель KM1 срабатывает, замыкает силовые контакты KM1.2 включая обмотки электродвигателя на

вращение «вперёд». Контактами KM1.3 шунтирует контакт SB1.2, а контактом KM1.4 разрывает цепь питания катушки KM2.1, предотвращая случайное включение магнитного пускателя KM2.



**Рис.1: Принципиальная схема реверсивного управления однофазным асинхронным электродвигателем с использованием реле тока.**

Мгновением позже под действием пускового тока электродвигателя срабатывает реле тока KA1 и замыкает свой контакт KA1.2 в цепи питания катушки KL1.1 промежуточного реле KL1. Сработав, промежуточное реле контактом KL1.2 к рабочей ёмкости C2 подключает пусковую ёмкость C1. Электродвигатель M1 начнёт развивать обороты. Пусковой ток при этом будет уменьшаться и, когда к концу разгона он станет меньше тока удержания реле KA1, контакт реле разомкнётся, обесточив катушку KL1.1 промежуточного реле KL1. В свою очередь промежуточное реле контактом KL1.2 отключит пусковую ёмкость C1. Электродвигатель будет продолжать работать до тех пор, пока не будет нажата кнопка SB3. При этом обесточится катушка магнитного пускателя

КМ1, разомкнутся его силовые контакты, отключив электродвигатель, и придут в исходное состояние блокировочные контакты.

*Собрать электрическую схему по плакату. Сидоров собирает узел А1; Козлов – узел А2 и так далее. Во время сборки перечертить схему с плаката в тетради.*

#### **Осуществляем испытание схемы**

1. Сидоров объясняет, что произойдёт в схеме при включении QF1, подаёт напряжение и убеждает всех присутствующих в истинности им провозглашённого.

2. Козлов объясняет, что произойдёт при нажатии на кнопку SB1. Демонстрирует описанные действия.

3. Денмухаметов объясняет и демонстрирует действие установки при нажатии на кнопку SB3.

4. Котов объясняет, что произойдёт при нажатии на кнопку SB2. Демонстрирует описанные действия.

#### **Описываем и собираем схему экспериментальной установки №2**

В схеме вместо реле тока использовано реле времени моторного типа. При подаче напряжения ток ни в одной из параллельных цепей схемы не протекает, так как разомкнуты силовые контакты магнитных пускателей КМ1 и КМ2, а также контакты в цепях управления SB1.2, КМ1.2, SB2.2, КМ2.3, КТ1.4, КМ1.5, КМ2.5, КЛ1.2. При нажатии на кнопку SB1, размыкаются её контакты SB1.1, предотвращая случайное включение катушки КМ2.1, и замыкаются контакты SB1.2. Магнитный пускатель срабатывает, подключая обмотки электродвигателя к электрической сети. Одновременно контактами КМ1.5 он подаёт питание на катушку КТ1.1 электромагнита моторного реле времени. Сердечник электромагнита втягивается и за счёт механических связей соединяет кулачок переключения контактов с валом электродвигателя КТ1.2 реле времени КТ1 и без выдержки времени замыкает контакт КТ1.4. Срабатывает промежуточное реле КЛ1 и своими контактами КЛ1.3 подключает пусковую ёмкость С2. Электродвигатель начнёт разгоняться. Одновременно контактами КЛ1.2 промежуточное реле запускает электродвигатель КТ1.2. Кулачок переключения контактов начнёт поворачиваться и через время, установленное равным или несколько большим времени запуска электродвигателя, размыкает размыкающий с выдержкой времени при размыкании контакт КТ1.3. Катушка реле теряет питание, отключается пусковая ёмкость и электродвигатель КТ1.2. Контакты КТ1.3 остаются разомкнутыми до тех пор, пока не потеряет питание катушка КТ1.1, что произойдёт при отключении электродвигателя кнопкой SB3 и размыкании вследствие этого контакта КМ1.5.

