

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

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ  
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.В.07 Современный автоматизированный электропривод**

**Направление подготовки (специальность) 35.04.06 – Агроинженерия**

**Профиль образовательной программы «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве»**

**Форма обучения заочная**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Конспект лекций</b>	3
<b>1.1 Лекция № 1 - Электроприводы механизмов с различного типа нагрузкой</b>	3
<b>1.2 Лекция № 2 - Промышленная реализация и номенклатура комплектных электроприводов</b>	19
<b>1.3 Лекция № 3 - Конструирование, контроль и диагностика электроприводов</b>	27
<b>1.4 Лекция № 4 - Применение современных микропроцессорных преобразователей в частотно-регулируемых электроприводах</b>	34
<b>2. Методические указания по выполнению лабораторных работ</b>	38
<b>2.1 Лабораторная работа № ЛР-1 - Исследование механической характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя в режиме динамического торможения</b>	38
<b>2.2 Лабораторная работа № ЛР-2 - Схема реверсивного управления АД с торможением противовключением</b>	42
<b>2.3 Лабораторная работа № ЛР-3 - Изучение схемы управления асинхронным электродвигателем из двух мест с защитой от обрыва фазы</b>	44
<b>2.4 Лабораторная работа № ЛР-4 - Изучение схемы реверсивного управления асинхронным электродвигателем с защитой от заклинивания ротора</b>	46

# 1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## 1.1 Лекция №1 (2 часа).

Тема: «Электроприводы механизмов с различного типа нагрузкой»

### 1.1.1 Вопросы лекции

1. Электропривод механизмов непрерывного действия с постоянной нагрузкой и скоростью вращения. Нагрузочные диаграммы особенности режимов работы. Электропривод механизмов непрерывного действия с постоянной нагрузкой и переменной скоростью вращения.

2. Электропривод механизмов непрерывного действия с переменной во времени нагрузкой и регулируемой скоростью вращения. Оптимальные системы регулирования.

### 1.1.2 Краткое содержание вопросов

1. Электропривод механизмов непрерывного действия с постоянной нагрузкой и скоростью вращения. Нагрузочные диаграммы особенности режимов работы. Электропривод механизмов непрерывного действия с постоянной нагрузкой и переменной скоростью вращения.

Любое производственное устройство или механизм с приводом рабочих органов от электродвигателя (рис. 1.1) состоит:

- из рабочей машины;
- электродвигателя;
- передаточного механизма или трансмиссии;
- устройства управления;
- устройства преобразования параметров напряжения, подаваемого на зажимы электродвигателя.

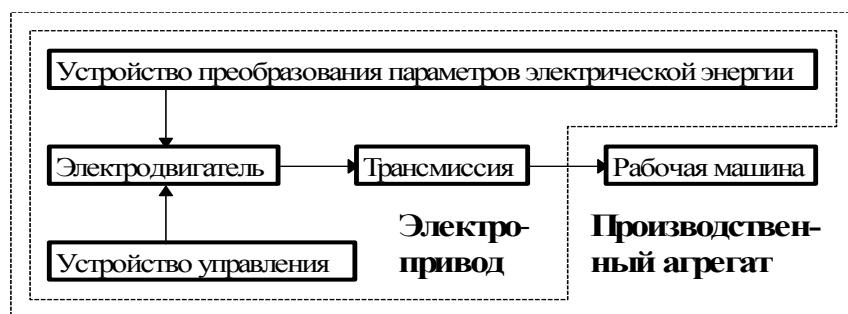


Рис. 1: Структурная схема электрифицированного производственного агрегата

Электрическая энергия из питающей электрической сети поступает на зажимы электродвигателя в общем случае через *преобразователь*, с помощью которого параметры подводимой энергии (напряжение, частота) приводятся в соответствие с теми параметрами, на которые рассчитан электродвигатель. Электродвигатель преобразует электрическую энергию в необходимую для действия рабочей машины механическую энергию. Последняя с вала электродвигателя поступает на приводной вал машины через *трансмиссию*, в которую могут входить муфты, валы, ремни, шестерни и другие элементы трансмиссии. Благодаря этому рабочая машина осуществляет технологический процесс, т. е. целенаправленно воздействует своими рабочими органами на перерабатываемый продукт. Управление технологическим процессом осуществляется *устройством управления*, воздействующим на поток электрической энергии от сети к электродвигателю. В простейшем

случае воздействие осуществляется с помощью силовых контактов контакторов или магнитных пускателей.

Определение электрического привода как технического устройства дано в ГОСТ 16593-79 «Электроприводы. Термины и определения». Электрическим приводом называется электромеханическое устройство, предназначенное для приведения в движение рабочих органов машин и управления их технологическими процессами, состоящее из передаточного устройства, электродвигательного устройства, преобразовательного устройства и управляющего устройства.

Мощность, развиваемая рабочими органами во всех случаях, несмотря на их многообразие, характеризуется произведением силы и скорости воздействия рабочих органов на перерабатываемый продукт

$$P_{PO} = F_{PO} v_{PO} \quad (1.1)$$

или, если рабочий орган вращающийся, произведением вращающего момента, приложенному к нему, и частоты вращения

$$P_{PO} = M_{PO} \omega_{PO} \quad (1.2)$$

Иногда она равна, а чаще всего больше полезной мощности, необходимой для требуемого по технологическим условиям изменения внутренней энергии перерабатываемого или перемещаемого продукта,

$$P_{n} = P_{PO} \eta_{PO}, \quad (1.3)$$

Мощность на приводном валу рабочей машины превосходит мощность рабочего органа на величину потерь мощности  $\Delta P_M$  внутри машины

$$P_M = M_{CM} \omega_M = P_{PO} + \Delta P_M = P_{PO} / \eta_M = P_n / \eta_{PO} \eta_M. \quad (1.4)$$

Аналогично, мощность на валу электродвигателя

$$P_2 = M_{CD} \omega_D = P_M + \Delta P_{TP} = P_M / \eta_{TP} = P_n / \eta_{PO} \eta_M \eta_{TP} \quad (1.5)$$

а мощность на зажимах

$$P_1 = mUICos\varphi = P_2 + \Delta P_D = P_2 / \eta_D = P_n / \eta_{PO} \eta_M \eta_{TP} \eta_D, \quad (1.6)$$

где  $\eta_{PO}$ ,  $\eta_M$ ,  $\eta_{TP}$  и  $\eta_D$  → соответственно коэффициент полезного действия рабочего органа, передаточной части машины, трансмиссии и электродвигателя;

$\Delta P_M$ ,  $\Delta P_{TP}$  и  $\Delta P_D$  → потери мощности внутри машины, в трансмиссии и в электродвигателе;

$M_{CM}$  и  $M_{CD}$  → моменты сопротивления рабочей машины на приводном валу машины и на валу электродвигателя;

$m$ ,  $U$ ,  $I$  и  $Cos\varphi$  → число фаз, напряжение, ток и коэффициент мощности электродвигателя.

Одной из самых ранних вех в зарождении электропривода следует считать осуществление в 1821 году Фарадеем вращения электромагнита вокруг прямолинейного проводника с током, что по существу явилось созданием прообраза электродвигателя.

Уже вскоре после этого в 1835 году русский академик Якоби построил первый электродвигатель постоянного тока и применил его для привода гребных колёс лодки, которая при испытаниях перемещалась по Неве со скоростью 2,5 км/час.

