

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

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ  
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД**

**Направление подготовки (специальность) 27.03.04 Управление в технических системах**

**Профиль подготовки (специализация) «Системы и средства автоматизации технологических процессов»**

**Форма обучения очная**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Конспект лекций</b> .....	4
<b>1.1 Лекция № 1</b> <i>Автоматизированный электропривод. Общие сведения</i> .....	4
<b>1.2 Лекция № 2</b> <i>Механические характеристики производственных механизмов и автоматизированных электродвигателей</i> .....	7
<b>1.3 Лекция № 3</b> <i>Механические характеристики автоматизированных электродвигателей постоянного тока</i> .....	12
<b>1.4 Лекция № 4</b> <i>Механические характеристики асинхронных автоматизированных электродвигателей</i> .....	16
<b>1.5 Лекция № 5</b> <i>Тормозные режимы двигателей</i> .....	20
<b>1.6 Лекция № 6</b> <i>Регулирование скорости вращения автоматизированного электропривода с асинхронным двигателем</i> .....	23
<b>1.7 Лекция № 7</b> <i>Переходные процессы в автоматизированных электроприводах</i> .....	28
<b>1.8 Лекция № 8</b> <i>Переходные процессы в автоматизированных электроприводах</i> .....	31
<b>1.9 Лекция № 9</b> <i>Выбор мощности автоматизированного электродвигателя. Нагрев и охлаждение автоматизированного электродвигателя</i> .....	37
<b>2. Методические указания по проведению практических занятий</b> .....	42
<b>2.1 Практическое занятие № ПЗ-1</b> <i>Определение и устройство автоматизированного электропривода</i> .....	42
<b>2.2 Практическое занятие № ПЗ-2</b> <i>Изучение схемы автоматизированного управления машиной постоянного тока параллельного возбуждения</i> .....	49
<b>2.3 Практическое занятие № ПЗ-3</b> <i>Исследование центробежного вентилятора</i> ...	51
<b>2.4 Практическое занятие № ПЗ-4</b> <i>Исследование характеристик автоматизированного электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения в режиме динамического торможения</i> .....	54
<b>2.5 Практическое занятие № ПЗ-5</b> <i>Механические характеристики автоматизированного электродвигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения</i> .....	57
<b>2.6 Практическое занятие № ПЗ-6</b> <i>Механические характеристики серийного автоматизированного электродвигателя</i> .....	63
<b>2.7 Практическое занятие № ПЗ-7</b> <i>Исследование механической характеристики трёхфазного асинхронного автоматизированного электродвигателя в режиме динамического торможения</i> .....	68
<b>2.8 Практическое занятие № ПЗ-8</b> <i>Механические характеристики асинхронного автоматизированного электродвигателя</i> .....	71

<b>2.9</b>	<b>Практическое занятие № ПЗ-9</b>	<i>Исследование пусковых свойств однофазного асинхронного автоматизированного электродвигателя.....</i>	<i>75</i>
<b>2.10</b>	<b>Практическое занятие № ПЗ-10</b>	<i>Исследование автоматизированного электропривода вакуумного насоса.....</i>	<i>79</i>
<b>2.11</b>	<b>Практическое занятие № ПЗ-11</b>	<i>Исследование асинхронного автоматизированного электропривода генератора постоянного тока.....</i>	<i>81</i>
<b>2.12</b>	<b>Практическое занятие № ПЗ-12</b>	<i>Схема управления автоматизированного ЭД с переключением со звезды на треугольник.....</i>	<i>82</i>
<b>2.13</b>	<b>Практическое занятие № ПЗ-13</b>	<i>Изучение схемы управления асинхронным автоматизированным электродвигателем из двух мест с защитой от обрыва фазы.....</i>	<i>85</i>
<b>2.14</b>	<b>Практическое занятие № ПЗ-14</b>	<i>Изучение схемы реверсивного управления асинхронным автоматизированным электродвигателем с защитой от заклинивания ротора.....</i>	<i>88</i>
<b>2.15</b>	<b>Практическое занятие № ПЗ-15</b>	<i>Схема реверсивного управления асинхронным двигателем с торможением противовключением.....</i>	<i>92</i>
<b>2.16</b>	<b>Практическое занятие № ПЗ-16</b>	<i>Изучение схемы динамического торможения асинхронного автоматизированного электродвигателя.....</i>	<i>94</i>
<b>2.17</b>	<b>Практическое занятие № ПЗ-17</b>	<i>Изучение схемы управления однофазным асинхронным двигателем.....</i>	<i>96</i>

# **1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

## **1. 1 Лекция №1 ( 2 часа).**

**Тема: «Автоматизированный электропривод. Общие сведения»**

### **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 экономичных 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  $90^0$ .

Наиболее экономичной среди многофазных систем оказалась система трехфазного тока, основы которой были разработаны в 1889-1891 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 нерегулируемые, 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 характеризующейся напряжением  $U_c$  и током  $I_c$  сети, в электрическую же энергию, требуемую двигателем и характеризующуюся 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: «Механические характеристики производственных механизмов и автоматизированных электродвигателей»**

### **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:

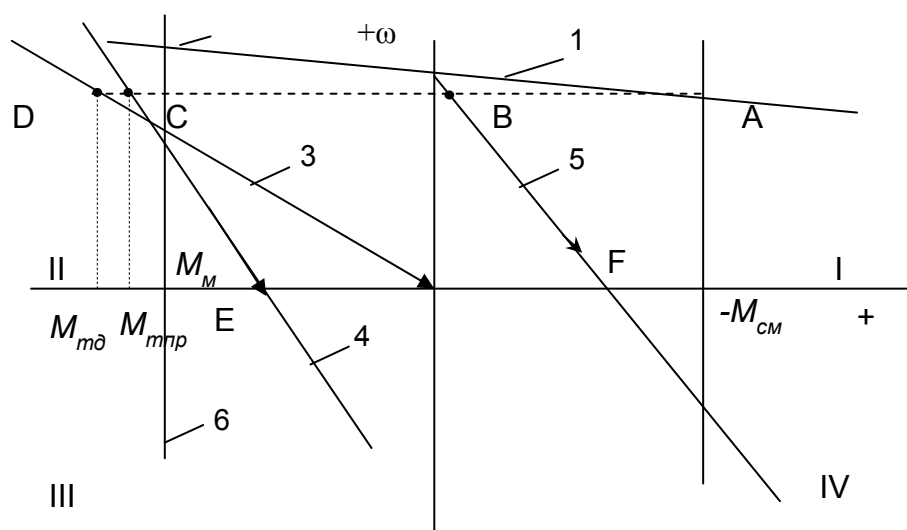
##### 1. Основные понятия

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

$$M = M_{M0} + (M_{MH} - M_{M0}) \cdot (\omega_M / \omega_{MH})^x$$

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.

$$\begin{aligned} \text{При } M = 0; \quad \omega_0 = \frac{U_n}{C_m \cdot \Phi} &\Rightarrow C_m \cdot \Phi = U_n / \omega_0; \\ E = U_n - I_n \cdot R_a; \quad E = C_m \cdot \Phi \cdot \omega_n &\Rightarrow \\ U_n = \frac{U_n - I_n \cdot R_a}{C_m \cdot \Phi} = \frac{U_n - I_n \cdot R_a}{U_n} \cdot \omega_0 &\Rightarrow \\ \omega_0 = \frac{U_n \cdot \omega_n}{U_n - I_n \cdot R_a} \end{aligned}$$

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:

$$M_{п. макс} = (1,8 \dots 2,5) M_n; \quad I_{п. макс} = (1,8 \dots 2,5) I_n;$$

$$M_{п. мин} = (0,5 \dots 1,5) M_n; \quad I_{п. мин} = (0,5 \dots 1,5) I_n;$$

$$\frac{M_{п. макс}}{M_{п. мин}} = \frac{I_{п. макс}}{I_{п. мин}} = \lambda.$$

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

$$R_Z = \frac{U_n}{I_{п\text{ макс}}} = R_a \cdot \lambda^Z \Rightarrow \lambda = \sqrt[Z]{\frac{U_n}{I_{п\text{ макс}} \cdot R_a}}$$

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

При заданных условиях пуска число ступеней реостата будет равно:

$$Z = \frac{\lg \frac{U_n}{I_{п\text{ макс}} \cdot R_a}}{\lg \lambda}$$

### 1. 3 Лекция №3 ( 2 часа).

**Тема: «Механические характеристики автоматизированных электродвигателей постоянного тока»**

#### 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).

$$\begin{aligned} C_a \cdot \dot{\Phi} &= \frac{\dot{I}}{I}; \\ \omega &= \frac{U}{C_a \cdot \dot{\Phi}} - \frac{I \cdot R}{C_a \cdot \dot{\Phi}} = \\ &= \frac{U}{\sqrt{I} \cdot \alpha \cdot C_a} - \frac{R}{\alpha \cdot C_a} \end{aligned}$$

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 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.

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

## 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:

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

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

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 ( 2 часа).**

**Тема: «Механические характеристики асинхронных автоматизированных 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 постоянно 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  $120^0$ , по обмоткам протекают токи, создается круговое вращающееся 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  $90^0$  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

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

Его фаза  $\alpha$  определится из условия

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

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 противовключением), 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:

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

Характерными точками механической характеристики являются:

- пусковая точка –  $M=M_n$ ;  $\omega=0$ ;
- точка провала на пусковой ветви, угловая скорость,
- в которой соответствует скольжению  $S=0,8$ ;  $M=M_{мин}$ ;
- 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  $M_{0в}=f(\omega)$ , наносятся границы пуска;
- через точки  $d$  и  $d_1$  естественной механической характеристики, соответствующие значениям моментов  $M_{пуск макс}$  и  $M_{пуск мин}$ , проводится прямая до пересечения с линией синхронной скорости ( $S=0$ ) в точке  $t$ ;
- из полученной точки проводится пусковая характеристика до точки с координатами  $M_{пуск макс}$ ,  $\omega=0$ ;
- в точке с координатами  $M_{пуск мин}$ ,  $\omega=\omega_3$  происходит отключение первой ступени реостата;
- в точке с координатами  $M_{пуск мин}$ ,  $\omega=\omega_2$  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:

$$R_1 = \frac{[dc]}{[ed]} \cdot R_{\delta i \delta} \quad R_2 = \frac{[cb]}{[ed]} \cdot R_{\delta i \delta}$$

$$\text{где } R_{\delta i \delta} = \frac{U_{2i} \cdot S_i}{\sqrt{3} I_{2i}} \quad \text{или} \quad R_{\delta i \delta} = \frac{D_i \cdot S_i}{\sqrt{3} \cdot I_{2i}^2 \cdot \eta_i}.$$

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:

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

$$M_{\text{дин } 1i} = M_{\text{пуск макс}} - M_{ci}; \quad M_{\text{дин } 2i} = M_{\text{пуск мин}} - M_{ci}.$$

## 1. 5 Лекция №5 ( 2 часа).

**Тема: «Тормозные режимы двигателей»**

### 1.5.1 Вопросы лекции:

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

### 1.5.2 Краткое содержание вопросов:

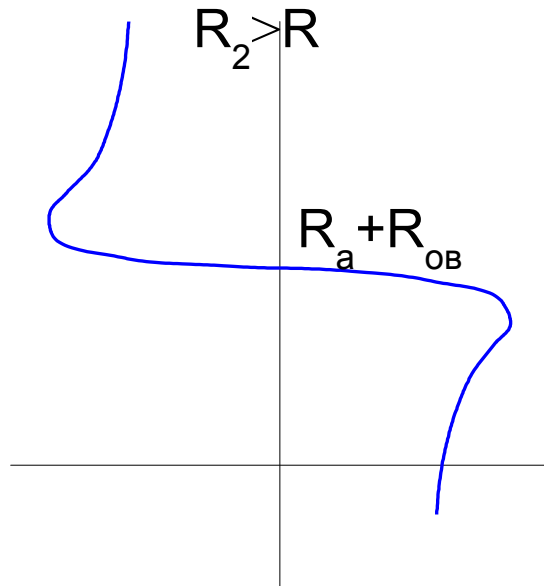
1. Генераторное торможение асинхронного электродвигателя

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

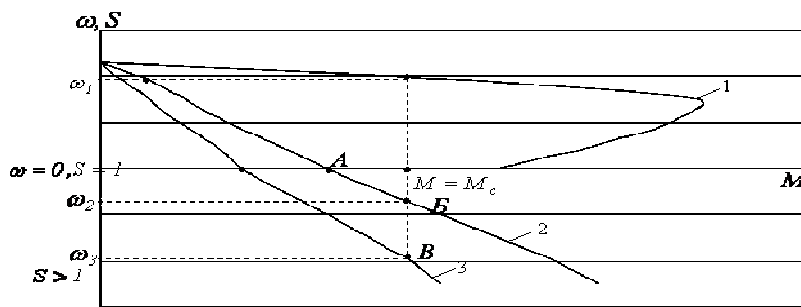
$$M = \frac{3U^2}{2\omega_0 \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}$$

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:

$$S_e = S_a \cdot \frac{R_\delta + R_{\bar{a}}}{R_{\bar{a}}}.$$

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 точкеВ 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 точкиД 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. 6 Лекция №6 ( 2 часа).

**Тема: «Регулирование скорости вращения автоматизированного электропривода с асинхронным двигателем»**

#### 1.6.1 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

### **1.6.2 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 якору 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  $\mathcal{E}$ , получаемым от использования предлагаемого регулируемого электропривода.

$$\mathcal{E} = Z_0 - Z_1,$$

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

$$U = f_1 \hat{\Phi}.$$

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

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1'}}{f_{1'}} = const$$

Оценку частотного регулирования.

1. Регулирование двухзонное - вниз ( $U_1/f_1 \approx const$ ) 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 ( $\Phi \approx const$ ),  $P = P_n$  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  $\Phi \equiv U_1$  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. 7 Лекция №7( 2 часа).**

**Тема: «Переходные процессы в автоматизированных электроприводах»**

#### **1.7.1 Вопросы лекции:**

1. Общие положения
2. Дифференциальное уравнение движения электропривода.
3. Приведение моментов (сил) статического сопротивления и моментов (масс) инерции к валу электродвигателя

#### **1.7.2 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  $M_{дин}$

$$M = M_c + M_{дин}.$$

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

## 2 Дифференциальное уравнение движения электропривода

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Так как  $M_{изб}=M_{дин}$ , а  $M_{изб}=M-M_c$ , 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.

$M_{изб}=0$  – система электропривода находится в состоянии покоя или установившегося движения,  $M_{изб}>0$  – происходит ускорение,  $M_{изб}<0$  – 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  $\omega_6$ .

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

$$J = J_0 + J_I + J_2 \cdot \frac{\omega_6^2}{\omega^2} + m \cdot \frac{v^2}{\omega^2},$$

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

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

Момент инерции простых тел можно рассчитать. Например, момент инерции цилиндра,  $m_c$  с внешним  $R_c$  и внутренним  $r_c$  радиусами относительно продольной оси

$$J_o = m_o \cdot (R_o^2 - r_o^2) / 2.$$

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

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

## 1. 8 Лекция №8 ( 2 часа).

**Тема: «Переходные процессы в автоматизированных электроприводах»**

### 1.8.1 Вопросы лекции:

1. Расчет продолжительности переходных процессов электропривода
2. Потери энергии при пуске и торможении электропривода и пути их снижения
3. Статическая устойчивость электропривода
- 34 Динамическая устойчивость электропривода

### 1.8.3 Краткое содержание вопросов:

#### 1 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  $d\omega$  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

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

#### 2 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

$$K = \Delta P_n - V_n.$$



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

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

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

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

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

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

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

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  $S_{\text{нач}}=2$ ,  $S_{\text{кон}}=0$  и потери энергии

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

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).

### 3 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

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

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

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

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

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

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.