*Собрать электрическую схему по плакату. Сидоров собирает узел А1; Козлов – узел А2 и так далее. Во время сборки перечертить схему с плаката в тетради.*

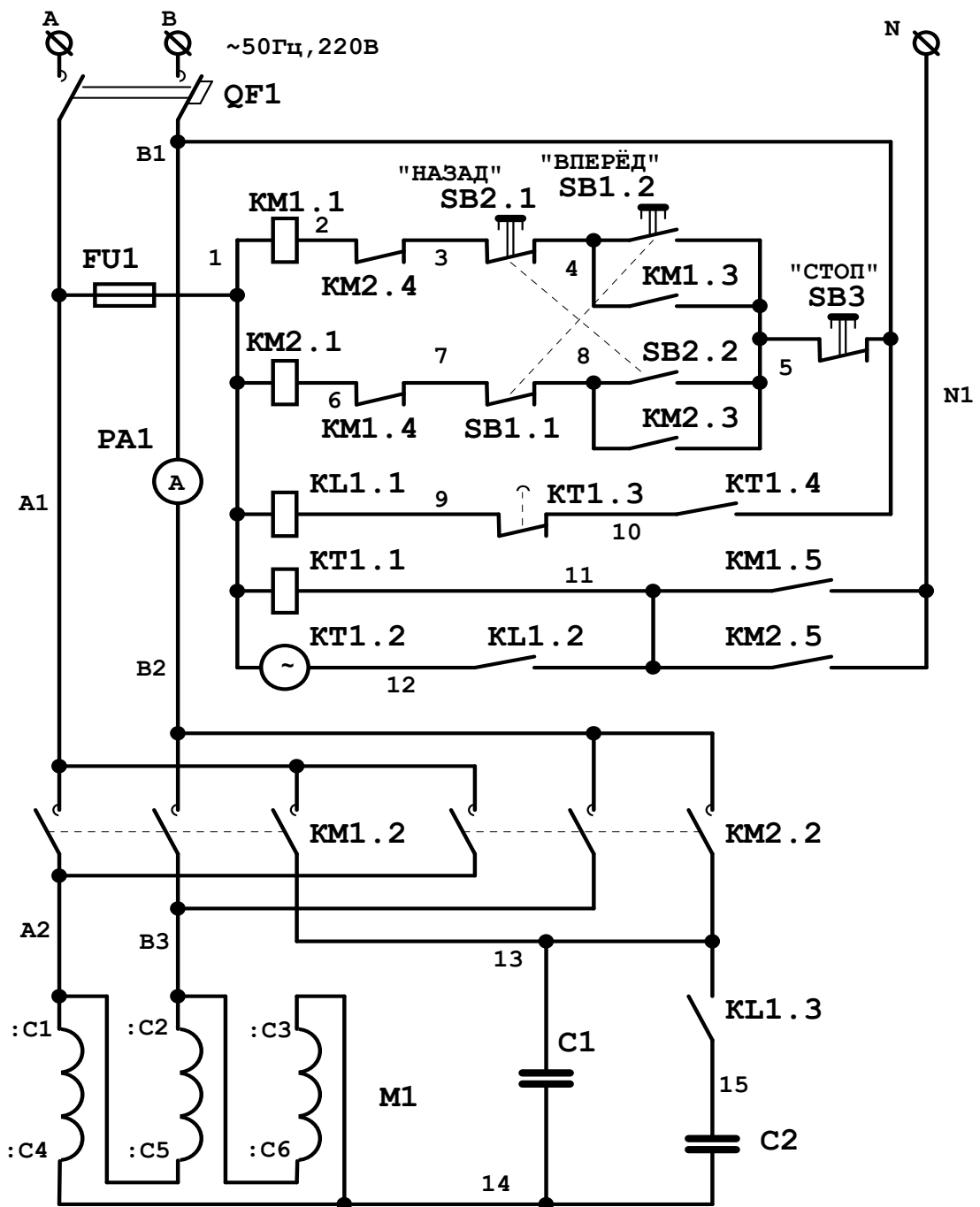


Рис.2: Принципиальная схема управления однофазным асинхронным электродвигателем с использованием реле времени

#### Осуществляем испытание схемы

1. Сидоров объясняет, что произойдёт в схеме при включении QF1, подаёт напряжение и убеждает всех присутствующих в истинности им провозглашённого.

2. Козлов объясняет, что произойдёт при нажатии на кнопку SB1. Демонстрирует описанные действия.