Однако поистине революционное значение в становлении электропривода явилось изобретение русским инженером Доливо-Добровольским в 1891 году бесколлекторного асинхронного двигателя и создание для него системы переменного трёхфазного тока. Вследствие своей простоты и вытекающей из этого высокой надёжности трёхфазного асинхронного двигателя он получил преимущественное распространение для привода машин как в промышленности, так и в сельском хозяйстве. Именно с момента создания

асинхронного электродвигателя начался интенсивный перевод технологических машин на электропривод, и его постоянное совершенствование. В процессе повышения технического уровня электропривода чётко просматривается ряд этапов, характеризующих степень его совершенства.

На первом этапе, когда электрический привод пришёл на смену паровому приводу, чаще всего путём простой замены паровой машины электрическим двигателем, преимущественное распространение получил *общетрансмиссионный* электропривод. При этом один электрический двигатель приводил в движение все рабочие машины предприятия или группу рабочих машин, а распределение механической энергии осуществлялось с помощью различного рода механических трансмиссий, проходящих по этажам и цехам предприятия.

Трансмиссионный электропривод из-за громоздкости и неудобств, связанных с размещением машин, был сравнительно быстро вытеснен *одиночным* электроприводом отдельных рабочих машин, при котором для каждой рабочей машины устанавливался свой электродвигатель. В связи с этим исчезали внешние цеховые трансмиссии, однако оставались трансмиссии внутри машин от приводного вала до рабочих органов. В настоящее время он широко используется в сельском хозяйстве. Одиночный электропривод совершенствуется в направлении упрощения трансмиссии и конструктивного сближения с рабочей машиной, преобразуясь из простого одиночного в индивидуальный одиночный электропривод.

Если в трансмиссионном электроприводе один электродвигатель обслуживает группу машин, то в одиночном - группу рабочих органов машины. Это общее свойство позволяет объединить их под одним общим названием - *групповой электропривод*. *Групповым электроприводом* называется электропривод, при котором один электродвигатель приводит в движение несколько рабочих машин или несколько рабочих органов одной машины. Главным недостатком группового электропривода является невозможность управления технологическим процессом с помощью системы управления электроприводом. Для пуска в ход, останова и регулирования частоты вращения отдельных машин и рабочих органов требуются специальные механические устройства - управляемые муфты, коробки передач, фрикционны и т. п..

Рост единичной мощности технологических установок, необходимость автоматизации рабочих процессов машин и технологических линий, стремление к упрощению кинематики машин привели к замене группового электропривода *индивидуальным*. *Индивидуальным электроприводом* называется электропривод, при котором каждый рабочий орган машины приводится в движение отдельным электрическим двигателем. В зависимости от наличия трансмиссии между электродвигателем и рабочим органом индивидуальный электропривод подразделяется на *простой индивидуальный* и более совершенный *особо индивидуальный*.

В соответствии с ГОСТ - 16593 ЭП классифицируются по следующим характеристикам:

По количеству и связи исполнительных; рабочих органов.

1. Индивидуальный, в котором рабочий исполнительный орган приводится одним самостоятельным двигателем, приводом.
2. Групповой, в котором один двигатель приводит в действие исполнительные органы РМ или несколько органов одной РМ.
3. Взаимосвязанный, в котором два или несколько ЭМП или ЭП электрически или механически связаны между собой с целью поддержания заданного соотношения или равенства скоростей, или нагрузок, или положения исполнительных органов РМ.
4. Многодвигательный, в котором взаимосвязанные ЭП, ЭМП обеспечивают работу сложного механизма или работу на общий вал.

5. Электрический вал, взаимосвязанный ЭП, в котором для постоянства скоростей РМ, не имеющих механических связей, используется электрическая связь двух или нескольких ЭМП.

По типу управления и задаче управления.

1. Автоматизированный ЭП, управляемый путем автоматического регулирования параметров и величин.

2. Программно-управляемый ЭП, функционирующий через посредство специализированной управляющей вычислительной машины в соответствии с заданной программой.

3. Следящий ЭП, автоматически отрабатывающий перемещение исполнительного органа РМ с заданной точностью в соответствии с произвольно меняющимся сигналом управления.

4. Позиционный ЭП, автоматически регулирующий положение исполнительного органа РМ.

5. Адаптивный ЭП, автоматически избирающий структуру или параметры устройства управления с целью установления оптимального режима работы.

По характеру движения.

1. ЭП с вращательным движением.

2. Линейный ЭП с линейными двигателями.

3. Дискретный ЭП с ЭМП, подвижные части которого в установившемся режиме находятся в состоянии дискретного движения.

По наличию и характеру передаточного устройства.

1. Редукторный ЭП с редуктором или мультиплексором.

2. Электрогидравлический с передаточным гидравлическим устройством.

3. Магнитогидродинамический ЭП с преобразованием электрической энергии в энергию движения токопроводящей жидкости.

По роду тока.

1. Переменного тока.

2. Постоянного тока.

По степени важности выполняемых операций.

1. Главный ЭП, обеспечивающий главное движение или главную операцию (в многодвигательных ЭП).

2. Вспомогательный ЭП.

Ниже приведена классификационная схема электроприводов по признаку сближения с рабочей машиной

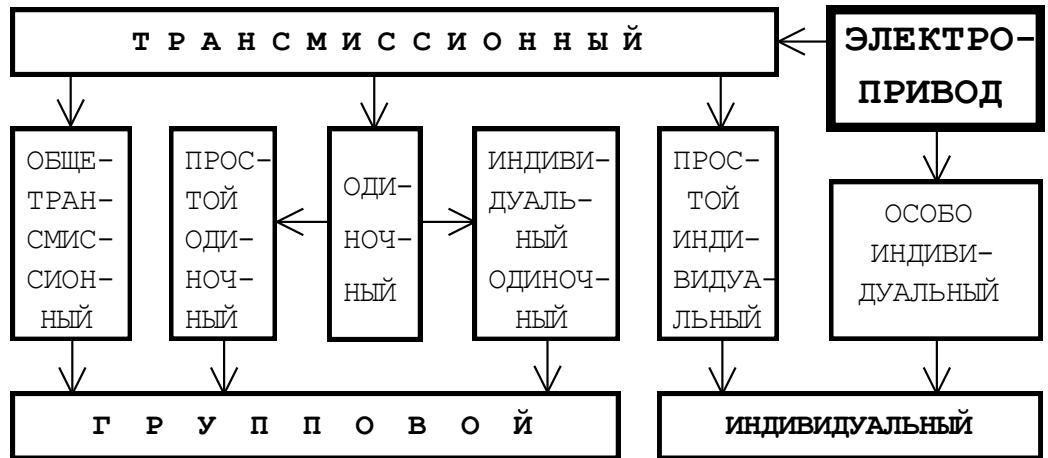


Рис.2: Классификационная схема электропривода по степени сближения с рабочей машиной.

#### 4. Основное уравнение движения электропривода

В соответствии с законом Ньютона разность действующей на тело и противодействующей сил равна динамической силе, равной, в свою очередь, произведению массы тела на ускорение

$$F_d - F_c = F_{\text{дин}} = ma = m \frac{dv}{dt}. \quad (1.13)$$

Если тело с массой  $m$  совершает вращательное движение по радиусу  $r$ , то

$v = \omega r$ , а  $a = \varepsilon r$ , где  $\varepsilon$  - угловое ускорение, равное  $\frac{d\omega}{dt}$ . Тогда для вращательного движения, умножив левую и правую части уравнения на  $r$ , получим

$$M_d - M_c = M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.14)$$

где  $J$  – момент инерции,  $\text{кгм}^2$ .