#### 4 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.

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

$$t_{\partial n} = T_m \ln \frac{M_{cn} - M_0}{M_{cn} - \lambda \cdot M_n}.$$

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

Если же  $t_{\partial n} \geq t_{\partial n}$ , то работоспособность ЭП нарушается.

## 1. 9 Лекция №9 ( 2 часа).

**Тема: «Выбор мощности автоматизированного электродвигателя. Нагрев и охлаждение автоматизированного электродвигателя»**

### 1.9.1 Вопросы лекции:

1. Основные положения
2. Уравнения теплового баланса, нагрева и охлаждения электродвигателя.
3. Способы определения постоянной нагрева
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 (большему 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  $c d\tau$  будет затрачена на нагрев самого двигателя, а другая  $A \tau dt$  будет отдана в окружающую среду. Таким образом справедливо равенство

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

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

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

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

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

Подставив полученное значение  $K$  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  $(\Delta P - A \tau_0) e^{\frac{-A}{c} t} = \Delta P - A \tau; (\Delta P - A \tau_0) e^{\frac{-A}{c} t} - \Delta P = -A \tau;$

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

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

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  $40^{\circ}\text{C}$ , 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, $^{\circ}\text{C}$	105	120	130	155	180	180
Предельно допустимое превышение температуры, $^{\circ}\text{C}$	60	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.

## **2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**

### **2.1 Практическое занятие №1 ( 2 часа).**

**Тема: «Определение и устройство автоматизированного электропривода»**

#### **2.1.1 Задание для работы:**

1. Ознакомится с устройством автоматизированного электропривода.

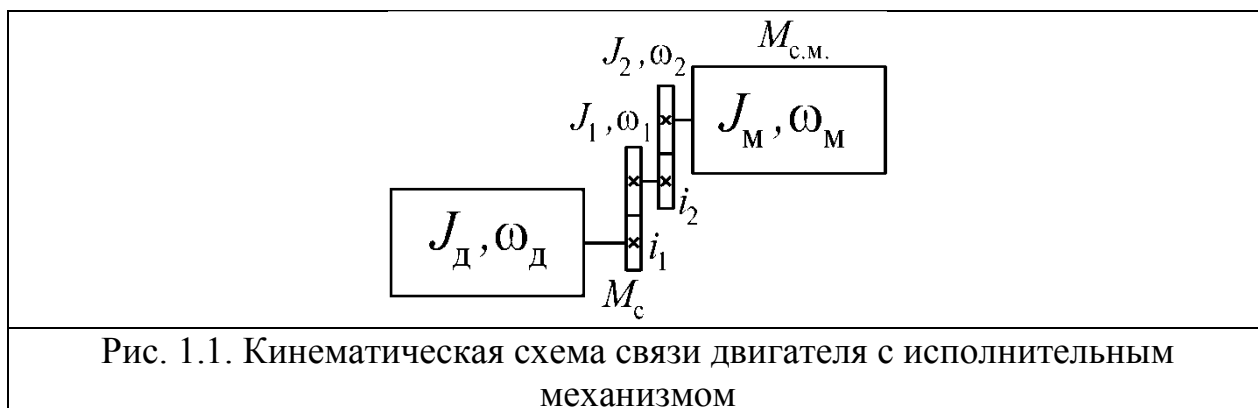
2. Изучить понятия приведенного механического звена, моментов и сил сопротивления, инерционных масс и моментов инерции

### 2.1.2 Краткое описание проводимого занятия:

#### 1.1. Приведенное механическое звено

Механическая часть электромеханической системы включает в себя все связанные движущие массы: двигателя, передаточного устройства и исполнительного механизма машины. К ротору двигателя при скорости  $\omega$  приложен электромагнитный момент  $M$ , под действием которого механическая часть приводится в движение. Непосредственное представление о движущихся массах установки и механических связях между ними даёт кинематическая схема электропривода.

Примерная кинематическая схема электропривода с вращательным движением исполнительного органа представлена на рис. 2.1. Иногда рабочий орган механизма совершает поступательное движение (кран, лифт, строгальный станок, шлифовальный, долбежный и др.).



Каждый из элементов реальной кинематической цепи обладает упругостью, т.е. деформируется под нагрузкой, а в соединениях элементов имеются воздушные зазоры. Если учитывать все факторы, то расчетная схема будет очень сложной и расчет такой схемы выполняется на ЭВМ. Однако основные закономерности движения таких систем определяются наибольшими массами и зазорами и наименьшими жесткостями связей системы, что позволяет свести расчетную схему механической части привода к двухмассовой (иногда одномассовой) механической системе с эквивалентными упругими связями и с суммарным зазором, приведенным к угловой скорости вала двигателя.

Для составления расчетных схем механической части электропривода необходимо приведение всех параметров элементов кинематической цепи к одной расчетной скорости. Обычно наиболее удобным является приведение их к скорости двигателя. Условием соответствия приведенной расчетной схемы реальной механической системе является выполнение закона сохранения энергии, то есть должны выполняться условия

$$(W_{ki})_{i\dot{\omega}} = J_{i\dot{\omega}} \omega_1^2 / 2 = J_i \omega_i^2 / 2 ;$$

$$(W_{kj})_{i0} = J_{i0j} \omega_1^2 / 2 = m_j v_j^2 / 2.$$

Откуда можно найти формулы приведения

$$J_{i0i} = J_i / i_{li}^2; \quad J_{i0j} = m_j \rho_{lj}^2.$$

Расчетную схему механической части привода в общем случае можно свести к одному обобщенному жесткому механическому звену, имеющему эквивалентную массу с моментом инерции  $J$ , на которую воздействует электромагнитный момент двигателя  $M$ , и суммарный приведенный к валу двигателя момент сопротивления (статический момент)  $M_c$ , включающий все механические потери в системе, в том числе механические потери в двигателе.

Момент сопротивления механизма, возникающий на валу рабочей машины, состоит из двух слагаемых, соответствующих полезной работе и работе трения. Полезная работа, совершаемая производственным механизмом, связана с выполнением соответствующей технологической операции. Работа трения, совершаемая в производственном механизме, учитывается обычно КПД механических связей. Момент трения всегда направлен против движущего момента привода.

## 1.2. Приведение моментов и сил сопротивления, инерционных масс и моментов инерции

### 2.2.1. Активные и реактивные моменты сопротивления.

В общем случае статический момент

$$M_{\bar{n}} = \Delta M_{\Sigma} + M_{\bar{n}\Sigma},$$

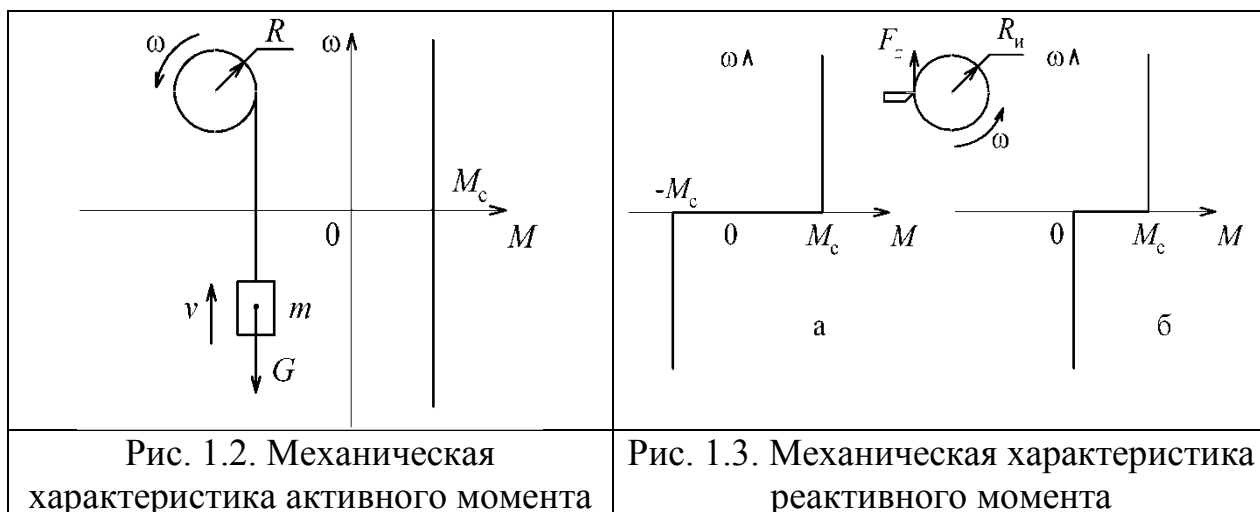
где  $\Delta M_{\Sigma}$  – суммарные потери в приводе;  $M_{\bar{n}\Sigma}$  – суммарный статический момент.

Обычно первая составляющая имеет сравнительно малую величину. Поэтому рассмотрим вторую составляющую статического момента, оказывающего наибольшее влияние на привод.

Для электропривода имеет значение, как зависит статический момент нагрузки от скорости. Такую зависимость описывает механическая характеристика механизма, то есть зависимость статического момента нагрузки от скорости  $M_{\bar{n}} = f(\omega)$  или  $\omega = f(M_{\bar{n}})$ .

По характеру взаимодействия с электроприводом все силы и моменты делятся на две большие группы: активные и реактивные.

*Активными* силами и моментами называются силы и моменты, создаваемые внешними по отношению к двигателю источниками механической энергии и не зависящие от работы двигателя. Например, силы тяжести, ветровые нагрузки. Активный статический момент не меняет своего знака при изменении направления вращения.



На рис.1.2. приведенный момент силы тяжести груза  $G$ :

$$M_{\text{н}} = GR = mgR ,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $m$  – масса груза.

*Реактивными* силами и моментами называются силы и моменты, возникающие как реакция на момент, создаваемый двигателем и направлены против направления вращения двигателя. Все реактивные силы и моменты зависят от скорости. По характеру этой зависимости ( $M_c = f(\omega)$ ) различают нагрузки типа сухого трения, типа вязкого трения и вентиляторного типа.

Силы и моменты сухого трения неизменны по модулю, но скачком изменяют направление в зависимости от знака скорости

$$M_c = |M_c| \text{sign } \omega .$$

Характеристика момента *сухого трения* показана на рис. 1.3, а.

Реактивные нагрузки, возникающие при различных технологических процессах обработки, могут иметь одно направление, скачком изменяя своё значение до нуля при изменении знака скорости. Примером может служить зависимость (рис. 2.3, б) момента резания от скорости при обработке изделия резцом. Значение статического момента при этом пропорционально усилию резания  $F_z$ :

$$M_{\text{н}} = F_z R_{\text{е}} ,$$

где  $R_{\text{е}}$  – радиус изделия.

Силы и моменты вязкого трения линейно зависят от скорости (рис. 1.4, а):

$$M_c = \beta_{\text{а.в.}} \omega ,$$

где  $\beta_{\text{а.в.}}$  – коэффициент пропорциональности.

Обычно момент вязкого трения составляет 8-10% от момента сухого трения.

Третий тип часть встречающихся нагрузок – вентиляторная нагрузка. Такая нагрузка зависит от скорости в более высокой степени (рис. 1.4, б)

$$M_c = \beta_{\text{в.в.}} \omega^n , \quad n > 1 .$$

При  $n=2$  нагрузку называют чисто вентиляторной. Такой зависимостью обладают центробежные вентиляторы. Для ряда механизмов показатель

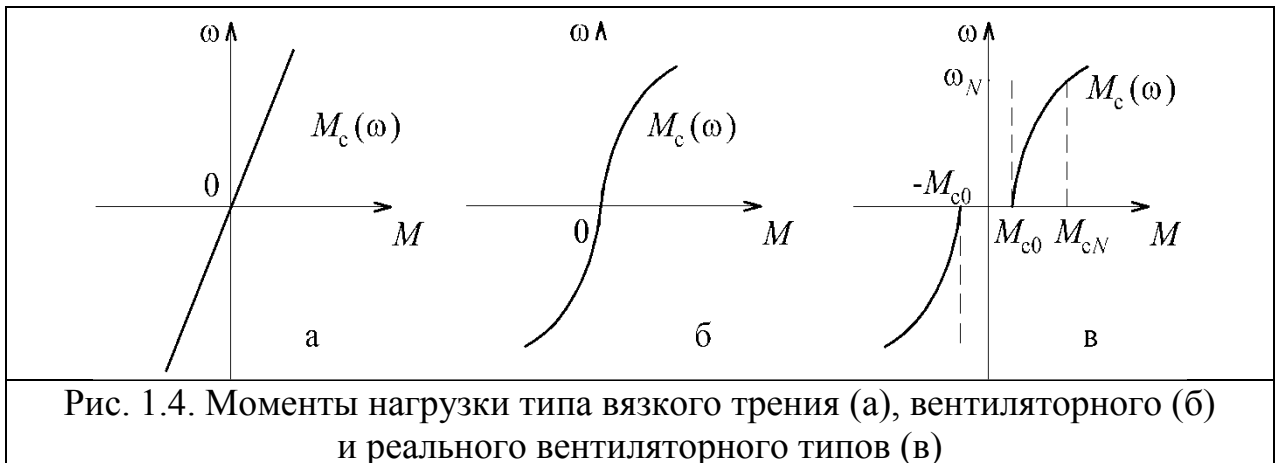
степени  $n > 2$ . Такую характеристику имеют центробежные насосы, работающие на противодавление.

В реальности у механизма есть некоторый начальный момент трогания  $M_{c0}$ , составляющий 20-40% от номинального  $M_{cN}$  (рис. 2.4, в).

Существуют механизмы циклического действия, у которых момент нагрузки зависит от угла поворота:

$$M_c = M_{c, \max} \sin \varphi.$$

Рассмотренные типовые нагрузки обычно содержатся в качестве составляющих в нагрузках реальных электроприводов.