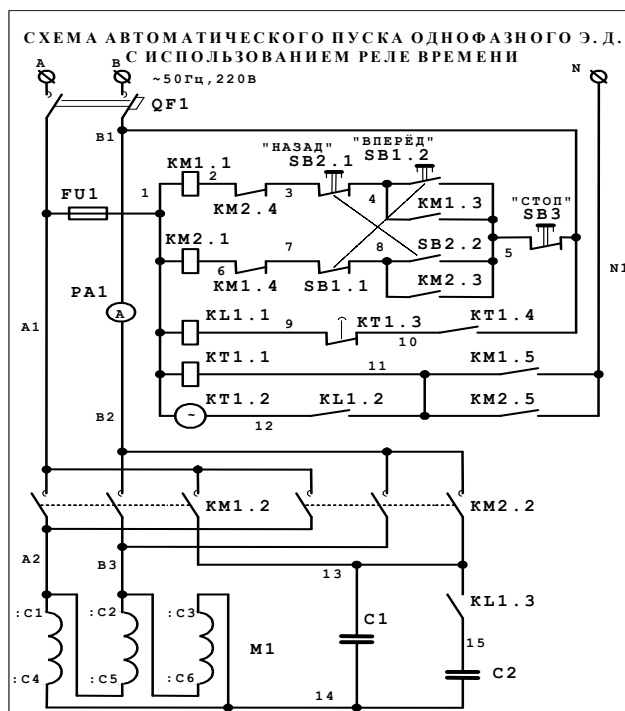
3. Деньмухаметов объясняет и демонстрирует действие установки при нажатии на кнопку SB3.

4. Котов объясняет, что произойдёт при нажатии на кнопку SB2. Демонстрирует описанные действия.

#### Контрольные вопросы:

1. Устройство и принцип действия реле тока.
2. Устройство однофазного асинхронного электродвигателя.
3. Каков принцип преобразования трёхфазного электродвигателя в однофазный.





## 2.15 Лабораторная работа №22, 23 ( 4 часа).

**Тема: «Изучение схемы частотного регулирования асинхронным двигателем»**

**2.15.1 Цель работы:** Изучить схему частотного регулирования электродвигателя через частотный преобразователь, устройство и принцип действия частотного преобразователя, а также изменения частоты на ЭД.

### 2.15.2 Задачи работы:

Изучить устройство частотно-регулируемого электропривода.

### 2.15.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Мультимедиапроектор
2. Автоматический выключатель АП-50 - ~220В
3. Автоматический магнитный пускатель ПА- 3
4. Вольтметр 250В
5. Амперметр 75А
6. Асинхронный электродвигатель с 3Ф кор. зам. Тип А031-4
7. Кнопочная станция
8. Конденсаторы 1-32мкФ
9. Частотный регулятор.

### 2.15.4 Описание (ход) работы:

#### Краткие теоретические положения

Преобразователь частоты, работающий на статорную обмотку асинхронного двигателя, показан на рис. 4.1. Он включает в себя автономный инвертор напряжения (АИН) с системой управления инвертора (СУИ) и управляемый выпрямитель (УВ). На выходе выпрямителя предусмотрен LC-фильтр, предназначенный для сглаживания выпрямленного напряжения  $U_d$ . В тормозном резисторе  $R_T$ , который включается тормозным прерывателем  $K_x$  при переходе двигателя в тормозной режим, рассеивается энергия торможения. В промышленных установках управляемый выпрямитель питается от сети переменного тока промышленной частоты 50 Гц. Управляющим воздействием для

него является сигнал задания напряжения на входе системы управления выпрямителем (СУВ).

Наиболее распространенной схемой силовой части инвертора является трехфазная мостовая схема (см. рис. 4.1), состоящая из шести управляемых ключей, обозначенных на рисунке цифрами 1... 6. Эти ключи должны обладать двухсторонней проводимостью. В настоящее время они обычно выполняются на транзисторах, обеспечивающих протекание тока в прямом направлении от плюса напряжения  $U_d$  к минусу. Обратная проводимость обеспечивается включенными параллельно транзисторам диодами обратного тока. С их помощью создается цепь для протекания обратного тока в процессе коммутации транзисторов и в тормозном режиме двигателя.

Управление частотой  $\omega_{0эл}$  на выходе преобразователя осуществляется путем воздействия на систему управления инвертора, в которой сигнал задания частоты преобразуется в длительность сигналов управления, подаваемых на транзисторы инвертора в соответствии с установленным алгоритмом. Значение амплитуды напряжения переменного тока на выходе инвертора определяется значением выпрямленного напряжения  $U_d$  из которого формируются выходные напряжение преобразователя. Оно задается сигналом на входе системы управления выпрямителем.