Применимально к системе электропривода под моментом инерции понимается суммарный момент инерции всех движущихся частей электропривода, приведённый к валу электродвигателя.  $M_d$  - момент вращающий, развиваемый электродвигателем на валу,  $M_c$  - статический момент сопротивления рабочей машины на этом же валу. Как момент электродвигателя, так и момент рабочей машины в общем случае зависят от частоты вращения, т.е. являются функциями частоты вращения. Обозначив наличие такой зависимости, получим уравнение в окончательном виде

$$M_d(\omega) - M_c(\omega) = M_{\text{дин}}(\omega) = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.15)$$

Данное уравнение называется *основным уравнением движения электропривода*, в которое входят две переменные величины: частота вращения и время. Анализируя уравнение, не трудно заметить, что система электропривода находится в состоянии равномерного движения (ускорение равно нулю) при равенстве моментов электродвигателя и рабочей машины. При этом частота вращения имеет постоянное (установившееся) значение. И наоборот, система находится в переходном состоянии от одной установившейся частоты вращения к другой частоте вращения, если момент электродвигателя больше момента сопротивления рабочей машины (ускорение) или если момент сопротивления больше момента электродвигателя (замедление).

Решение данного дифференциального уравнения относительно переменных (частоты вращения и времени) позволит получить зависимость частоты вращения от времени  $\omega = f(t)$ . Эта зависимость называется кривой разбега. Если выразить время в явном виде, то это зависимость времени, необходимого для разбега системы электропривода от начальной частоты вращения до  $\omega$ . Она является ключевой для решения многих вопросов при выборе электродвигателя к той или иной рабочей машине.

Во-первых, она необходима для расчёта длительности переходных периодов в технологических процессах, связанных с частыми пусками, остановками, реверсированием и регулированием частоты вращения рабочих органов машин, реализующим эти процессы. Во-вторых, для оценки степени перегрева электродвигателя за счёт дополнительного выделения тепла в переходных режимах. В-третьих, для определения порогов срабатывания (уставок) защитных и пусковых аппаратов, устанавливаемые одни для защиты цепей электродвигателя и питающей электрической сети от перегрузки, другие - для переключения ступеней пусковых и регулирующих реостатов в цепях электродвигателя.

Как уже было показано выше в *основное уравнение движения электропривода* входят зависимости моментов электродвигателя и рабочей машины от частоты вращения. Эти зависимости называются *механическими характеристиками*. Соответственно, *механической характеристикой электродвигателя* называется зависимость вращающего момента, развиваемого электродвигателем на его валу от частоты вращения

$M_d = f(\omega)$  или  $M_d(\omega)$ . *Механической характеристикой рабочей машины* называется зависимость момента сопротивления на валу рабочей машины от частоты вращения вала машины  $M_{cm} = f_m(\omega_m)$  или  $M_{cm}(\omega_m)$ . Например,  $M_{cm} = 54 + 6\omega$ .

Решить основное уравнение движения электропривода можно лишь тогда, когда будут известны эти характеристики.

Механические характеристики могут быть заданы математическим выражением, таблицей или графиком. Например, на рисунке 4а приведен график одной из таких характеристик. В каждой точке характеристика имеет свой наклон к оси  $\omega$ . Чем круче характеристика, тем она считается жёстче. *Жёсткостью характеристики* в данной точке (обозначается символом  $\beta$ ) называется тангенс угла наклона характеристики в этой точке к оси  $\omega$ , равный производной характеристики в данной точке по  $\omega$

$$\beta = \operatorname{tg} \alpha = dM/d\omega \approx \Delta M / \Delta \omega \quad (1.16)$$

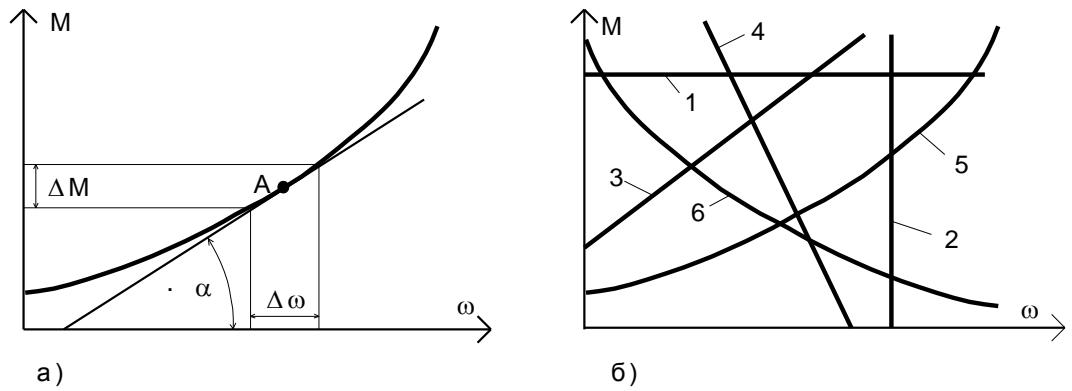


Рис. 3: Механические характеристики некоторых рабочих машин и электродвигателей.

Вид механических характеристик зависит от типов конкретно рассматриваемых электродвигателей и конкретно рассматриваемых рабочих машин. Например, на рисунке 4б показаны возможные виды таких характеристик. Характеристики 1, 2, 3 и 4 - прямолинейные.

нейные. Их жёсткость во всех точках одинакова. Характеристики 3 и 5 – возрастающие, а характеристики 4 и 6 – падающие. Жёсткость первых из них больше нуля, а вторых – меньше нуля. Промежуточное положение среди них занимает механическая характеристика 1. Это абсолютно мягкая характеристика, жёсткость которой равна нулю. В противовес её характеристика 2 – абсолютно жёсткая (жёсткость равна бесконечности). Такой характеристикой обладает синхронный электродвигатель.

*1. Устройство и принцип действия трёхфазного асинхронного электродвигателя. Скольжение*

Устройство. Конструктивно асинхронный двигатель состоит из неподвижного статора и размещенного внутри его вращающегося ротора (рис. 3.1). Их поверхности разделены равномерным воздушным зазором 0,2...1,5 мм.

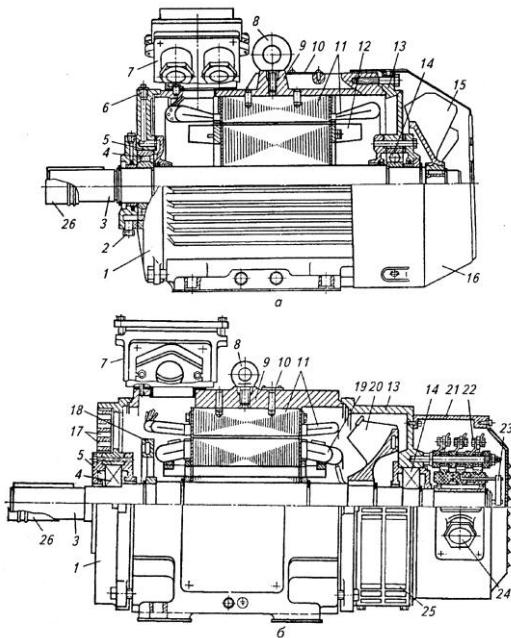


Рис. 4 Схемы асинхронных двигателей серии 4А:

*а* — короткозамкнутый степени защиты 1Р44 сельскохозяйственного исполнения (4А...СУ1);