### 1.2.2. Приведение момента инерции для вращательного и поступательного движения рабочего органа

Условием соответствия приведенной расчетной схемы реальной механической системе является выполнение закона сохранения энергии. При приведении необходимо обеспечить сохранение запаса кинетической и потенциальной энергии системы, а так же элементарной работы всех действующих в системе сил и моментов на возможных перемещениях. Поэтому при приведении моментов инерции элемента системы, движущегося вращательно со скоростью  $\omega_i$  или массы, поступательно движущейся со скоростью  $v_j$  к расчетной скорости  $\omega_1$  должны выполняться условия

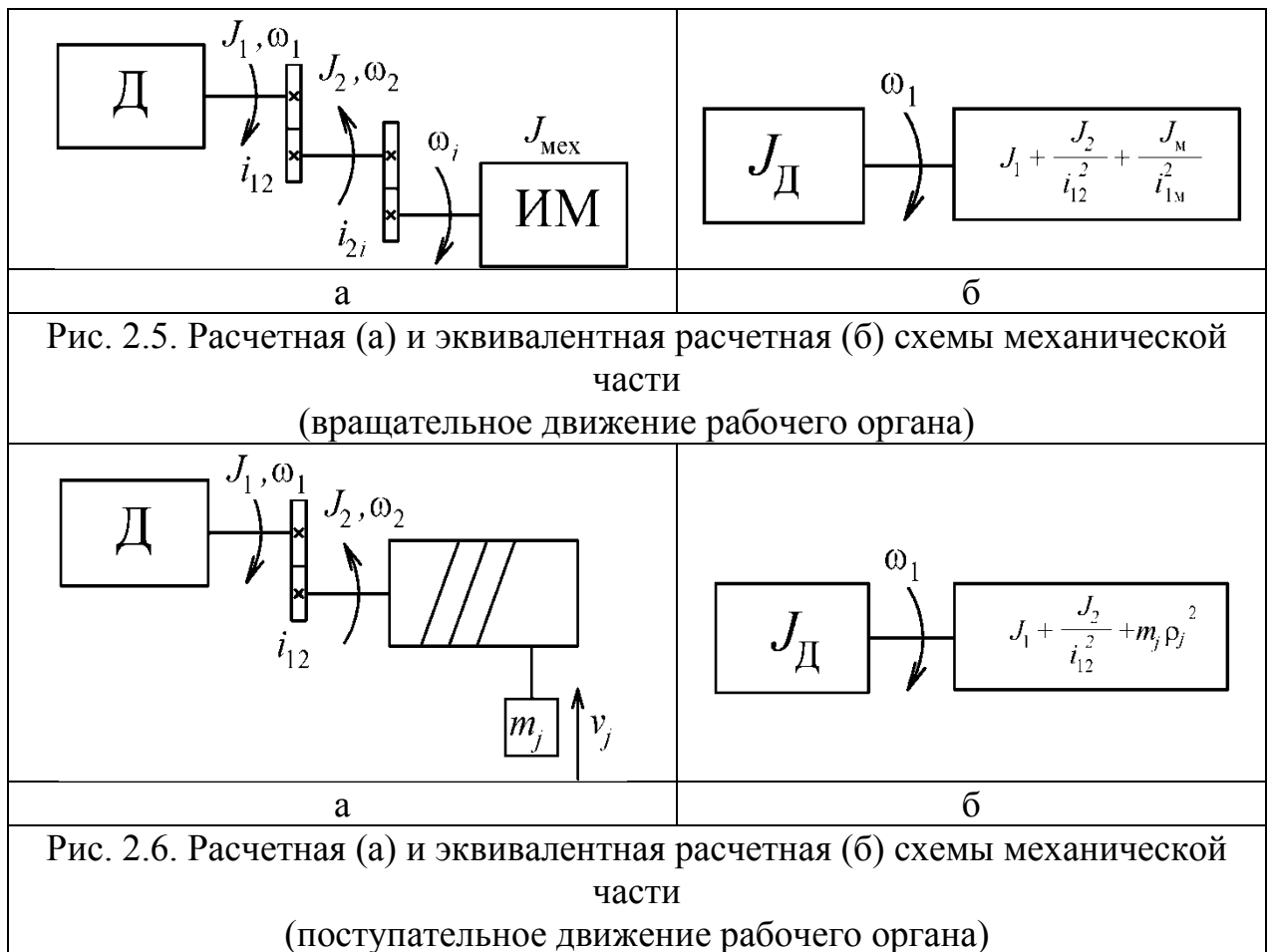
$$(W_{\dot{e}i})_{i\dot{o}} = J_{i\dot{o}i} \omega_1^2 / 2 = W_{\dot{e}i} = J_i \omega_i^2 / 2;$$

$$(W_{\dot{e}i})_{i\dot{o}} = J_{i\dot{o}i} \omega_1^2 / 2 = W_{\dot{e}i} = m_j v_j^2 / 2.$$

Отсюда можно получить формулы приведения моментов инерции:

$$J_{i\dot{o}i} = J_i / i_{1i}^2; \quad J_{i\dot{o}j} = m_j \rho_{1j}^2,$$

где  $i_{1i} = \omega_1 / \omega_i$  – передаточное число от вала приведения до  $i$ -го вала;  $\rho_{1j} = v_j / \omega_1$  – радиус приведения к валу со скоростью  $\omega_1$ .



Приведенный суммарный момент инерции для механизма на рис 2.5, а вычисляется с учетом формул приведения для моментов инерции следующим образом:

$$J_{\text{и0}} = J_{\text{а}} + J_1 + \frac{J_2}{i_{12}^2} + \frac{J_i}{i_{1i}^2}.$$

В случае поступательного движения рабочего органа исполнительного механизма:

$$J_{\text{и0}} = J_{\text{а}} + J_1 + \frac{J_2}{i_{12}^2} + m_j \rho_{1j}^2,$$

где  $\rho_{1j} = \frac{v}{\omega_1} = \frac{\omega_2 r_{\text{а}}}{\omega_1} = \langle \omega_2 = \omega_1 / i_{12} \rangle = \frac{r_{\text{а}}}{i_{12}}$  - радиус приведения.

### 1.2.3. Приведение моментов сопротивления

Приведение моментов сопротивления от одной оси вращения к другой может быть произведено на основании энергетического баланса системы. Потери мощности, возникающие в промежуточных передачах, учитываются введением в расчеты соответствующего КПД -  $\eta_i$ .

Без учета КПД передачи приведение моментов сопротивления можно выполнить приравниванием мощностей на двигателе и рабочем органе ИМ:

$$P_1 = M_{\text{и0}} \omega_1 \text{ и } P_i = M_{\text{н.и}} \omega_i,$$

где  $M_{\text{н.и}}$  - момент сопротивления производственного механизма.

Откуда статический момент на валу двигателя

$$M_{i\delta} \omega_1 = M_{\bar{n},i} \omega_i, \quad M_{i\delta} = \frac{M_{\bar{n},i} \omega_i}{\omega_1} = \frac{M_{\bar{n},i}}{i_{i\delta}}.$$

Приведение сил сопротивления производится аналогично приведению моментов. Без учета потерь в передаче приведенный к валу двигателя статический момент

$$M_{i\delta} \omega_1 = F_{\bar{n},i} v_{ij}, \quad M_{i\delta} = \frac{F_{\bar{n},i} v_{ij}}{\omega_1} = F_{\bar{n},i} \rho_{1j}.$$

#### 1.2.4. Об учете КПД передаточного механизма

Рассмотрим упрощенную схему механической части электропривода. Передаточный механизм (ПМ) обладает двумя характеристиками передаточное число  $i_{i\delta}$  и КПД  $\eta_{i\delta}$  механизма. В КПД механизма входят все КПД элементов

$$\eta_{i\delta} = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_i.$$

Двигатель создает механическую мощность, направленную от сети к исполнительному механизму. Уравнение баланса мощностей

$$M_{\bar{n}} \omega_1 = \frac{M_{i\delta} \omega_i}{\eta_{i\delta}} + \Delta M \omega_1, \quad (1.1)$$

где  $\Delta M$  – момент потерь, складывающийся из момента трения в двигателе и передачах.

Величина момента потерь редко превосходит 3-5 % от номинального момента и им часто пренебрегают, считая  $\Delta M \approx 0$ .

Разделив обе части уравнения (1.1) на  $\omega_1$ , получим

$$M_{\bar{n}} = \frac{M_{i\delta}}{i_{i\delta} \eta_{i\delta}} + \Delta M,$$

где  $i_{i\delta} = \omega_1 / \omega_i$  - общее передаточное число передаточного механизма.

Таким образом, для двигательного режима справедлива следующая формула для определения приведенного статического момента:

$$M_{\bar{n}} = \frac{M_{i\delta}}{i_{i\delta} \eta_{i\delta}}.$$

Рис. 2.7, а иллюстрирует направления потока энергии и моментов.

В генераторном режиме источником момента является сам исполнительный механизм. Статическим моментом в данном случае является момент двигателя в тормозном режиме. Уравнение баланса энергий для генераторного режима

$$M_{\bar{n}} \omega_1 = M_{i\delta} \omega_{i\delta} \eta_{i\delta}.$$

Выполнив процедуру деления на скорость двигателя, получаем

$$M_{\bar{n}} = \frac{M_{i\delta} \eta_{i\delta}}{i_{i\delta}}.$$

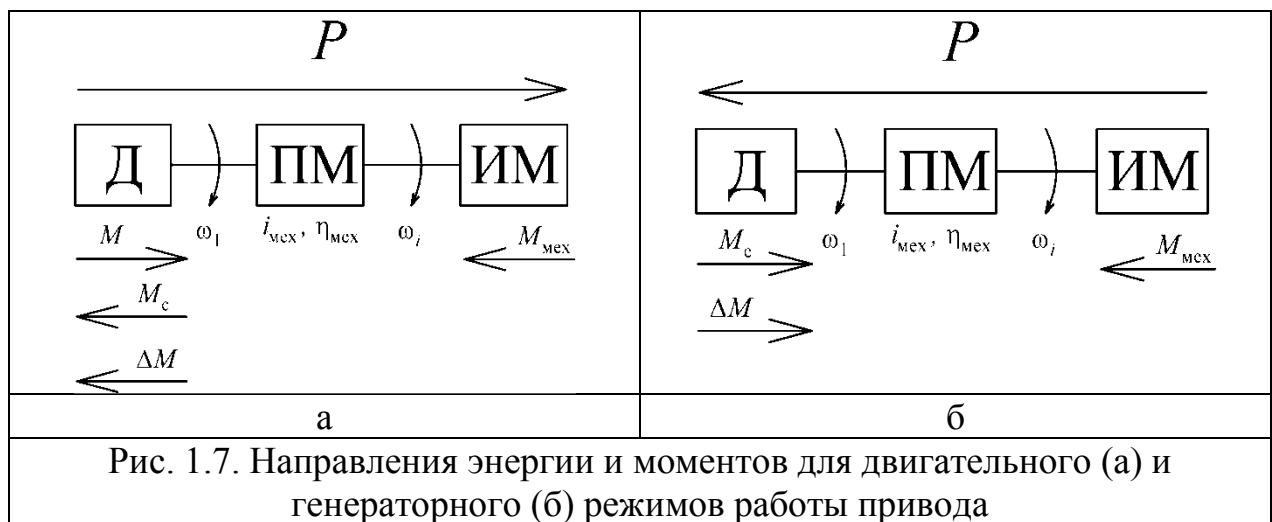
При поступательном движении статический момент в двигательном режиме

$$M_{\bar{n}} = \frac{F_{i\delta} \rho}{\eta_{i\delta}},$$

в генераторном режиме



$$M_{\text{н}} = F_{\text{ia}\delta} \rho \eta_{\text{ia}\delta} \cdot$$



### 2.1.3 Результаты и выводы:

Ознакомится с устройством автоматизированного электропривода с последующим изучением понятия приведенного механического звена, моментов и сил сопротивления, инерционных масс, моментов инерции и активные и реактивные моменты сопротивления.

### 2.2 Практическое занятие №2( 2 часа).

**Тема: «Изучение схемы автоматизированного управления машиной постоянного тока параллельного возбуждения»**

#### 2.2.1 Задание для работы:

1. Изучить зависимость частоты вращения электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения от напряжения на якоре на холостом ходу

#### 2.2.2 Краткое описание проводимого занятия:

#### 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:

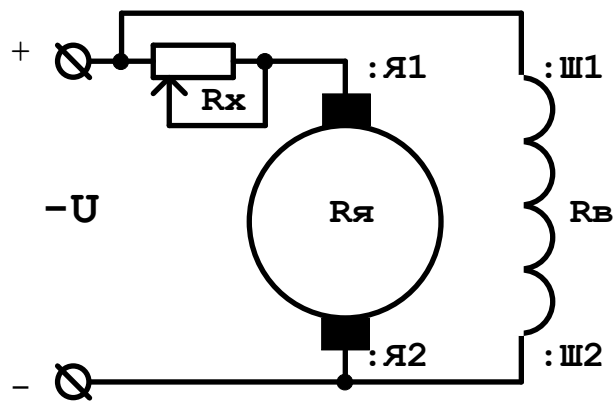


Рис. 1: Схема включения электродвигателя.

Под действием приложенного напряжения через обмотку возбуждения протекает ток возбуждения  $I_{\text{в}} = U/R_{\text{в}}$ , который создает 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:

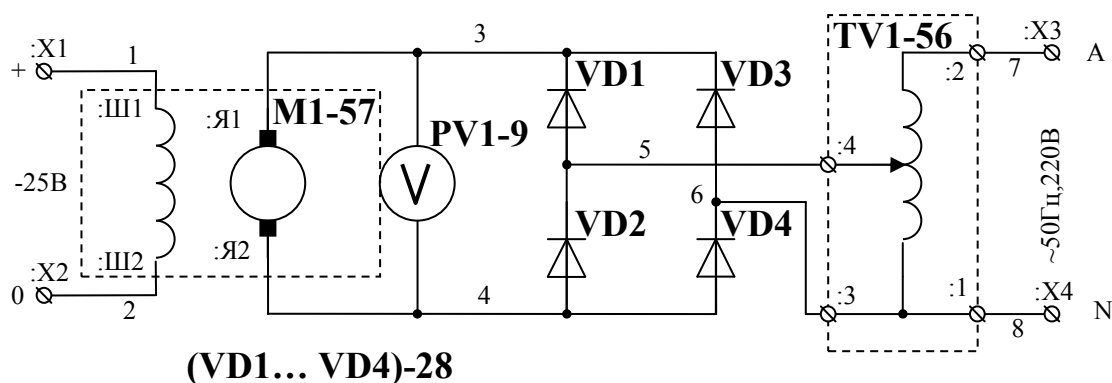


Рис.2: Принципиальная схема установки для испытания электродвигателя.

### 2.2.3 Результаты и выводы:

Изучение схемы, принцип работы электродвигателя, регулирование частоты вращения, изменять устанавливать и измерять параметры режимов работы.

### 2.3 Практическое занятие №3( 2 часа).

Тема: «Исследование центробежного вентилятора»

#### 2.3.1 Задание для работы:

1. Изучение зависимости 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  $P_B = f(Q)$ .

#### 2.3.2 Краткое описание проводимого занятия:

##### 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  $1,29 \text{ кг/м}^3$ .

Так как до входа во всасывающий патрубок вентилятора скорость воздуха была равна нулю, а на выходе  $v$ , то следовательно, прошедшей массе воздуха было сообщено

$W_{\text{кджоулей}}$  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

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

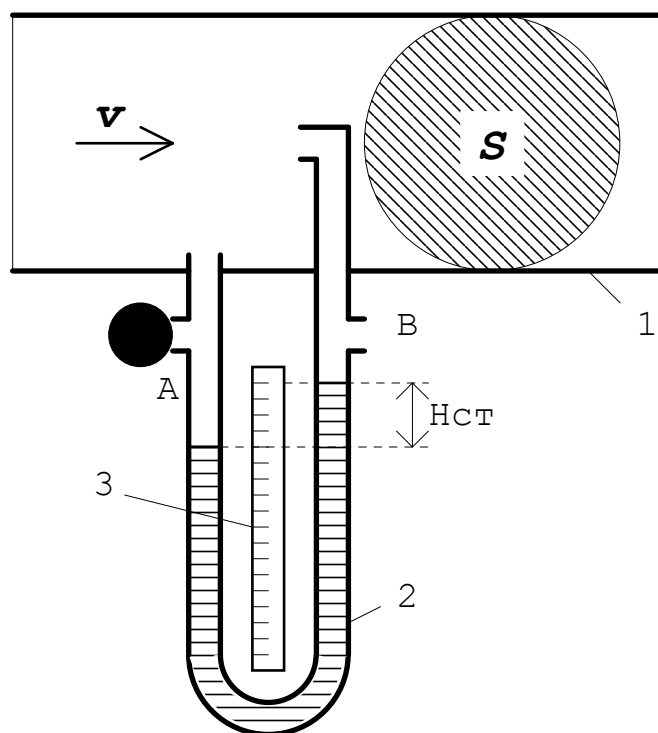
Его можно измерить с помощью трубки Пито, изображённой на рисунке 1, и по его величине подсчитать скорость воздушного потока