Диаграмма состояния ключей инвертора при угловой длительности замкнутого состояния ключей (открытого состояния транзисторов, работающих в ключевом режиме), равной  $\pi$ , представлена на рис. 4.2. В каждый данный момент времени замкнуты три ключа. Состояние ключей изменяется через каждую шестую часть периода, длительность которой в единицах времени  $\Delta t$  определяется заданным значением частоты на выходе инвертора как  $\Delta t = \pi / (3\omega_{0эл})$ . Таким образом, изменение сигнала задания частоты на входе системы управления инвертором приводит к изменению этой длительности, т.е. изменению частоты  $\omega_{0эл}$  напряжения на выходе. Последовательность замыкания ключей 1 — 2 — 3 — 4 — 5 — 6 (см. рис. 4.2) соответствует определенному направлению вращения двигателя. Для его изменения эта последовательность должна быть изменена на обратную. Из диаграммы очевидно, что существует шесть ненулевых состояний ключей, при которых всегда замкнуты два четных и один нечетный или один четный и два нечетных ключа. Кроме них могут еще использоваться два нулевых состояния, при которых замкнуты ключи 1—3 — 5 или 2—4—6 и когда все три фазы статора замкнуты на положительный или отрицательный зажим выпрямителя, что соответствует нулю напряжения на нагрузке.

Все восемь состояний ключей инвертора показаны в табл. 4.1. В ней указаны номера замкнутого состояния  $v = \omega_{0эл}t$ ;  $v' = \omega_{0эл}t + \pi/6$ . Ючения обмоток фаз статора в предположении, что обмотки соединены звездой, и значения фазных напряжений.

В каждом из шести ненулевых состояний две обмотки статора, соединенные параллельно, включены последовательно с третьей обмоткой. Поэтому на соединенных параллельно обмотках действует напряжение, равное  $(1/3)U_d$ , а на обмотке, соединенной с ними последовательно  $(2/3)U_d$ . На рис. 4.3 показаны фазные напряжения  $u_{1A}$ ,  $u_{xв}$ ,  $u_{1с}$ , значения которых на каждой шестой части периода определяются в соответствии с табл. 4.1. Там же приведено одно из линейных напряжений  $u_{AB}$ , определенное как  $u_{AB} = u_{1A} - u_{1B}$ . Поскольку выходное напряжение преобразователя формируется из напряжения  $U_d$  на выходе выпрямителя, изменение  $U_d$  в результате изменения сигнала задания на входе системы управления выпрямителем приводит к пропорциональному изменению напряжения на выходе преобразователя частоты. Показанное на рис. 4.3 линейное напряжение может быть представлено в виде суммы гармонических составляющих, не содержащих

$$u_{AB}(v) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_d \left( \sin v' - \frac{1}{5} \sin 5v' - \frac{1}{7} \sin 7v' + \frac{1}{11} \sin 11v' + \dots \right);$$



$$\nu = \omega_{0эл}t; \nu' = \omega_{0эл}t + \pi/6.$$

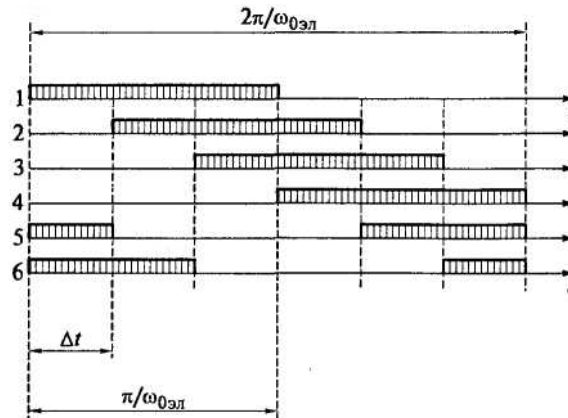


Рис. 4.2. Диаграмма состояний ключей инвертора

Первая гармоника линейного напряжения  $u_{л1}=f(\omega_{0эл}t)$  (см. рис. 4.3) имеет амплитуду, равную  $U_{лм1} \approx (1,1)U_d$ . Амплитуда первой гармоники напряжения фазы составляет  $U_{фг1} \approx (0,637)U_d$ .

Если бы автономный инвертор питался от источника постоянного напряжения (выпрямителя), обладающего двухсторонней проводимостью, то при уменьшении частоты на выходе преобразователя или при увеличении скорости двигателя до значения, большего скорости идеального холостого хода в результате действия активного момента на валу, двигатель переходил бы в режим рекуперативного торможения. Если выпрямитель выполняется как неререверсивный, то он не пропускает поток мощности от двигателя в сеть. Поэтому для обеспечения режима торможения в схеме предусмотрен тормозной резистор  $R_T$  (см. рис. 4.1). При возникновении условий для тормозного режима двигателя электронный ключ  $K_T$  замыкается и энергия торможения рассеивается в тормозном резисторе.