*б* — с контактными кольцами степени защиты 1Р23 (4АНК...); 1 и 13 — подшипниковые щиты; 2 — торцевое окно в щите; 3 — вал; 4 — роликовый подшипник; 5 — камера для смазки; 6 — масленка; 7 — коробка выводов; 8 — рым; 9 — корпус (станина); 10 — паспортная табличка; 11 — статор; 12 и 19 — короткозамкнутый и фазный роторы; 14 — упорный шариковый подшипник; 15 — центробежный вентилятор наружного обдува; 16 — кожух вентилятора; 17 — пробки для смены смазки; 18 — балансировочное кольцо; 20 — центробежный вентилятор; 21 — короб с контактными кольцами; 22 — токосъём; 23 — токопровод к контактному кольцу; 24 — штуцер; 25 — отверстия (жалюзи) для выхода охлаждающего воздуха; 26 — упаковочная бумага

Статор состоит из корпуса (станины), внутри которого встроен сердечник с обмоткой. Сердечник в виде полого цилиндра собирают из отдельных изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,35...0,5 мм, которые скрепляют скобами, шпильками или сварным швом. Листы имеют кольцевую форму с пазами по окружности внутреннего диаметра, что позволяет создать на внутренней поверхности сердечника при его сборке продольные пазы. В пазы сердечника укладывают обмотку. Последняя состоит из отдельных секций (катушек). Начала и концы обмоток фаз трехфазного двигателя обозна-

чают буквами русского алфавита соответственно С1—С4, С2—С5 и С3—С6 и выводят на зажимы коробки выводов. Выводных концов может быть 6 или 3, а схема соединения обмоток — звезда или треугольник. У двигателей, разработанных после 01.01.1987 г. (серии 5А, RA), начала и концы обмоток фаз статора обозначают буквами латинского алфавита U1 – U2; V1 – V2; W1 – W2.

Роторы асинхронных двигателей бывают двух видов: с коротко-замкнутой и фазной обмотками. В зависимости от этого и сами асинхронные двигатели называют двигателями с коротко-замкнутым или фазным ротором.

Сердечник ротора выполняют из неизолированных листов электротехнической стали. В них выштампывают паз для обмотки и отверстие для вала. В фазных роторах в пазы укладывают обмотку, аналогичную статорной обмотке и образующую такое же число полюсов. Концы этой обмотки обычно соединяют в звезду, а начала выводят на три медных контактных кольца, на которые накладывают щетки. При таком исполнении ротора можно через щеточные контакты включать в цепь ротора трехфазный реостат для изменения силы тока и момента двигателя при пуске или для регулирования частоты вращения. Наиболее распространены ко-роткозамкнутые роторы. В таком роторе обмотка выполнена в виде так называемой «беличьей клетки». Ее выполняют путем заливки под давлением в пазы алюминиевых сплавов. При этом одновременно отливают стержни (проводники), лежащие в пазах, короткозамыкающие их кольца и лопасти для вентиляции.

На корпусе двигателя прикреплена табличка, на которой приведены номинальные данные двигателя, в том числе указаны схема соединения обмоток статора и соответствующее ей номинальное напряжение питающей сети, например схема Д/У, номинальное напряжение 220/380 В. Последнее означает, что при напряжении сети 220 В обмотку статора соединяют треугольником, а при напряжении 380 В — звездой.

**Принцип действия.** Асинхронные машины — это электрические машины переменного тока, у которых в установившемся режиме работы магнитное поле, участвующее в процессе преобразования энергии, и проводники пересекающиеся этим полем, имеют разные частоты вращения.

Асинхронные машины преимущественно используют в качестве электрических двигателей. Асинхронные электродвигатели служат для привода различных механизмов, преобразуя электрическую энергию в механическую. Их преимущества — простота конструкции, технологичность изготовления, высокая надежность при эксплуатации и др.

В качестве генераторов электрической энергии асинхронные машины не получили распространения из-за сложности их возбуждения и регулирования напряжения. Генераторный режим асинхронных машин используют в основном для их торможения, когда они нормально работают двигателями, например в крановых механизмах.

**Принцип действия асинхронных машин,** как и других электрических машин, основан на явлении электромагнитной индукции и возникновении электромагнитных сил. В асинхронных машинах основное магнитное поле создается МДС обмотки статора. Обмотку статора, например трехфазного асинхронного двигателя, выполняют в частном случае в виде трех катушек, смещенных в пространстве одна относительно другой на 120° и соединенных звездой или треугольником. При питании обмотки от сети трехфазного синусоидального тока возникает врачающееся магнитное поле с частотой вращения

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

Где  $f_1$  — частота питающего напряжения;  $p$  — число пар полюсов магнитного поля, определяемое числом катушек обмотки.

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники ротора и в соответствии с явлением электромагнитной индукции индуцирует в них ЭДС  $E_2$ , направление которой определяют по правилу правой руки.

Под действием ЭДС  $E_2$  в короткозамкнутой обмотке ротора будут протекать токи  $I_2$ , которые вследствие индуктивности обмотки отстают от ЭДС  $E_2$  на некоторый угол  $\psi_2$ . На проводники ротора с током  $I_2$ , находящиеся в магнитном вращающемся поле статора, будут действовать электромагнитные силы  $F$ , направление которых определяют по правилу левой руки. Образуемая от сил, приложенных ко всем проводникам, результирующая пара сил создает электромагнитный вращающий момент, увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем, т. е.

$$M = C_m \Phi_m I_2 \cos \psi_2$$

где  $C_m$  — коэффициент;  $\Phi_m$  — амплитудное значение магнитного потока вращающегося поля статора;  $I_2 \cos \psi_2$  — активная составляющая тока ротора.

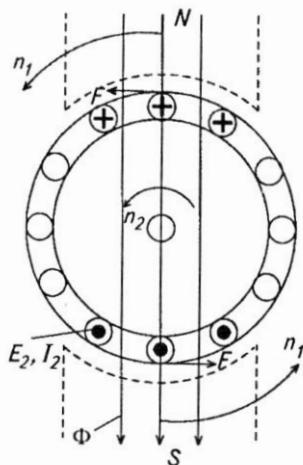


Рис. 5 К принципу действия асинхронного двигателя.

Ротор приходит во вращение, и его установившаяся частота вращения  $n_2$  будет определяться из условия равновесия электромагнитного момента  $M$  и тормозного момента, создаваемого силами трения, и приводимым во вращение рабочим механизмом.

Частота вращения ротора  $n_2$  принципиально всегда меньше частоты вращения магнитного поля  $n_1$ , так как при  $n_1 = n_2$  проводники ротора не будут пересекаться магнитным полем, в них не будут индуцироваться ЭДС, токи и не создается электромагнитный вращающий момент. Таким образом, работоспособность асинхронного двигателя возможна только в случае, когда  $n_2 \neq n_1$ . Это и определило название машин - асинхронные, т.е. имеющие несинхронное (несовпадающее) вращение магнитного поля статора и ротора. Частоту вращения магнитного поля  $n_1$  называют синхронной частотой вращения.

**Скольжение.** Разность частот вращения магнитного поля и ротора, выраженная волях или процентах от частоты вращения магнитного поля, называют скольжением:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; \quad S\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100$$

Частоту вращения ротора определяют как

$$n_2 = n_1 (1 - S); \quad n_2 = n_1 \left(1 - \frac{S\%}{100}\right)$$

При неподвижном роторе, например в момент пуска, скольжение  $S = 1$ , а при номинальной нагрузке двигателя  $S_{\text{ном}} = 0,025 \dots 0,07$ . Скольжение, равное  $S = 0$ , в двигательном режиме недостижимо, но принципиально двигательный режим соответствует диапазону скольжений  $0 \leq S \leq 1$ .