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

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.*



#### 2.4.1 Задание для работы:

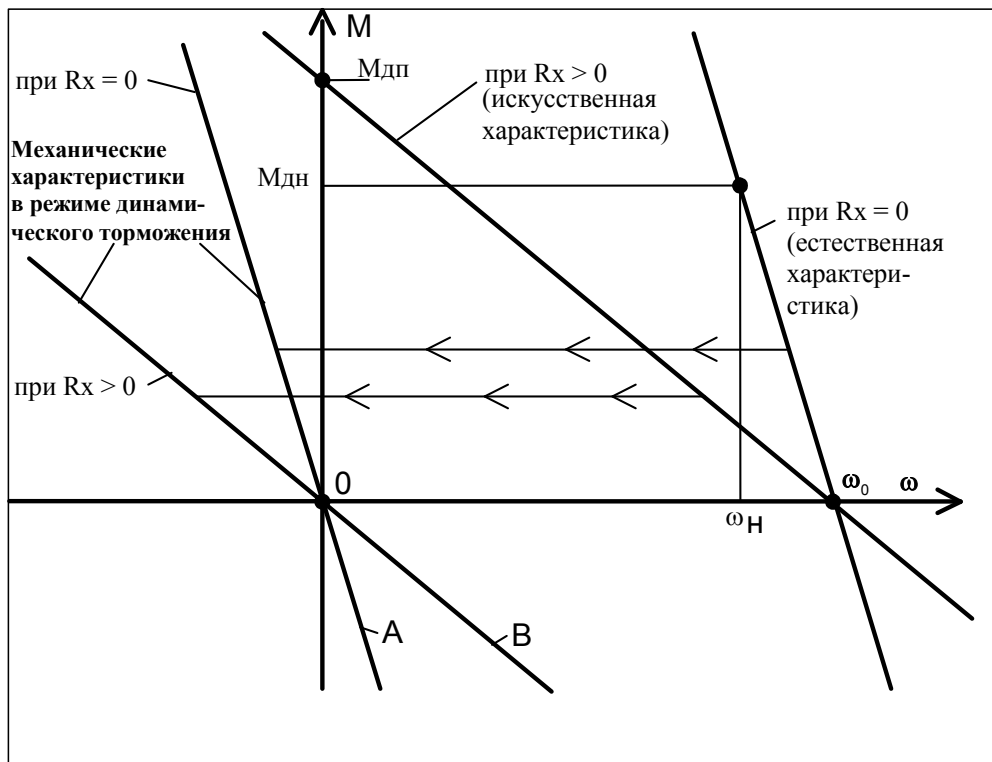
1. Построить график зависимости электродвижущей силы от частоты вращения  $E = f(\omega)$  и механическую характеристику электродвигателя

$M = f(\omega)$  в режиме динамического торможения

#### 2.4.2 Краткое описание проводимого занятия:

### 2. Краткие теоретические положения

Для перевода в режим динамического торможения якорь электродвигателя отключается от сети постоянного тока и замыкается на сопротивление  $R_x$  или накоротко. Напряжение на обмотке возбуждения, а следовательно, и магнитный поток остаются неизменными.



**Рис. 1: Механические характеристики шунтового электродвигателя в режиме динамического торможения.**

В результате частота идеального холостого хода  $\omega_0 = \frac{U}{k \Phi}$  станет равной нулю, а наклон характеристики, определяемый коэффициентом при втором члене механической характеристики  $\omega = \frac{U}{k \Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_x}{(k \Phi)^2} M$ , останется неизменным.

Таким образом, характеристика, не изменяя наклона, переместится параллельно самой себе, как показано на рисунке, в начало координат и будет описываться уравнением прямой линии, проходящей через начало координат

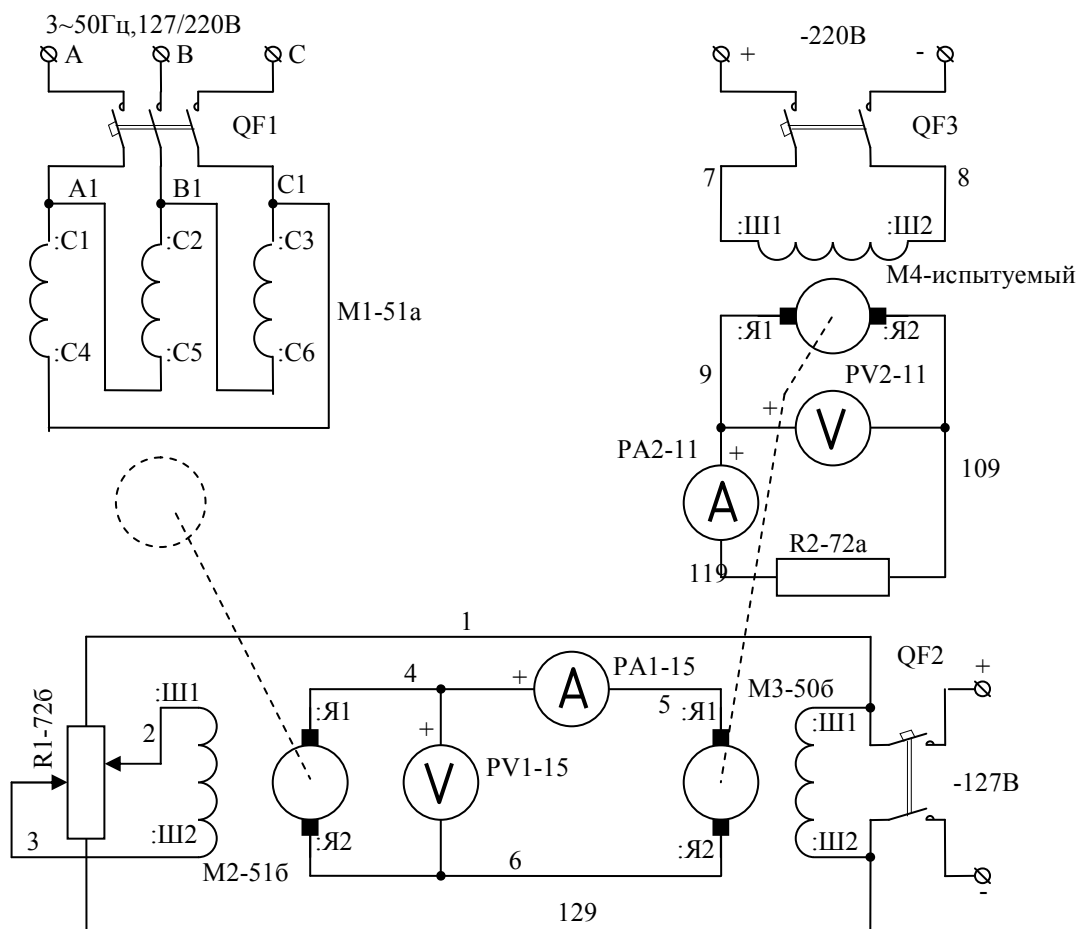
$$\omega = -\frac{R_{\text{я}} + R_{\text{x}}}{(k \Phi)^2} M . \quad (1)$$

Две такие характеристики А и В (для  $R_{\text{x}} = 0$  и для  $R_{\text{x}}$  отличным от нуля) приведены на рисунке 1.

*Схема изображена на рис. 2.* Якорь испытуемого электродвигателя М4 замкнут через амперметр РА2 на резистор R2. На обмотку возбуждения подано постоянное напряжение 220 В. Электродвигатель в режиме торможения приводится во вращение электродвигателем постоянного тока параллельного возбуждения М3 (балансирная машина). Двигатель способен за счёт изменения напряжения на его якоре изменять частоту вращения, как в прямом, так и в обратном направлениях. Регулируемое напряжение на якорь этого электродвигателя подаётся от мотор-генераторной установки (асинхронный электродвигатель М1 – генератор постоянного тока с независимым возбуждением М2). Электродвигатель М1 вращает якорь генератора М2 с постоянной скоростью, а напряжение на выходе генератора изменяется за счёт изменения напряжения на его обмотке возбуждения с помощью двухдвижкового потенциометра R1.

Если левый движок потенциометра располагается выше правого, то на клемме Ш1 минус, а на клемме Ш2 плюс и наоборот, если левый движок ниже правого, то минус на клемме Ш2, а плюс на клемме Ш1. Напряжение снимается с участка потенциометра, расположенного между движками. Поэтому чем больше раздвинуты движки, тем выше напряжение. Таким образом, изменяется полярность и величина напряжения на якоре генератора М2 и на якоре М3, а следовательно, направление и величина частоты вращения электродвигателя М3 и испытуемого электродвигателя М4.





### 2.4.3 Результаты и выводы:

Научиться осуществлять перевод электродвигателя в режим динамического торможения, строить механические характеристики в этом режиме.

### 2.5 Практическое занятие №5( 2 часа).

**Тема: «Механические характеристики автоматизированного электродвигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения»**

#### 2.5.1 Задание для работы:

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

#### 2.5.2 Краткое описание проводимого занятия:

##### 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;

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

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

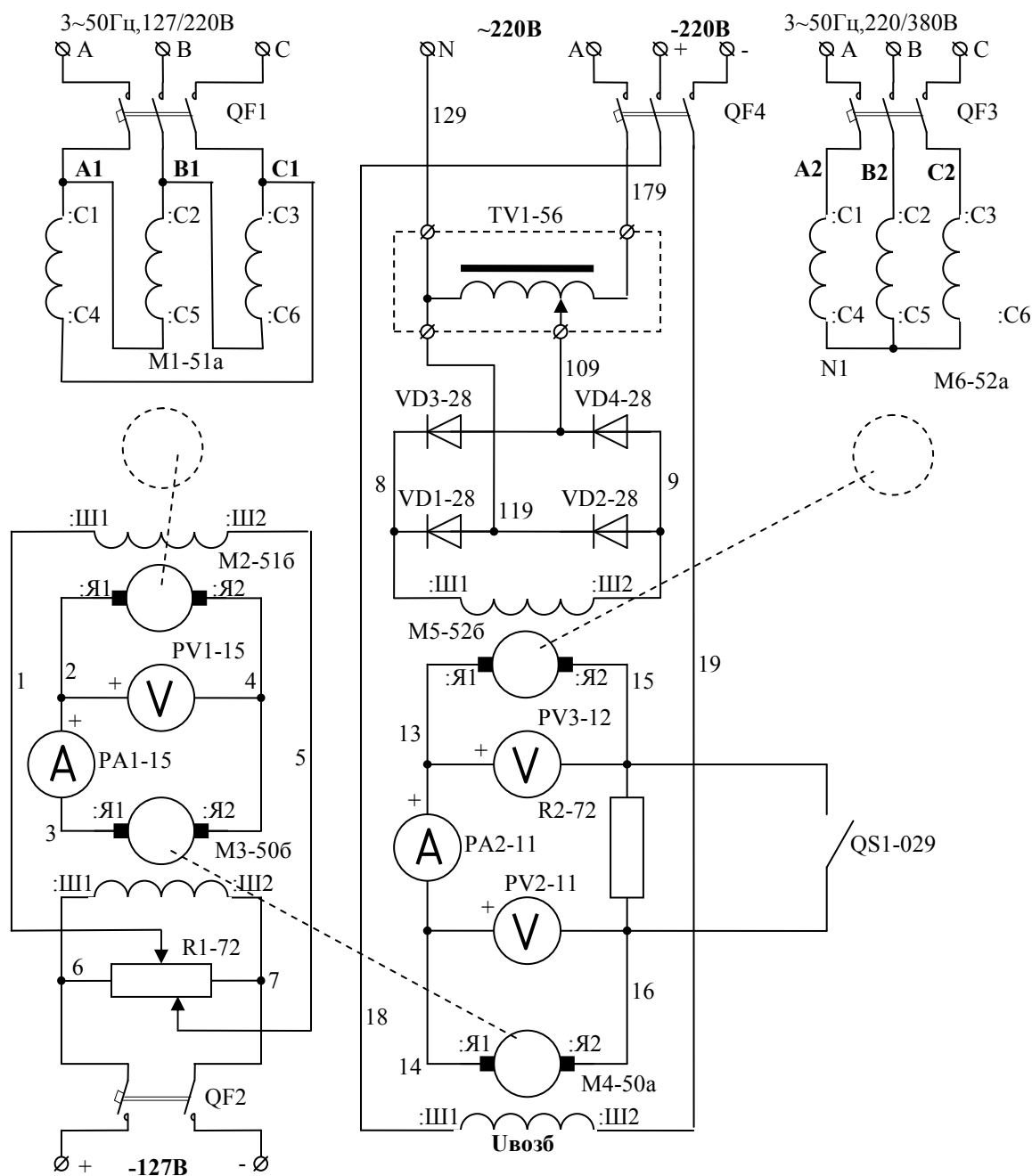
$$M = \frac{k \Phi U}{R_{я} + R_{\chi}} - \frac{(k\Phi)^2}{R_{я} + R_{\chi}} \omega \quad (1)$$

Или, выразив в явном виде частоту вращения вала электродвигателя,

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

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.



**Таблица 1**

Исполнитель	Бойко	Абдулин	Абдурахманов	Дибеев	Макаров	Мазалов	Объедков	Сорокин	Симин
Опытные данные									
$U_3=120B$			$R_2=0$			$U_{в03б}=220B$			
$I_1, A$	-17,5	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
$I_2, A$	9	7	4	1,5	1,5	5	8	11	17

$U_1, B$	-100	-93	-85	-75	-63	-51	-35	-20	-12
$U_2, B$	-120	-120	-120	-120	-120	-120	-120	-120	-120
$M_{III}, \text{дел}$	-96	-78	-52	-15	13	43	74	101	146
$n, \text{об/мин}$	1160	1130	1040	720	820	800	720	700	515
Расчётные данные									
$\omega = \pi n / 30, 1/c$									
$M = 15,8 * \sin(M_{III}/135), \text{Нм}$									
$P_B = M\omega, \text{Вт}$									
$P_{Э1} = U_1 I_1, \text{Вт}$									
$P_{Э2} = U_2 I_2, \text{Вт}$									
$P_{Э3} = U_3 I_3, \text{Вт}$									
$\eta_1 = P_B / P_{Э1}$									
$\eta_2 = P_{Э2} / P_B$									

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	Абдурахманов	Дибеев	Макаров	Мазалов	Объедков	Сорокин	Симин
Опытные данные									
$U_3 = 120B$			$R_2 = 11,4$			$U_{воб} = 220B$			
$I_1, A$	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
$I_2, A$			3,22	1	-1,5	-5	-7	-8	-8
$U_1, B$			-110	-80	-52	-24	0	12	20

$U_2, B$			-166	-130	-100	-78	-20	-30	-10
$M_{III}, \text{дел}$			-37	-10	13	41	52	89	91
$n, \text{об/мин}$			1356	1065	750	440	120	0	-70
Расчётные данные									
$\omega = \pi n / 30, 1/c$									
$M = 15,8 * \sin(M_{III} / 135), \text{Нм}$									
$P_B = M\omega, \text{Вт}$									
$P_{Э1} = U_1 I_1, \text{Вт}$									
$P_{Э2} = U_2 I_2, \text{Вт}$									
$P_{Э3} = U_3 I_3, \text{Вт}$									
$\eta_1 = P_B / P_{Э1}$									
$\eta_2 = P_{Э2} / P_B$									

*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	Дибеев	Макаров	Мазалов	Объединков	Сорокин	Симин
Опытные данные									
$U_3=180B$			$R_2=0$			$U_{взб}=220B$			
$I_1, A$	-20	-15	-6	-5	0	5	10	15	20
$I_2, A$			1,5	1	-1,5	-5	-7,5	-11,5	-16
$U_1, B$			-110	-108	-92	-81	-75	-71	-60
$U_2, B$			-180	-180	-180	-180	-180	-180	-180
$M_{ш}, \text{дел}$			-20	-15	12	47	70	100	132
$n, \text{об/мин}$			1480	1450	1330	1280	1225	1270	1190
Расчётные данные									



$P_{\Sigma 2} = U_2 I_2$ , 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. Обмотка возбуждения электродвигателя переключается на напряжение 127 В.. Выполняются действия по пунктам 3 и 2 в порядке описанном выше*

## 5.9. 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.*

### 2.5.3 Результаты и выводы:

Изучили принцип работы схемы, осуществлять запуск системы электродвигателей, производить регулирование величины напряжения и нагрузки, устанавливать и измерять параметры режимов работы, снимать и строить механические характеристики.