Несинусоидальность выходного напряжения приводит к несинусоидальному характеру тока в статорных обмотках и пульсациям момента двигателя. Эти пульсации особенно сильно проявляются при пониженной частоте и небольшом моменте инерции механизма, который приводится в движение приводом. Тогда они вызывают неравномерность вращения двигателя, а иногда и возникновение шагового режима, когда двигатель вращается с остановками. Таким образом, несинусоидальный характер напряжения на выходе выпрямителя накладывает ограничение на возможный диапазон регулирования скорости привода. Кроме того, наличие высших гармоник в кривой тока статора вызывает увеличение потерь энергии по сравнению со случаем питания двигателя синусоидальным напряжением. Поэтому в последнее время получили наибольшее распространение преобразователи частоты со звеном постоянного тока, в которых форма тока статора, близкая к синусоидальной, достигается применением инверторов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Порядок выполнения задания

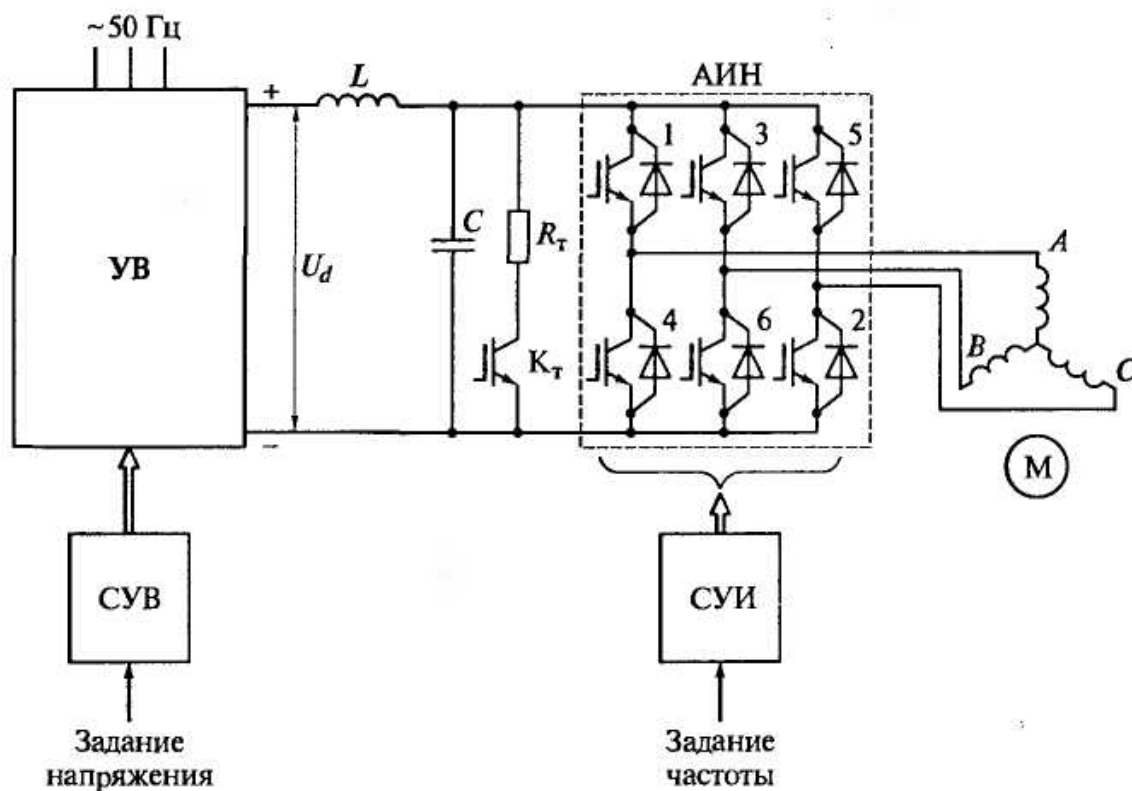


Рис. 4.1. Структура преобразователя частоты со звеном постоянного тока и управляемым выпрямителем