При вращении ротора с помощью приводного двигателя с  $n_2 > n_1$  асинхронная машина переходит в генераторный режим и  $S < 0$ .

Асинхронная машина может быть использована также в режиме электромагнитного тормоза. В этом случае направления вращения ротора и магнитного поля противоположны, т. е.  $S > 1$ .

## 2. Схемы включения трёхфазных асинхронных электродвигателей.

Всякий асинхронный трехфазный двигатель рассчитан на два номинальных напряжения трехфазной сети 380 /220 - 220/127 и т. д. Наиболее часто встречаются двигатели 380/220В. Переключение двигателя с одного напряжения на другое производится подключением обмоток «на звезду» - для 380 В или на «треугольник» - на 220 В. Если у двигателя имеется колодка подключения, имеющая 6 выводов с установленными перемычками, следует обратить внимание в каком порядке установлены перемычки. Если у двигателя отсутствует колодка и имеются 6 выводов - обычно они собраны в пучки по 3 вывода. В одном пучке собраны начала обмоток, в другом концы (начала обмоток на схеме обозначены точкой).

В данном случае «начало» и «конец» - понятия условные, важно лишь чтобы направления намоток совпадали, т. е. на примере «звезды» нулевой точкой могут быть как начала, так и концы обмоток, а в «треугольнике» - обмотки должны быть соединены последовательно, т. е. конец одной с началом следующей. Для правильного подключения на «треугольник» нужно определить выводы каждой обмотки, разложить их попарно и подключить по след. схеме:

Если развернуть эту схему, то будет видно, что катушки подключены «треугольником».

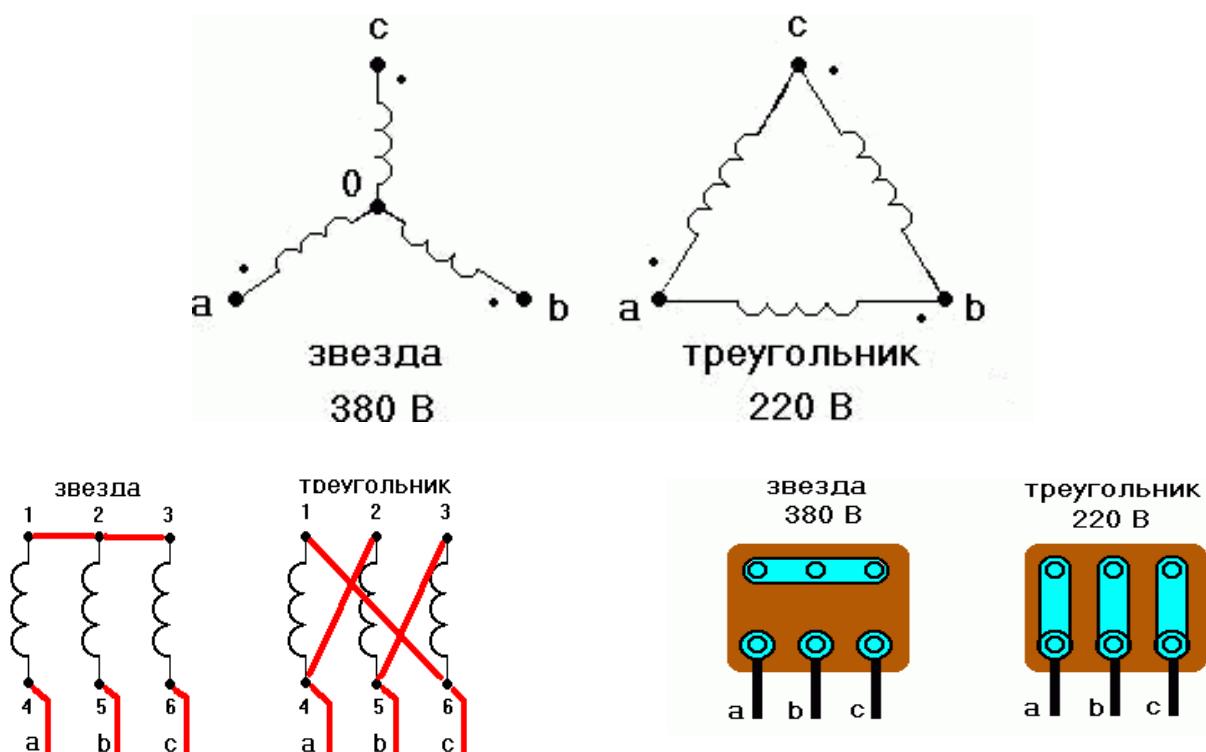


Рис. 6 Схемы включения трёхфазного двигателя

Если у двигателя имеется только 3 вывода, следует разобрать двигатель: снять крышку со стороны колодки и в обмотках найти соединение трёх обмоточных проводов (все остальные провода соединены по 2). Соединение трёх проводов является нулевой точкой звезды. Эти 3 провода следует разорвать, припаять к ним выводные провода и объединить их в один пучок. Таким образом мы имеем уже 6 проводов, которые нужно соединить по схеме треугольника.

В основное уравнение движения электропривода входит механическая характеристика рабочей машины, приведённая к валу электродвигателя  $M_c = f(\omega)$  или  $M_c(\omega)$ . Она представляет собой зависимость момента сопротивления рабочей машины на валу электродвигателя от частоты вращения вала электродвигателя. Однако чаще всего бывает известна приводимая в каталогах или снятая опытным путём механическая характеристика на валу рабочей машины  $M_{cm} = f_m(\omega_m)$  или  $M_{cm}(\omega_m)$ , определение которой приведено выше. Для подстановки данной характеристики в основное уравнение движения электропривода её необходимо привести к валу электродвигателя, т. е. к виду  $M_c = f(\omega)$ .

Приведение осуществим в следующей последовательности.

а). Заменим в выражении  $M_{cm} = f_m(\omega_m)$ , в таблице или на графике частоту вращения вала рабочей машины  $\omega_m$ , связанной с ней однозначно частотой вращения вала электродвигателя  $\omega$

$$\omega_m = \omega / i, \quad (5.1)$$

где  $i$  – передаточное отношение трансмиссии (редуктора), равное отношению частоты вращения ведущего вала (вала электродвигателя) к ведомому валу (валу рабочей машины).

Таким образом, получим промежуточную зависимость момента сопротивления на валу рабочей машины от частоты вращения вала электродвигателя

$$M_{cm} = f_m(\omega / i) = f_{\text{пр}}(\omega). \quad (5.2)$$

б). При той же самой частоте *мощность* на преодоление сил сопротивления рабочих органов машины с вала рабочей машины  $P_{cm}(\omega)$  меньше *мощности* на преодоление сил сопротивления рабочих органов с вала электродвигателя  $P_c(\omega)$  на величину *потерь мощности* в трансмиссии. Коэффициент полезного действия трансмиссии в общем случае зависит от частоты вращения  $\eta(\omega)$ . Он равен отношению первой из них ко второй

$$\eta(\omega) = P_{cm}(\omega) / P_c(\omega). \quad (5.3)$$

Откуда

$$P_c(\omega) = P_{cm}(\omega) / \eta(\omega). \quad (5.4)$$

Заменив значения мощностей произведениями соответствующих моментов на соответствующие частоты вращения и приняв с некоторой долей приближения коэффициент полезного действия трансмиссии не зависящим от частоты вращения, будем иметь

$$\omega M_c(\omega) = \omega_m M_{cm}(\omega) / \eta. \quad (5.5)$$

в). После некоторых преобразований получим искомую механическую характеристику

$$M_c(\omega) = M_{cm}(\omega) / \eta i, \quad (5.6)$$

которую и следует подставлять в основное уравнение движения электропривода при его решении.