## 2.6 Практическое занятие №6( 2 часа).

**Тема: «Механические характеристики сериесного автоматизированного электродвигателя»**

### 2.6.1 Задание для работы:

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

### 2.6.2 Краткое описание проводимого занятия:

#### Краткие теоретические положения

Механическая характеристика электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения (шунтового) описывается уравнением

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

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.

В электродвигателе последовательного возбуждения (сериесном) магнитный поток для ненаасыщенной магнитной цепи пропорционален току

$$\Phi = c I . \quad (2)$$

Тогда

$$M = k \Phi I = kc I^2 . \quad (3)$$

Откуда

$$I = \sqrt{\frac{M}{kc}} \quad (4)$$

Подставив  $\Phi$  и  $M$  из (2) и (3) в уравнение (1) получим скоростную  $\omega = f(I)$  характеристику сериесного электродвигателя

$$\omega = \frac{U}{kc I} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{б}} + R_{\text{х}}}{(kcI)^2} kc I^2 = \frac{U}{kc I} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{б}} + R_{\text{х}}}{kc} . \quad (5)$$

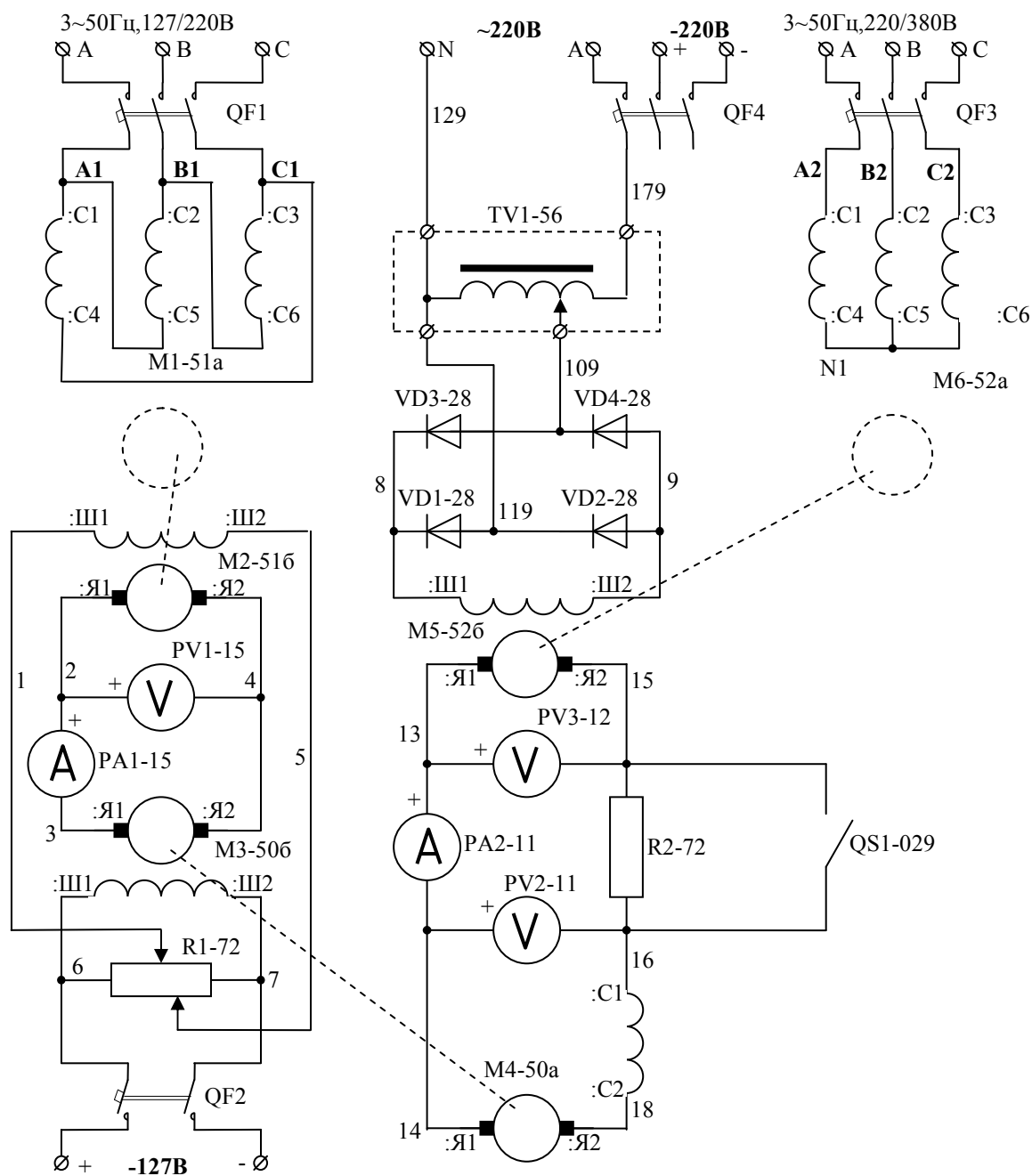
Как видим, характеристика эта гиперболическая.

Исходя из принятого допущения, что магнитный поток пропорционален току, и подставив в формулу (5) вместо тока его выражение через момент, получим уравнение механической характеристики электродвигателя с последовательным возбуждением

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kc M}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{б}} + R_{\text{х}}}{kc} . \quad (6)$$

Цель работы заключается в том, чтобы убедиться в справедливости полученного выражения.







$P_{Э1}=U_1I_1$ , Вт									
$P_{Э2}=U_2I_2$ , Вт									
$P_{Э3}=U_3I_3$ , Вт									
$\eta_1=P_B/P_{Э1}$									
$\eta_2=P_{Э2}/P_B$									

Таблица 3

Исполнитель	<i>Ким</i>	<i>Цой</i>	<i>И т. д.</i>						
Опытные данные									
$U_3=40В$					$R_2=0$				
$I_2$ , А	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	8	9
$I_1$ , А									
$U_1$ , В									
$U_2$ , В									
$M_{ш}$ , 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									
$P_{Э1}=U_1I_1$ , Вт									
$P_{Э2}=U_2I_2$ , Вт									
$P_{Э3}=U_3I_3$ , Вт									
$\eta_1=P_B/P_{Э1}$									
$\eta_2=P_{Э2}/P_B$									

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, и третья характеристики.*

### **2.6.3 Результаты и выводы:**

Изучить схемы, и построение механических характеристик.

### **2.7 Практическое занятие №7( 2 часа).**

**Тема: «Исследование механической характеристики трёхфазного асинхронного автоматизированного ЭД в режиме динамического торможения»**

#### **2.7.1 Задание для работы:**

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.

#### **2.7.2 Краткое описание проводимого занятия:**

##### **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.

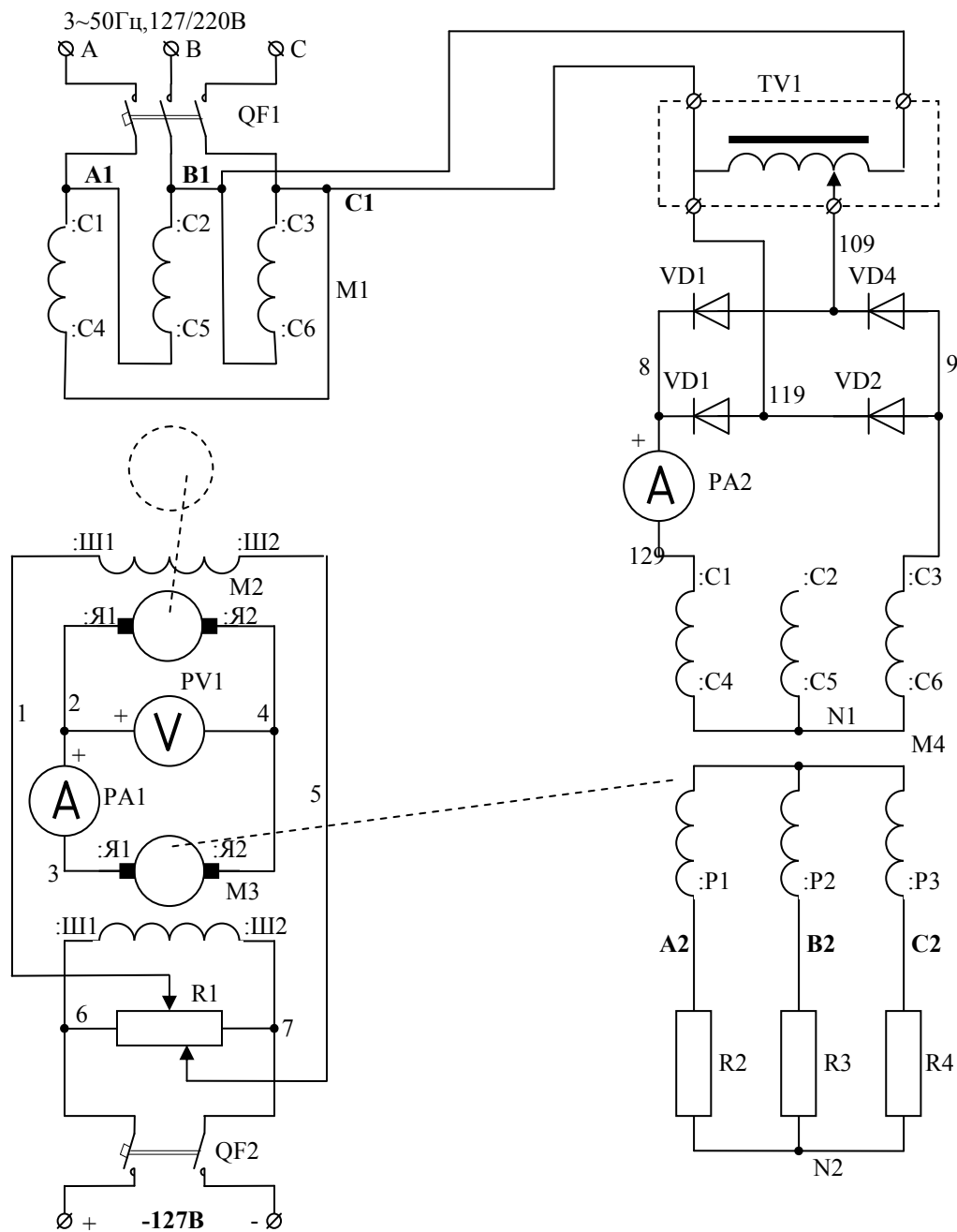


Таблица 1

№ точки	$U_1, В$	$I_1, А$	$M_{ш}, дел.$	$n, об/мин$	$M=15,8\sin(180M_{ш}/135\pi), Нм$	$\omega=\pi n/30, 1/с$	$P_B=M\omega, Вт$	$P_{\Sigma 2,3}=U_1 I_1, Вт$	$\eta_3=P_B/P_{\Sigma 2,3}$
1	-130	-12	-58	1290					

2	-115	-12	-56	1160					
3	-100	-12	-55	1150					
4	-85	-12	-55	1040					
5	-70	-10	-49	780					
6	-55	-9	-44	610					
7	-40	-8	-40	520					
8	-25	-7	-30	280					
9	25	8	30	220					
10	40	11	40	500					
11	55	12	45	700					
12	70	14	50	925					
13	85	15	60	1210					
14	100	16	62	1250					
15	115	17	73	1300					
16	130	18	77	1330					

Таблица 2

№ точки	$U_1, В$	$I_1, А$	$M_{ш}, дел.$	$n, об/мин$	$M=15,8\sin(180M_{ш}/135\pi), Нм$	$\omega=\pi n/30, 1/с$	$P_B=M\omega, Вт$	$P_{Э2,3}=U_1I_1, Вт$	$\eta_3=P_B/P_{Э2,3}$
1	-130	-6	-94	1625					
2	-90	-5,8	-88	1160					
3	-50	-5,6	-85	660					
4	-30	-5,4	-83	410					
5	-20	-6,6	-76	230					
6	-15	-8	-65	170					
7	-10	-10	-50	20					
8	-5	-6	-28	0					

9	5	4,1	18	0					
10	10	4,5	45	15					
11	15	6	59	20					
12	20	7,1	68	265					
13	30	8,2	72	460					
14	50	8,5	78	780					
15	90	8,7	90	1330					
16	130	9	95	2010					

### 2.7.3 Результаты и выводы:

Изучить схему системы электродвигателей, производить регулирование величины напряжения и нагрузки, устанавливать и измерять параметры режимов работы, снимать и строить механические характеристики.

### 2.8 Практическое занятие №8( 2 часа).

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

#### 2.8.1 Задание для работы:

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

#### 2.8.2 Краткое описание проводимого занятия:

##### 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)

$$M = \frac{2 M_K}{s / s_K + s_K / s}. \quad (2)$$

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  $M \propto U^2$ .







M <sub>ш</sub> , дел									
n, об/мин									
Расчётные данные									
$\omega = \pi n / 30$ , 1/с									
$M = 15,8 \cdot \sin(M_{ш} / 135)$ , Нм									
$P_B = M\omega$ , Вт									
$P_{Э1} = U_1 I_1$ , Вт									
$P_{Э2} = 3P_1$ , Вт									
$\cos \varphi_2 = P_{Э2} / (3 U_2 I_2)$									
$\eta_1 = P_B / P_{Э1}$									
$\eta_2 = P_{Э2} / P_B$									

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.

### 2.8.3 Результаты и выводы:

Изучили схему системы электродвигателей, производства регулирование величины напряжения и нагрузки, устанавливать и измерять параметры режимов работы, снимать и строить механические характеристики.

### 2.9 Практическое занятие №9 (2 часа).

**Тема: «Исследование пусковых свойств однофазного асинхронного автоматизированного электродвигателя»**

#### 2.9.1 Задание для работы:

Изучить зависимость пускового момента и пускового тока от величины приложенного напряжения и величины ёмкости пускового конденсатора  $M_{п}, I_{п} = f(U)$  и  $M_{п}, I_{п} = f(C_{п})$ .

#### 2.9.2 Краткое описание проводимого занятия:

##### 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.

### **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:**



	<i>1</i>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>1</b>	Сидоров	0	27	1,5А				
<b>2</b>	Козлов	60	27	1,5А				
<b>3</b>	<i>И т. д.</i>	80	27	1,5А				
<b>4</b>		100	27	1,5А				
<b>5</b>		120	27	3А				
<b>6</b>		140	27	3А				
<b>7</b>		160	27	3А				
<b>8</b>		180	27	3А				
<b>9</b>		200	27	3А				
<b>10</b>		220	27	7,5А				
<b>11</b>		220	23	7,5А				
<b>12</b>		220	19	7,5А				
<b>13</b>		220	15	7,5А				
<b>14</b>		220	11	7,5А				
<b>15</b>		220	7	7,5А				
<b>16</b>		220	3	7,5А				
<b>17</b>		220	0	7,5А				

## 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)*

### 2.9.3 Результаты и выводы:

Научиться рассчитывать параметры режимов работы, убедиться в справедливости теоретических положений относительно влияния напряжения и ёмкости пусковых конденсаторов на величину пускового момента.

## 2.10 Практическое занятие №10 (2 часа).

**Тема: «Исследование автоматизированного электропривода вакуумного насоса»**

### 2.10.1 Задание для работы:

Изучение зависимости мощности и коэффициента мощности от величины вакуума, а также зависимость коэффициента мощности от коэффициента загрузки.