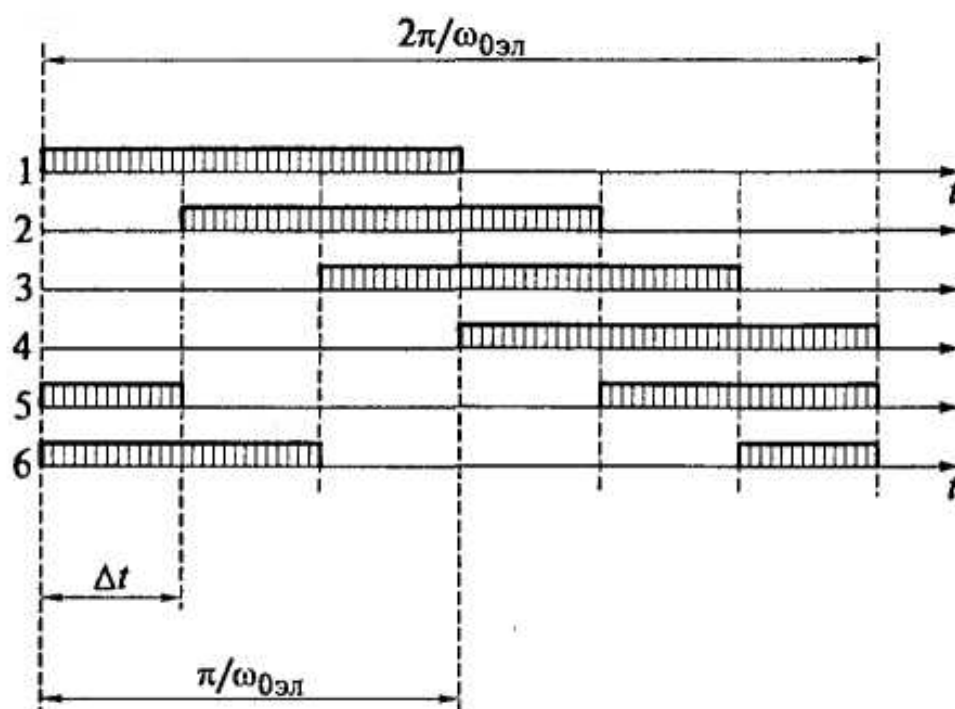
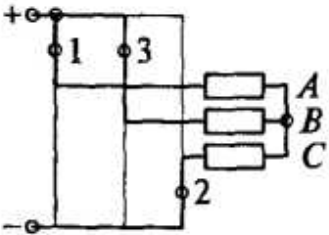
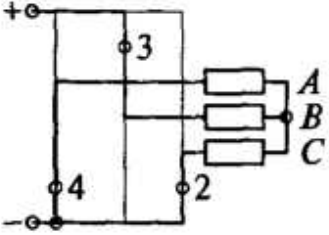
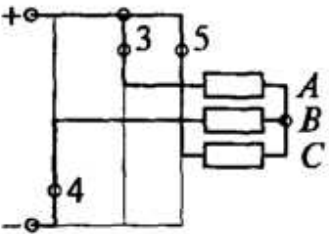
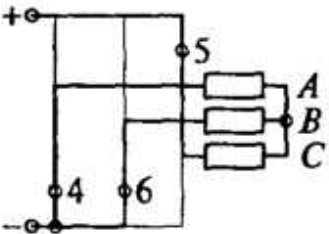
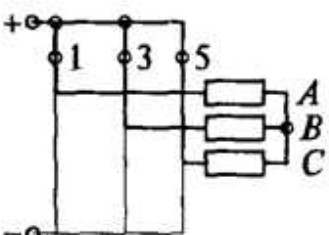
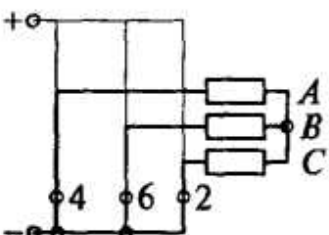


Рис. 4.2. Диаграмма состояний ключей инвертора

**Схемы включения обмоток статора при разных состояниях ключей инвертора и соответствующие значения фазных напряжений**

Замкнуты ключи	Схема включения обмоток статора	Фазные напряжения		
		$\frac{u_{1A}}{U_d}$	$\frac{u_{1B}}{U_d}$	$\frac{u_{1C}}{U_d}$
5—6—1		$+\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$
6—1—2		$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$

Замкнуты ключи	Схема включения обмоток статора	Фазные напряжения		
		$\frac{u_{1A}}{U_d}$	$\frac{u_{1B}}{U_d}$	$\frac{u_{1C}}{U_d}$
1—2—3		$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$
2—3—4		$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$
3—4—5		$-\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$
4—5—6		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$
1—3—5		0	0	0
2—4—6		0	0	0