## 2. Приведенный момент инерции

При расчетах необходимо пересчитывать, моменты и массы различных элементов системы к какому-либо одному из элементов, чаще к валу двигатели.

Приведение моментов проводят исходя из закона равенства мощностей:

$$M_{c.pri\eta\delta\theta} = \frac{M_{c.p.m}\eta_{p.m}}{\eta_{nep}} \quad (5.7)$$

или

$$M_{c.pri\eta\delta\theta} = \frac{M_{c.p.m}\omega_{p.m}}{\eta_{nep}} \quad (5.8)$$

$$M_{c.pri\eta\delta\theta} = M_{c.p.m} \frac{\omega_{p.m}}{\eta_{nep} \cdot \omega_{\delta\theta}} = \frac{M_{mp} + (M_{c.nom} - M_{mp}) \left( \frac{\omega}{\omega_{nep.\delta\theta}} \right)}{\eta_{nep}} \quad (5.9)$$

Где  $M_{c.pri\eta\delta\theta}$  — приведенный к валу электродвигателя момент сопротивления рабочей машины;

$M_{c.p.m}$  — фактический момент сопротивления рабочей машины;

$\omega_{p.m}$  — угловая скорость рабочей машины;  $\eta_{nep}$  — КПД передачи;

$$I — передаточное отношение, i = \frac{\omega_{\delta\theta}}{\omega_{p.m}}.$$

Если в системе имеются рабочие органы, совершающие возвратно-поступательное движение с усилием  $F_c$  и скоростью  $v_{p.m}$ , то это усилие может быть приведено к валу электродвигателя и замещено соответствующим моментом из выражения:

$$M_{c.pri\eta\delta\theta} = \frac{F_c v_{p.m}}{\eta_{nep} \omega_{\delta\theta}} \quad (5.10)$$

Определение *приведенного момента инерции* основано на равенстве кинетических энергий, запасенных в фиктивном (виртуальном) маховике, установленном на валу электродвигателя и обладающем  $J_{pri\eta\delta\theta}$ , и энергий, запасенных во всех движущихся частях системы (рис. 5.1).

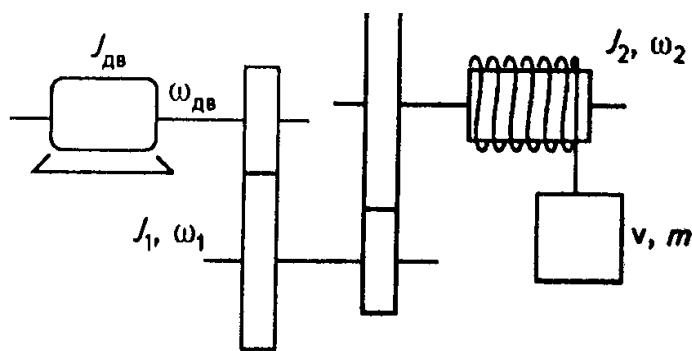


Рис. 7 Кинематическая схема электропривода

Для практических расчетов можно воспользоваться формулой

$$J_{\text{нпив}} = 1.2 J_{\text{об}} + \frac{J_{\text{п.м}}}{i^2}, \quad (5.11)$$

где  $i$  – передаточное число.

### 3. Определение времени пуска и торможения электропривода

Под временем пуска понимают продолжительность разбега агрегата. Время пуска и торможения можно определить, решив основное уравнение движения электропривода относительно времени, т. е., разделив переменные, получим:

$$dt = J_{\text{нпив}} \frac{d\omega}{M_{\text{об}} - M_c} \quad (5.12)$$

$$\text{Откуда } t_{\text{пуск}} = J_{\text{нпив}} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_{\text{об}} - M_{\text{с.прив}}} \quad (5.13)$$

Если  $\omega_1 = 0$  и  $\omega_2 = \omega_{\text{ном.об}}$ , рассчитывают время пуска. Если  $\omega_1 = \omega_{\text{ном.об}}$  и  $\omega_2 = 0$ , рассчитывают время торможения

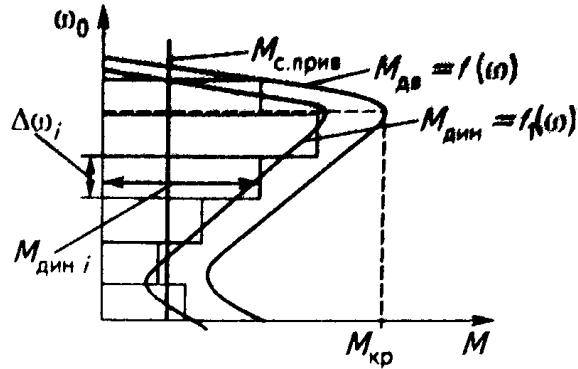


Рис. 8 Определение времени пуска электропривода графоаналитическим способом.

Уравнение (5.13) бывает сложно решить аналитически. Поэтому для определения времени пуска используют графоаналитический и графический методы.

Рассмотрим подробно только наиболее простой *графоаналитический метод* определения времени пуска электропривода (рис. 5.2).

Для этого по пяти точкам строят механическую характеристику асинхронного электродвигателя  $M_{\text{об}} = f(\omega)$  (см. рис. 5.2). Далее по формуле (1.56) строят приведенную механическую характеристику рабочей машины ( $M_{\text{с.прив}}$ ). Графическим способом находят разность ( $M_{\text{об}} - M_{\text{с.прив}}$ ) и получают динамический момент  $M_{\text{дин}} = f_1(\omega)$ . Из рисунка 5.2 следует, что динамический момент имеет сложную зависимость и аналитически его трудно описать. Поэтому этот момент заменяют несколькими прямоугольниками (ступенями). При этом стараются выдерживать равенство между площадками, оказавшимися над и под короткой стороной прямоугольника. Для каждого прямоугольника проекция его стороны на ось моментов равна моменту динамическому, а проекция другой стороны на ось угловой скорости – изменению ее для этой ступени. В этом случае общее время разгона электропривода

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

где  $\Delta t_i$  – время разгона электропривода на I ступени.

#### 4. Расчет мощности электропривода

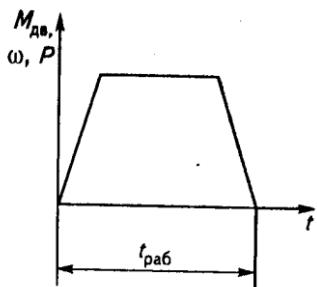
Мощность электропривода зависит от мощности используемого электродвигателя. При выборе электродвигателя учитывают допустимую температуру нагрева, возможность надежного запуска при снижении напряжения, устойчивость работы при неблагоприятных внешних условиях.

Особое внимание при выборе мощности электродвигателя уделяют возможным мгновенным перегрузкам, а также нагреву обмоток. Обмотку электродвигателя обычно выполняют из медных изолированных проводников. Эта изоляция — наименее термоустойчивая часть. При чрезмерном перегреве обмоток электродвигателя происходит ускоренное старение изоляции и выход ее из строя.