### 2.10.2 Краткое описание проводимого занятия:

Вакуумный насос предназначен для обеспечения вакуума, необходимого для работы доильных аппаратов и молокопроводов. Приводится он во вращение асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором. В зависимости от развиваемого давления во всасывающем трубопроводе изменяется мощность, необходимая для вращения насоса, а, следовательно, и мощность на валу и на зажимах электродвигателя. Таким образом, коэффициент загрузки электродвигателя также изменяется, а реактивная 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

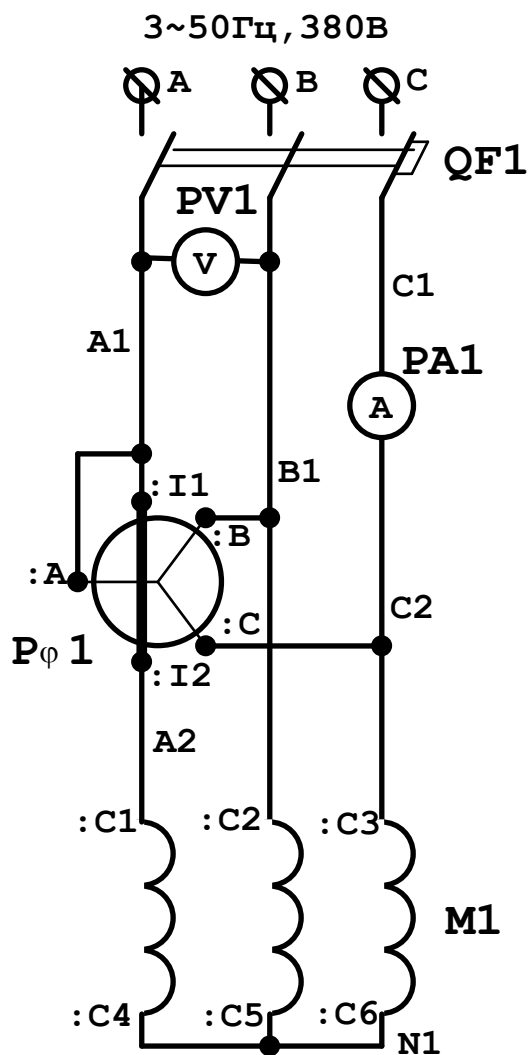
$$\alpha = a / b_{\text{н}} = 0,6, \quad (3)$$

получим:

$$a = \frac{3}{8} P_{\text{пн}}; \quad b = P_{\text{пн}} / 1,6. \quad (4)$$

Подсчитав, таким образом,  $a$  и  $b$ , можно найти потери мощности при любой нагрузке по формуле

$$P_{\text{пн}} = a + b_{\text{н}} \frac{P_2^2}{P_{2\text{н}}^2} \quad (5)$$



Исполнитель	p, атм	U, В	I, А	Cosφ	S <sub>1</sub> , ВА	P <sub>1</sub> , Вт	ΔP, Вт	P <sub>2</sub> , Вт	K <sub>з</sub>
Сидоров	0,1								
Козлов	0,2								
И т. д.	0,3								
	0,4								
	0,5								
	0,6								
	0,7								
	0,8								
	0,9								

а). Устанавливаем заданное давление с помощью дросселя на всасывающем патрубке;

б). Измеряем и заносим в таблицу на доске ток, напряжение, и коэффициент мощности;

в). Рассчитываем и заносим в таблицу на доске полную и активную мощность на зажимах, потери мощности, мощность на валу и коэффициент загрузки;

*Заготавливаем оси координат для первого и второго графиков (ведущий на доске все остальные студенты в тетрадях). Наносим каждую точку зависимости на поле графика (кроме того, каждый из ответственных за точку наносит её на поле*



графика, расположенного на доске).Проводим на графиках аппроксимирующие линии (ведущий это делает на доске, а все остальные в тетрадах)

### 2.10.3 Результаты и выводы:

Изучение регулирования величины вакуума насоса, устанавливать и измерять параметры режимов работы.

### 2.11 Практическое занятие №11( 2 часа).

**Тема: «Исследование асинхронного автоматизированного электропривода генератора постоянного тока»**

### 2.11.1 Задание для работы:

Изучение зависимости коэффициента мощности и коэффициента полезного действия асинхронного электродвигателя от коэффициента загрузки  $\cos \varphi, \eta = f(K_3)$ , а также построить механическую характеристику  $M = f(\omega)$ .

### 2.11.2 Краткое описание проводимого занятия:

- 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.

#### 4.4 Записываем действия по снятию и расчёту параметров характеристик

- Устанавливаем заданную величину коэффициента мощности;
- Измеряем и заносим в таблицу на доске ток, напряжение, и число оборотов вала электродвигателя в минуту;
- Рассчитываем и заносим в таблицу на доске частоту вращения, полную и активную мощности на зажимах;
- По уравнениям (1)...(4) определим полные  $P_{\text{пн}}$ , постоянные  $a$  и переменные при номинальной нагрузке  $b_n$  потери;
- По уравнению (5) определим потери в установленном режиме  $P_{\text{п}}$ . Однако поскольку мощность на валу в установленном режиме нам не известна, заменим её величиной  $P_1 - P_{\text{п}}$  и получим следующее выражение

$$P_{\Pi} = a + b_H \frac{(P_1 - P_{\Pi})^2}{P_{\gamma_H}^2}, \quad (6)$$

В данном выражении неизвестна только величина  $P_n$ . После преобразований, получим квадратное уравнение вида

$$A P_{\perp}^2 + B P_{\perp} + C = 0, \quad (7)$$

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  $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

## Данные опытов и расчётов

### Таблица 2

Исполнитель	Жуков	Козлов	И т. д.					
Опытные данные								

Cosφ	0,5	0,55	0,6	0,65	0,75	0,8	0,85	0,9
$U_{I,B}$								
$I_{I,A}$								
n, об/мин								
Расчётные данные								
$\omega$ , 1/с								
$S_1$ , кВА								
$P_1$ , кВт								
B								
C								
$P_n$ , кВт								
$P_2$ , кВт								
M, Нм								
$K_3$								
$\eta$								

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.

### 2.11.3 Результаты и выводы:

Изучение схемы, принцип регулирования величины напряжения и нагрузки генератора постоянного тока, устанавливать, измерять и рассчитывать параметры режимов работы.

### 2.12 Практическое занятие №12( 2 часа).

**Тема: «Схема управления автоматизированного ЭД с переключением со звезды на треугольник»**

#### 2.12.1 Задание для работы:

Изучение схему управления электродвигателем.

#### 2.12.2 Краткое описание проводимого занятия:

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.

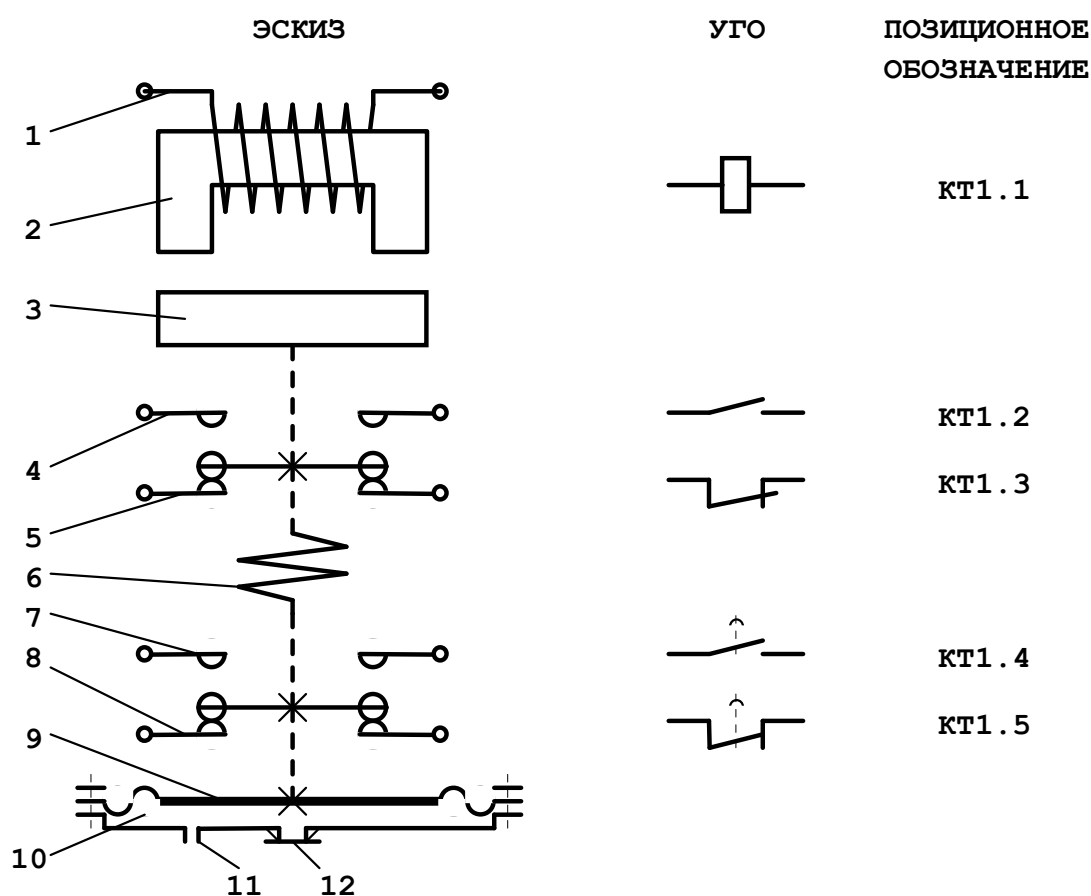
Во-вторых, обратное переключение электродвигателя с треугольника на звезду производится с целью повышения коэффициента мощности при малой (не превышающей 30%) степени загрузки электродвигателя. В этом случае, хотя момент электродвигателя и снижается в три раза, но его оказывается достаточно для преодоления 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 KM1-KM2, 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.



## 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 KM2.2 магнитного пускателя KM2 и замыкается контакт SB1.2. Начинает протекать ток по цепи: **фаза С сети – катушка KM1.2, размыкающий контакт с выдержкой времени при размыкании KT1.5 реле времени KT1 – размыкающий контакт KM2.4 магнитного пускателя KM2 – размыкающий контакт SB2.1 кнопки SB2 – замыкающий контакт SB1.2 кнопки SB1 – размыкающий контакт кнопки SB3 – фаза Асети**. Магнитный пускатель KM1 срабатывает. Замыкаются его силовые контакты KM1.1, запитывающие обмотки электродвигателя M1 по схеме «звезда», размыкается контакт KM1.4, предотвращая включение катушки KM2.2, и замыкается контакт KM1.3, резервируя цепь питания катушки KM1.2 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 KM2.2, и разомкнутся контакты SB2.1. Катушка KM1.2 потеряет питание, магнитный пускатель KM1 разомкнёт свои силовые контакты KM1.1 (электродвигатель на мгновение обесточится) разомкнёт блокировочные контакты KM1.3, разблокировав контакты SB1.2, и замкнёт контакты KM1.4. При этом запитается катушка KM2.2 магнитного пускателя KM2 по цепи: **фазаС – катушка KM2.2 – контакты KM1.4 магнитного пускателя KM1 – контакты SB1.1 – контакты SB2.2 нажатой кнопки SB2 – кнопка SB3 – фазаА**. Магнитный пускатель KM2 сработает: замкнёт свои силовые контакты KM2.1, переключив обмотки ещё вращающегося по инерции электродвигателя M1 в треугольник; заблокирует контактами KM2.3 замыкающие контакты SB2.2 на случай отпускания кнопки SB2; разомкнёт контакты KM2.4, предотвращая возможность одновременного срабатывания обоих пускателей.

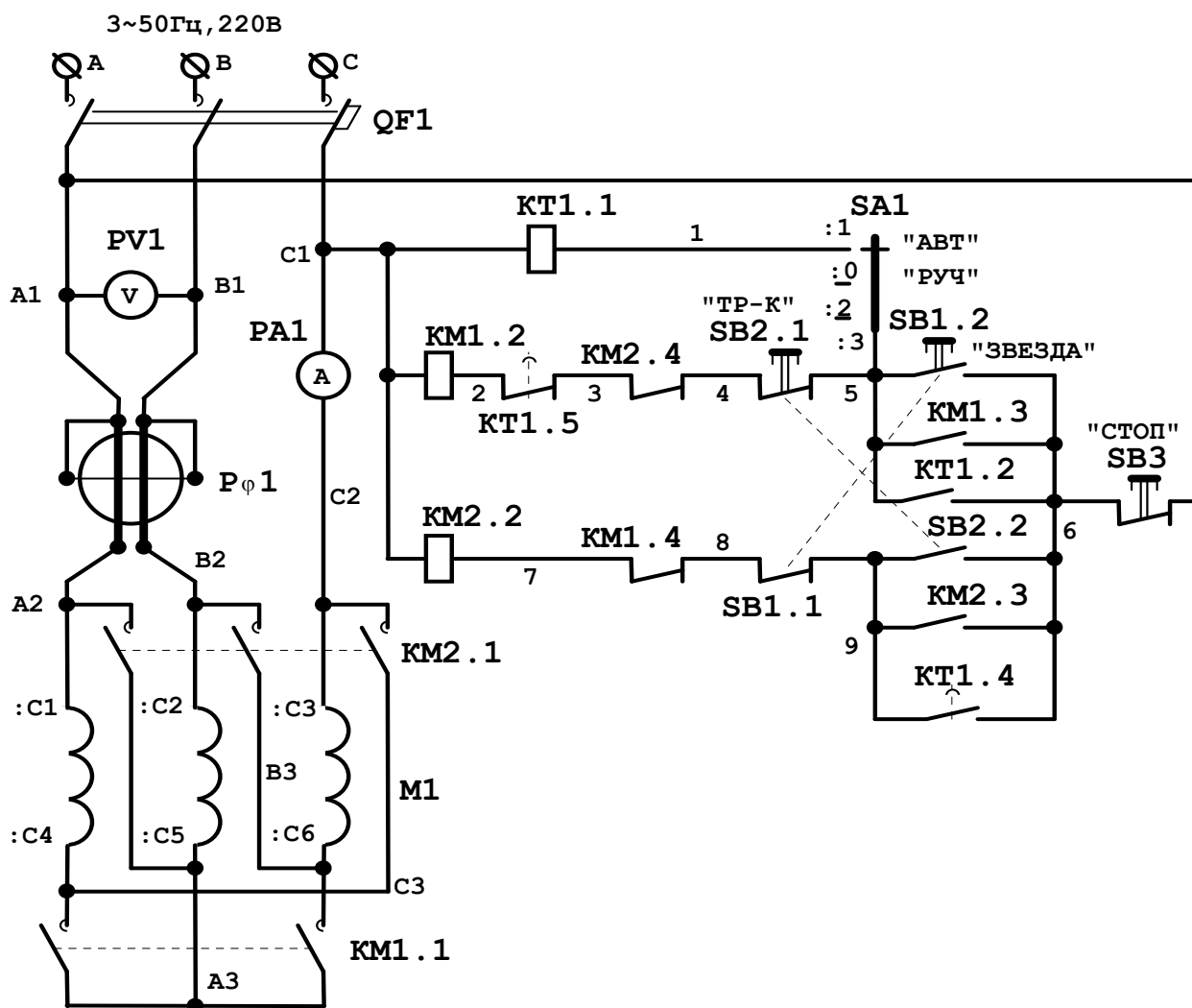
Отключение электродвигателя, независимо от того работает он в «звезду» или в «треугольник» осуществляется путём нажатия на кнопку SB3. При размыкании контакта этой кнопки теряет питание или катушка KM1.2, или катушка KM2.2 – электродвигатель отключается. При этом отпускание кнопки SB3 не приводит к повторному включению пускателей поскольку успевают разомкнуться блокировочные контакты KM1.3 или KM2.3 (в зависимости от того какой пускатель был включён)

Если же переключатель SA1 находится в положении «АВТОМАТИЧЕСКИЙ», подготовлена цепь питания катушки KT1.1 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 KM1 запитывается катушка KT1.1 реле времени KT1 по цепи: **фазаС – катушка KT1.1 реле времени KT1 – контакт 1-3 переключателя SA1 – контакт кнопки SB3 – фазаА сети**. Реле KT1 сработает и своими замыкающими контактами KT1.2 дополнительно заблокирует замыкающий контакт SB1.2 с тем, чтобы катушка реле не потеряла питание ни при отпускании кнопки SB1, ни при отключении магнитного пускателя KM1. Через несколько секунд после того как электродвигатель развернется, разомкнётся контакт с выдержкой времени при размыкании KT1.5. Катушка KM1.2 магнитного пускателя KM1 потеряет питание.