Для выбора мощности двигателя необходимо проводить тепловые расчеты электропривода, которые должны показать, что при его работе температура не превышает допустимую. Для этого строят *нагрузочные диаграммы*, иллюстрирующие изменения тока, момента скорости электродвигателя во времени.

Нагрузочные диаграммы электропривода получают расчетным или экспериментальным путем. Продолжительность той или иной нагрузки электропривода зависит от технологического процесса. Результаты расчета электропривода проверяют по допустимой температуре, по пусковой и перегрузочной способностям.

Для расчета тепловых режимов и выбора мощности электродвигателя не требуется высокой точности. Поэтому часто диаграммы строят упрощенным методом, принимая постоянный ток и момент при пуске и торможении. При этом характер нагрузочной диаграммы за один цикл работы, к примеру, может иметь вид, показанный на рисунке 5.3.



#### 5. Методы определения мощности электродвигателя для различных режимов работы.

Выбор мощности электродвигателя для длительного режима работы. Различают длительную, постоянную, переменную нагрузки.

Нагрузки для хорошо изученных электроприводов работающих, в длительном постоянном режиме, рассчитывают по известным формулам.

Мощность нагрузки для осевого или центробежного вентилятора, Вт:

$$P = \frac{QH}{\eta_e \eta_{nep}},$$

где  $Q$  - подача вентилятора,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  - давление, развиваемое вентилятором, Па;  $\eta_e$  - коэффициент полезного действия (КПД) вентилятора (0,5...0,85)  $\eta_{nep}$  - КПД механической передачи: для клиноременной передачи - 0,85 ..0,95°, для посадки рабочего колеса вентилятора на вал двигателя - 1.

Мощность нагрузки для насоса, подающего жидкость, Вт:

$$P = \frac{9.81 QH\rho}{\eta_e \eta_{nep}},$$

где  $Q$  - подача вентилятора,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  - давление, развиваемое насосом,  $\text{мм вод. ст.}$ ;  $\rho$  — плотность перекачиваемой жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$  (для воды  $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ );  $\eta_e$  — КПД насоса: для поршневых — 0,65...0,85, для центробежных — 0,6...0,8, для вихревых — 0,3...0,5 (большие значения КПД соответствуют более мощным насосам);  $\eta_{nep}$  — КПД механической передачи.

Мощность нагрузки для транспортера, Вт:

$$P = \frac{9.81 Q H (cL \pm H)}{\eta_{nep}},$$

где  $Q$  — подача транспортера,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $c$  — коэффициент сопротивления движению (табл.1.8);  $L$  — длина транспортера по горизонтали,  $\text{м}$ ;  $H$  — высота перемещения груза (плюс — вверх, минус — вниз),  $\text{м}$ ;  $\eta_{nep}$  — общий КПД всех механических передач, значения которого для разных типов передач приведены в таблице.

*Коэффициент сопротивления движению*

Ленточный	0,26...0,33
Скребковый с роликовыми цепями	0,7...2,25
Скребковый с безроликовыми цепями	1,6...4,2
Винтовой транспортер при перемещении сухой земли или песка	2,5
Винтовой транспортер при перемещении цемента, глины, извести	4,0

*Коэффициент полезного действия для разных видов механических передач*

Тип передачи	
С подшипниками скольжения	0.94...0.97
С подшипниками качения	0.98...0.99
Цилиндрическая передача	0.96...0.99
Червячная	0.6...08
Клиновременная	0.85...0.95
Фрикционная	0.7...0.8

Мощность нагрузки для режущего механизма, Вт:

$$P = \frac{F_p v_p}{\eta_{nep}},$$

где  $F_p$  — усилие резания,  $\text{Н}$ ;  $v_p$  — скорость резания,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\eta_{nep}$  — общий КПД механической передачи.

Мощность нагрузки для грузоподъемных механизмов, Вт:

$$P = \frac{Gv}{\eta_{nep}},$$

где  $G$  — общий вес поднимаемого груза,  $\text{Н}$ ;  $v$  — скорость подъема груза,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\eta_{nep}$  — общий КПД механических передач.

Выбранные двигатели проверяются только по пусковому моменту, так как большинство рабочих машин имеют повышенный момент трогания:

$$M_{\text{пуск.дв}} = \lambda_{\text{пуск}} M_{\text{ном.дв}} \geq (1.2...1.5) M_{\text{тр.п.м}},$$

где  $M_{\text{пуск,дв}}$  — пусковой момент электродвигателя;  $\lambda_{\text{пуск}}$  — кратность пускового момента электродвигателя,  $\lambda_{\text{пуск}} = \frac{M_{\text{пуск,дв}}}{M_{\text{ном,дв}}}$ ;  $M_{\text{тр,р.м}}$  — момент трогания рабочей машины.

При работе электропривода с *длительной переменной нагрузкой* (с частыми разгонами и торможениями) мощность электрического двигателя определяют *методом среднеквадратической, или эквивалентной, мощности*. Это объясняется тем, что квадрат потерь в двигателе пропорционален току двигателя. Так как нагрев — главный фактор, определяющий мощность двигателя, двигатель выбирают по средним потерям мощности, соответствующим нагрузочной диаграмме (рис. 5.4).

Именно средние потери мощности и определяют фактический перегрев двигателя.

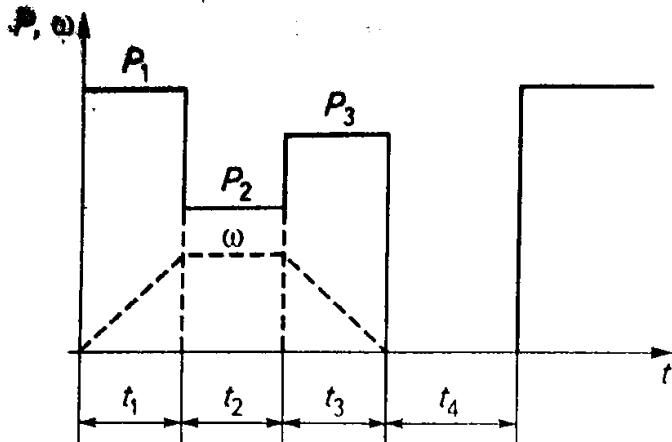


Рис. 9 Нагрузочная диаграмма.

Длительный режим работы характерен для электропривода электроустановок насосов, компрессоров, вентиляторов. Пуск и остановка этих электроустановок происходит редко. Следовательно, пусковые и тормозные процессы практически не влияют на процесс нагрева обмоток электродвигателя.

Поэтому *номинальную мощность* определяют непосредственно по *усредненной статической мощности* с учетом потерь в механической передаче.

Если в нагрузочной диаграмме имеются участки, соответствующие работе с пониженной скоростью, а также участки, соответствующие пусковым и тормозным режимам, то рекомендуется учитывать коэффициент теплоотдачи введением коэффициента  $\alpha$  и  $\beta$  в формулу средних потерь, что уменьшит, что уменьшит суммарное время и увеличит расчетные значения средних потерь.

Используя *метод средних потерь*, получают удовлетворительные результаты. Его недостаток — необходимость иметь данные о потерях в электродвигателе и большие затраты времени для расчета. Удобнее использовать *методы эквивалентного тока и эквивалентного момента*, которые непосредственно вытекают из метода средних потерь.