Электродвигатель отключится, но одновременно с этим через замкнувшиеся теперь контакты KM1.4 будет подано напряжение на обмотку KM2.2 магнитного пускателя KM2 по цепи: **фазаС – катушка KM2.2 – контакты KM1.4 магнитного пускателя KM1 – контакты SB1.1 – контакты KT1.4 реле времени KT1 – кнопка SB3 – фазаА**. Магнитный пускатель KM2 сработает: замкнёт свои силовые контакты KM2.1, переключив обмотки ещё вращающегося по инерции электродвигателя M1 в треугольник; заблокирует контактами KM2.3 замыкающие контакты SB2.2, разомкнёт контакты KM2.4, 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.



### 2.12.3 Результаты и выводы:

Изучить схему управления электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия пневматического реле времени, убедиться в эффективности функционирования схемы.

### 2.13 Практическое занятие №13( 2 часа).

**Тема: «Изучение схемы управления асинхронным автоматизированным электродвигателем из двух мест с защитой от обрыва фазы»**

#### 2.13.1 Задание для работы:

Изучение схемы управления электродвигателем.

#### 2.13.2 Краткое описание проводимого занятия:

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

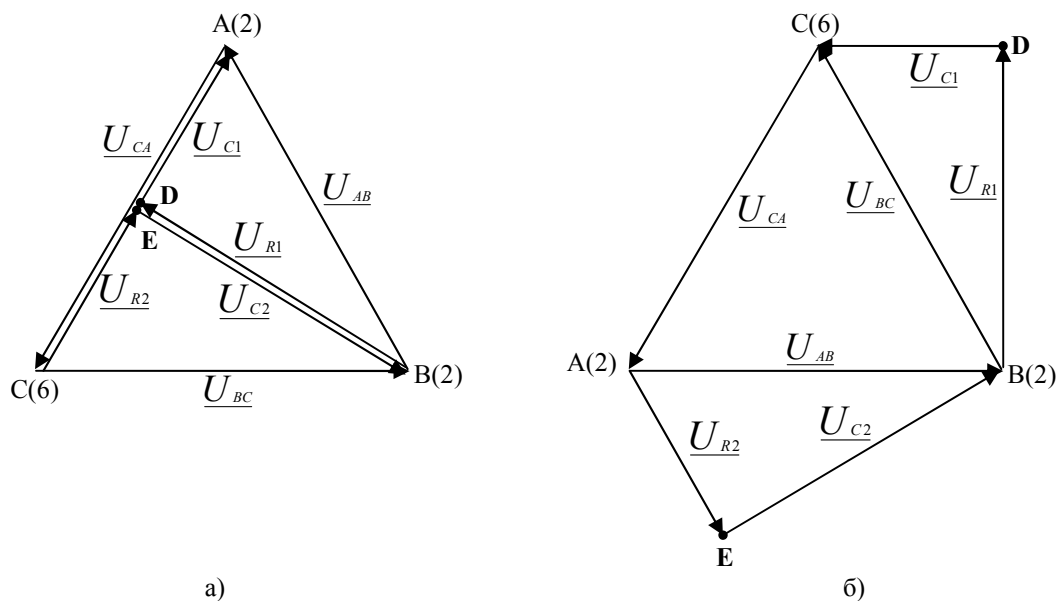
машинами, реализующими технологический процесс, или непосредственно у отдельной рабочей машины, осуществляя её техническое обслуживание, наладку и регулировку. Поскольку оператор не может контролировать состояние электроприводов всех рабочих машин одновременно и в течение всего рабочего периода, каждый 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, C1 и R2, C2), соединённых последовательно и подключённых 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** 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.

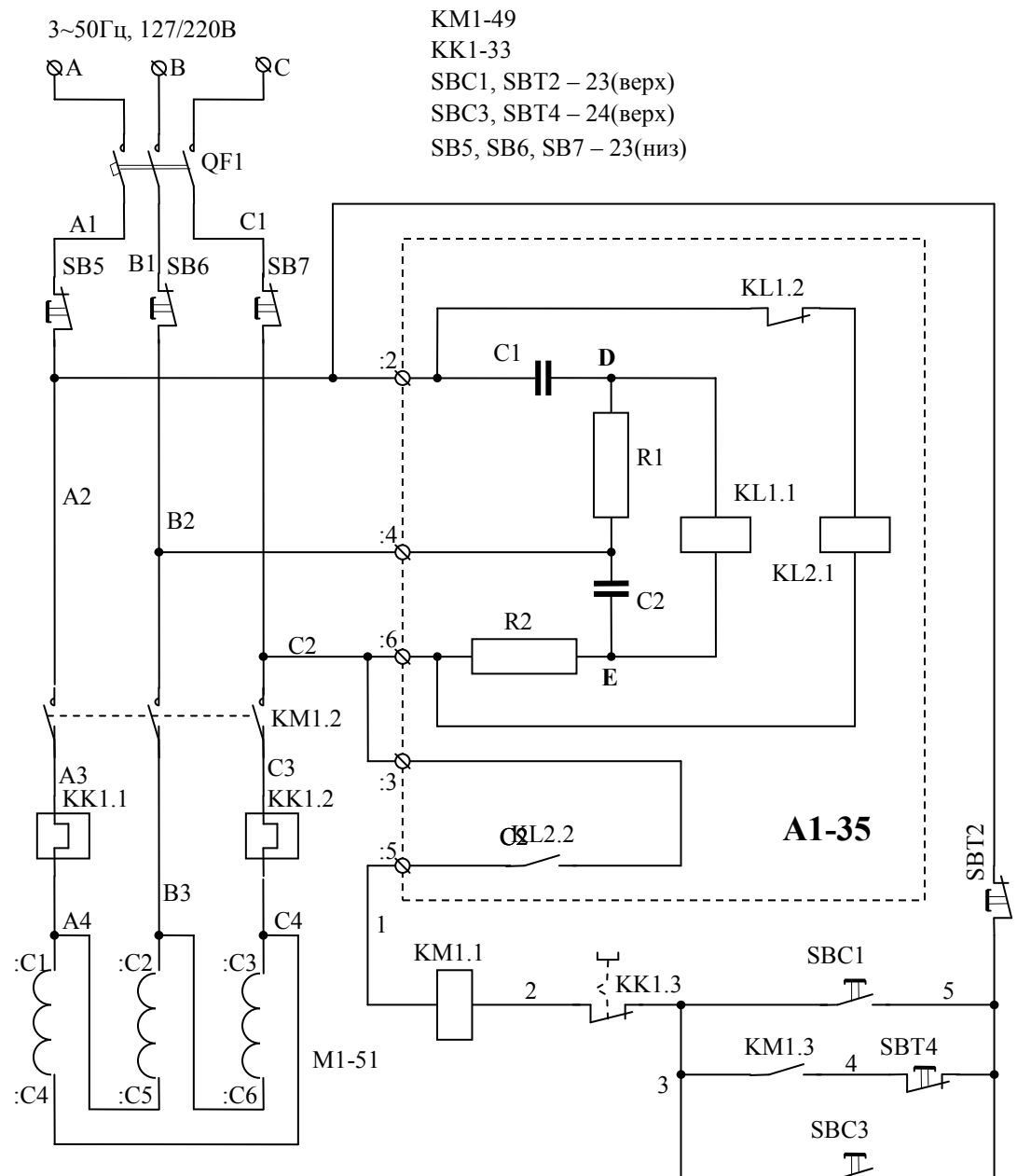
Если в сети произойдет обрыв одной из фаз или установится обратный порядок следования фаз (А,С,В), то между точками **Д** и **Е** цепи, а следовательно и на катушке KL1.1 появится напряжение (рис.1б). Реле KL1 сработает, разомкнет свой контакт KL1.2 в цепи катушки KL2.1. Реле KL2 вернется в исходное 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, включённых 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 КМ1.1, катушка обесточивается и магнитный пускатель своими силовыми контактами КМ1.2 отключает электродвигатель.

Пуск электродвигателя оператором осуществляется кнопкой SBC1. При нажатии кнопки ее контакт замыкается, замыкая тем самым цепь: фаза С – KL2.2 – КМ 1.1 – КК1.3 – SBC1 – SBT2 – N. Пускатель КМ1 срабатывает, замыкаются его силовые контакты КМ1.2, через которые запитываются обмотки электродвигателя М1. Одновременно замыкается блокировочный контакт КМ1.3 магнитного пускателя, обеспечивая путь тока в обход контакта SBC1. Поэтому при отпускании кнопки SBC1 катушка КМ1.1 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 КМ1.1. Магнитный пускатель КМ1 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.



### 2.13.3 Результаты и выводы:

Изучить схему управления электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия реле обрыва фазы типа Е511, убедиться в эффективности функционирования схемы.

### 2.14 Практическое занятие №14 (2 часа).

**Тема: «Изучение схемы реверсивного управления асинхронным автоматизированным электродвигателем с защитой от заклинивания ротора»**

#### 2.14.1 Задание для работы:

Изучение схемы управления электродвигателем

#### 2.14.2 Краткое описание проводимого занятия:



### **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.

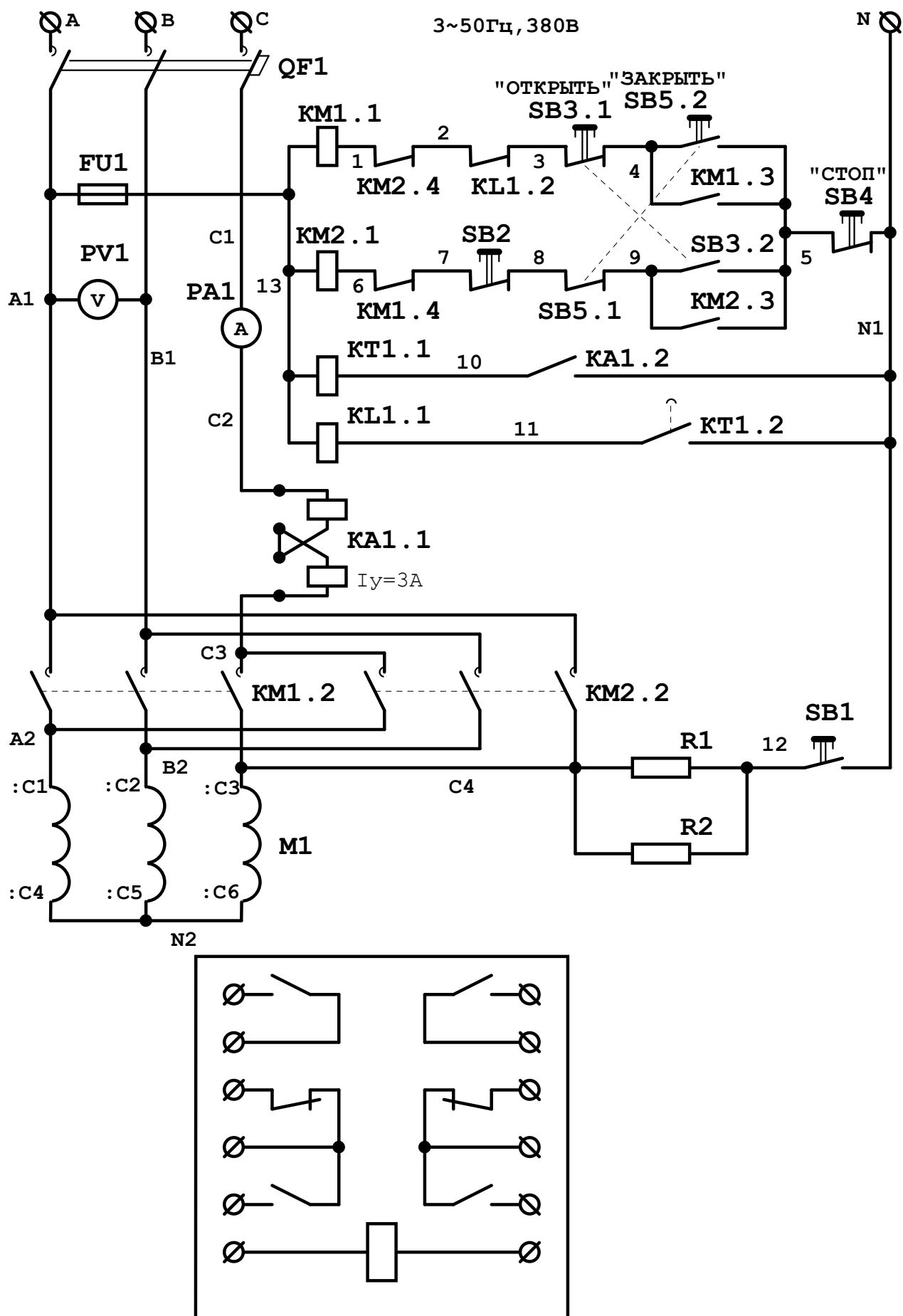


Рис.2: Монтажная схема промежуточного реле.

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 отпуске 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 M1 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 KA1, замыкая контакт KA1.2 в цепи питания катушки KT1.1 реле времени KT1. Реле времени начинает отсчитывать время задержки срабатывания контакта с выдержкой времени при замыкании KT1.2, которое установлено несколько больше, чем время пуска электродвигателя. Поэтому к концу пуска реле тока размыкает свой контакт KA1.2, обесточивает катушку KT1.1 реле времени и замыкания контакта KT1.2 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 KA1. Замкнёт свой контакт KA1.2 в цепи питания катушки KT1.1 реле времени KT1. По истечении некоторого времени замкнётся контакт KT1.2 с выдержкой времени на замыкание и включит катушку KL1.1 промежуточного реле KL1. Промежуточное реле, разомкнув свой размыкающий контакт KL1.2 в цепи питания катушки KM1.1, отключит электродвигатель. При этом реле тока разомкнёт свой контакт, и последовательно отключатся катушки реле времени и промежуточного реле. Контакт KL1.2 замкнётся, но включение электродвигателя не произойдёт, так как успели разомкнуться контакты KM1.3.

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

#### **2.14.3 Результаты и выводы:**

Изучить схему реверсивного управления электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия реле тока, научиться производить сборку схемы, убедиться в эффективности функционирования схемы.

#### **2.15 Практическое занятие №15( 2 часа).**

**Тема: «Схема реверсивного управления АД с торможением противовключением»**

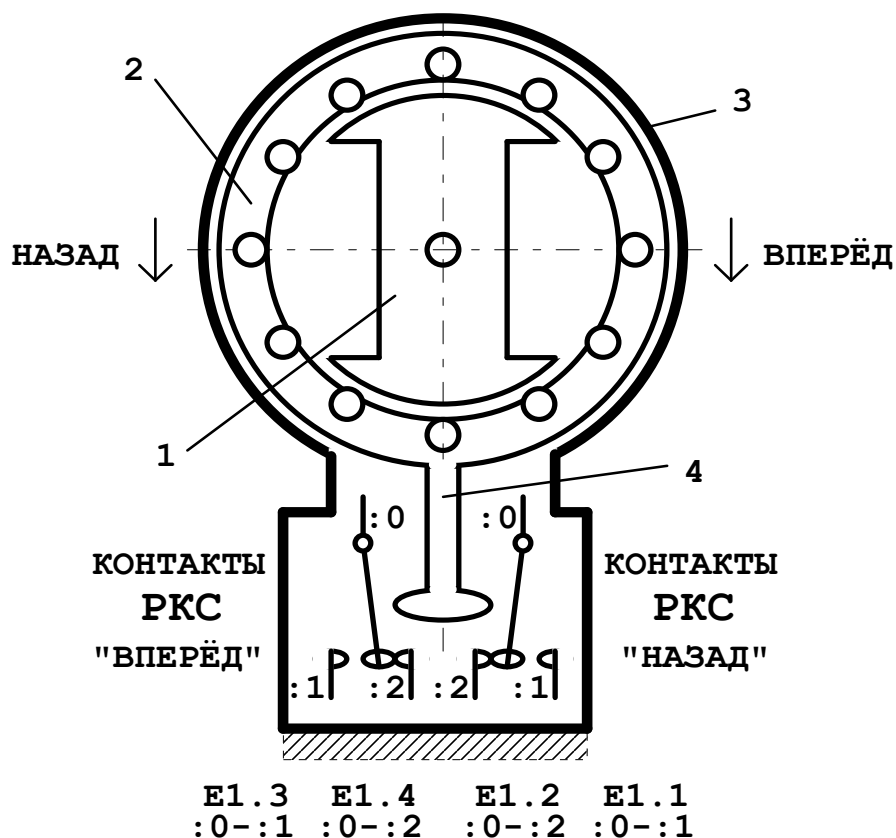
##### **2.15.1 Задание для работы:**

Изучить схему управления электродвигателем.

##### **2.15.2 Краткое описание проводимого занятия:**

##### **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 удастся, 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.

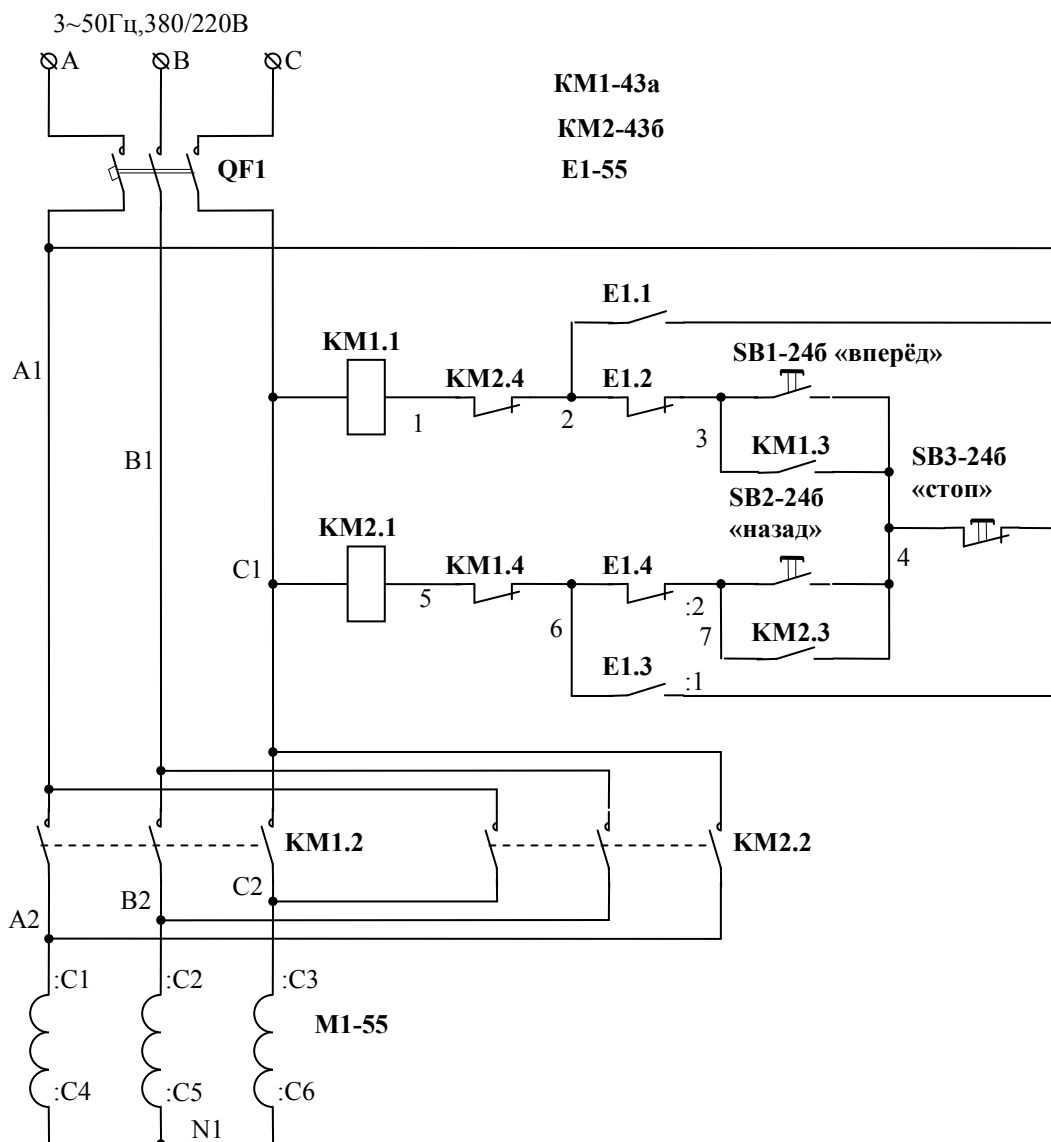
Схема управления электродвигателя с применением РКС приведена на плакате и рис. 2.

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».



### 2.15.3 Результаты и выводы:

Изучить схему реверсивного управления 3-х фазным асинхронным электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия реле контроля скорости, убедиться в эффективности функционирования схемы.

### 2.16 Практическое занятие №16( 2 часа).

**Тема: «Изучение схемы динамического торможения асинхронного автоматизированного электродвигателя»**

#### 2.16.1 Задание для работы:

Изучить схему управления электродвигателем.

#### 2.16.2 Краткое описание проводимого занятия:

##### 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.

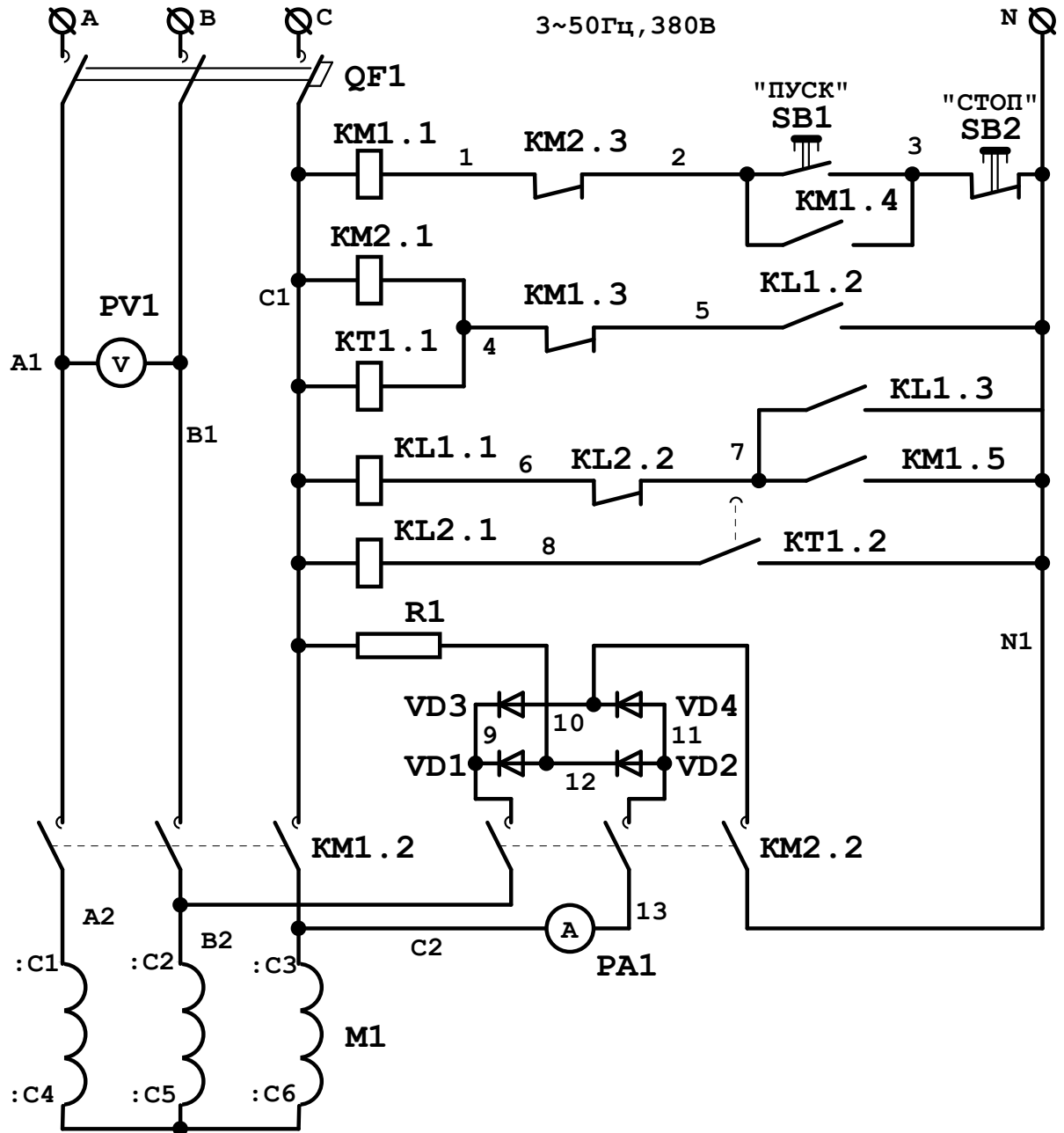
Нажимаем кнопку SB1. Получает питание катушка KM1.1 магнитного пускателя KM1. Пускатель KM1 срабатывает, и своими силовыми контактами подаёт напряжение на обмотки электродвигателя. Одновременно размыкает контакты KM1.3, предотвращая случайное включение магнитного пускателя KM2, контактами KM1.4 блокирует 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 KT1 отсчитывает время уставки, которое принято несколько больше времени остановки электродвигателя. После остановки электродвигателя и последующего замыкания контакта KT1.2 с выдержкой времени при замыкании, получает питание катушка KL2.1, срабатывает промежуточное реле KL2 и обесточивает контактами KL2.2 катушку KL1.1 промежуточного реле KL1. Последнее в свою очередь, размыкая контакты KL1.2, обесточивает катушки KM2.1 и KT1.1. Магнитный пускатель снимает постоянное напряжение с обмоток электродвигателя, а реле времени размыкает контакт KT1.2, обесточивая катушку KL2.1 реле промежуточного KL2. Реле KL2 замыкает свой контакт KL2.2 в цепи обмотки KL1.1, но срабатывание реле KL1 не происходит, так как

разомкнулись контакты KL1.3. Таким образом, схема пришла в исходное состояние, в котором тока ни в одной из цепей нет.



### 2.16.3 Результаты и выводы:

Изучить схему управления электродвигателем с возможностью динамического торможения, устройство и принцип действия реле времени, убедиться в эффективности функционирования схемы.

### **2.17 Практическое занятие №17( 2 часа).**

**Тема: «Изучение схемы управления однофазным АД»**

### 2.17.1 Задание для работы:

Изучить схему управления однофазным электродвигателем с помощью реле тока и схему управления электродвигателем с помощью реле времени.



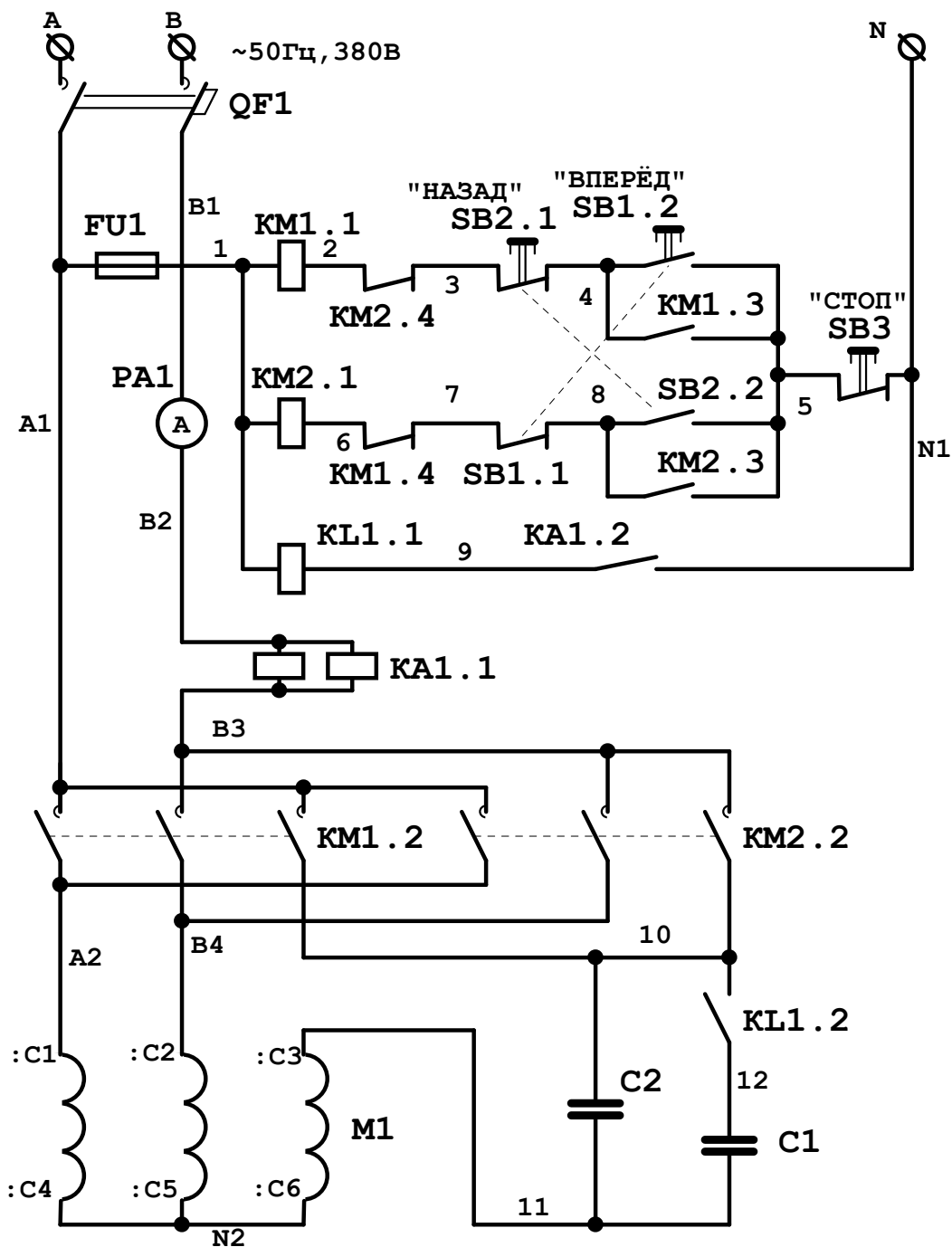
## **2.17.2 Краткое описание проводимого занятия:**

### **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.

### **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». Контактными 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 КА1 и замыкает свой контакт КА1.2 в цепи питания катушки КЛ1.1 промежуточного реле КЛ1. Сработав, промежуточное реле контактом КЛ1.2 к рабочей ёмкости С2 подключает пусковую ёмкость С1. Электродвигатель М1 начнёт развивать обороты. Пусковой ток при этом будет уменьшаться и, когда к концу разгона он станет меньше тока удержания реле КА1, контакт реле разомкнётся, обесточив катушку КЛ1.1 промежуточного реле КЛ1. В свою очередь промежуточное реле контактом КЛ1.2 отключит пусковую ёмкость С1. 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.

## **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.