**Метод эквивалентного тока.** В длительном режиме электродвигатель будет работать без перегрева при эквивалентном токе ( $I_{\text{ЭКВ}}$ ), определяемом по формуле:

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}$$

Метод эквивалентного тока применяют для электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

Метод эквивалентного момента. Вместо метода эквивалентного тока удобнее использовать метод эквивалентного момента, так как нагрузочные диаграммы рабочих машин чаще описывают зависимость момента от времени. Формула для определения эквивалентного момента:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} t_i}}$$

При пуске и торможении следует вносить указанные выше коэффициенты.

Метод эквивалентного момента применим для электроприводов с электродвигателями постоянного тока независимого возбуждения при  $\Phi=\text{const}$  и для асинхронных электродвигателей в том случае, когда фактический коэффициент мощности незначительно отличается от номинального.

Метод эквивалентной мощности. Если электропривод работает с незначительно изменяющейся скоростью, то мощность пропорциональна моменту. Поэтому расчет можно вести по эквивалентной мощности:

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} t_i}}$$

*Эквивалентная мощность* — постоянная мощность, при которой потери в двигателе равны средним потерям действительного переменного графика нагрузки.

## 1.2 Лекция №2 (2 часа).

**Тема:** «Промышленная реализация и номенклатура комплектных электроприводов»

### 1.2.1 Вопросы лекции

1. Комплектные электроприводы. Классификация. Промышленная реализация и номенклатура комплектных электроприводов.
2. Оптимальные системы регулирования и экономии электроэнергии в комплектных электроприводах.

### 1.2.2 Краткое содержание вопросов

1. Комплектные электроприводы. Классификация. Промышленная реализация и номенклатура комплектных электроприводов.

Мощность, которую способен развить электродвигатель без вредных последствий, определяется его максимальным врачающим моментом и степенью нагрева. Этому должны соответствовать механическая прочность деталей двигателя и теплостойкость материалов (изоляционных), применяемых при его изготовлении.

Решающую роль в определении мощности электродвигателя играет нагрев его обмоток. При работе электрический двигатель нагревается. Этот нагрев обусловлен различными потерями (тепловыми в обмотках, на гистерезис, вихревые токи, трение и т. п.), которые учитываются коэффициентом полезного действия двигателя:

$$\sum \Delta P = P_{\text{подв}} - P_n = \frac{P_n}{\eta_n} - P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}$$

где  $\sum \Delta P$  — теряемая мощность (потери), превращающаяся в тепло;

$P_{\text{подв}}$  — мощность, подводимая к двигателю от сети;

$P_n$  — номинальная мощность двигателя;

$\eta_n$  — к. п. д. при номинальной нагрузке.

Вследствие непрерывного выделения тепла (в обмотках, в стали, в подшипниках) при работе двигателя его температура постепенно повышается и превышает температуру окружающей среды.

Если бы двигатель, нагреваясь, не отдавал тепло в окружающую среду, то его температура могла бы достигнуть бесконечно большой величины. В действительности же благодаря рассеиванию тепла поверхностью двигателя в окружающую среду повышение его температуры по достижении известного предела прекращается. Это наступает тогда, когда количество тепла, отдаваемого поверхностью в окружающую среду в единицу времени, становится равным количеству тепла, возникающего в двигателе.

Предельно допустимая температура нагрева ограничивается качеством материала изоляции. Поэтому данной мощности двигателя должна соответствовать (при всех прочих равных условиях) вполне определенная теплоотдача, а следовательно, и габариты двигателя. Чем больше мощность, тем больше выделяется тепла и больше потребные габаритные размеры двигателя.

Согласно ГОСТу 8865—58, все изолирующие материалы, применяемые в электрических машинах, в отношении допустимых для них температур (теплостойкости) могут быть разделены на семь классов.

Предельно допустимые температуры нагрева по классам приведены в таблице 1.

Таблица 1

Классы изоляции	<i>Y</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>G</i>
Предельно допустимая температура, °C	90	105	120	130	155	180	Более 180
	0	5	0	0	5	0	

В качестве изоляционных материалов класса *Y* используют хлопчатобумажную пряжу, бумагу, волокнистые материалы из целлюлозы и шелка, не пропитанные и не погруженные в масло.

К изоляционным материалам класса *A* относятся те же материалы, что и к классу *Y*, но пропитанные или погруженные в масло или в какой-либо другой жидкий диэлектрик, а также в эмали и лаки, применяемые при изготовлении эмалированной проволоки.

Двигатели малых и средних мощностей, применяемые в сельском хозяйстве, выполняют главным образом с изоляцией класса *A*.

В классе изоляции *E* используют синтетические органические пленки.

Изоляцию класса *B* выполняют из слюды, асбеста, стеклянного волокна и других неорганических материалов, связанных материалами органического происхождения.

Двигатели с изоляцией класса *B* могут работать в условиях частых перегрузок при повышенной температуре окружающей среды.

При изготовлении изоляции класса *F* используют те же материалы, что и для класса *B*, но с теплостойкими синтетическими связующими и пропитывающими составами.

Изоляцию класса *H* изготавливают из неорганических изоляционных материалов класса *B* со связующими веществами в виде так называемых силиконовых лаков повышенной теплостойкости.

Изоляцию класса *C* изготавливают из слюды, кварца, стекла и керамических материалов с использованием в качестве связующих веществ неорганических составов. Если

изоляция содержит изолирующие материалы разных классов, то температура каждого из этих материалов не должна превосходить допускаемую для них предельную температуру.

При изучении нагрева двигателя принимаются следующие допущения:

1) двигатель представляет собой однородное тело, обладающее бесконечно большой внутренней теплопроводностью, благодаря чему температура всех его точек одинакова;

2) температура окружающей среды за время нагрева постоянна;

3) коэффициент теплоотдачи не зависит от температуры, и отдача тепла в окружающую среду прямо пропорциональна превышению температуры двигателя над температурой окружающей среды;

4) потери и теплоемкость двигателя также не зависят от температуры.

Исходя из сделанных допущений

уравнение нагрева примет вид:

$$\vartheta = \vartheta_{ycm} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

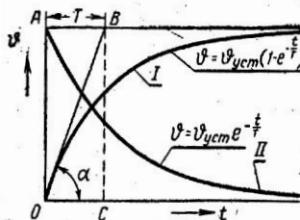


Рис. 68. Кривые нагрева и охлаждения двигателя:  
I — кривая нагрева; II — кривая охлаждения.

Рис. 1 Кривые нагрева и охлаждения двигателя

Практически при наличии теплоотдачи за время  $T$  превышение температуры двигателя достигает значения  $\vartheta = 0,632\vartheta_{ycm}$ .

Теоретически время, в течение которого достигается температура  $\vartheta_{ycm}$ , равно бесконечности. На практике принимают, что температуру двигателя можно считать установившейся примерно через  $t = (4\dots 5)T$ , (табл. 2).

Таблица 2

T	T	2T	3T	4T	5T
$\frac{\vartheta}{\vartheta_{ycm}}$	0,632	0,865	0,950	0,982	0,993

Как видно из таблицы 2, по истечении времени  $t=4T$  превышение температуры двигателя достигает  $\vartheta = 0,982\vartheta_{ycm}$  и дальнейшее повышение температуры идет очень медленно. Согласно ГОСТу 183-55, температура считается установившейся, если повышение ее за 1 ч не превосходит 1°C.

Постоянная времени нагрева, зависящая только от конструкции двигателя, характеризует скорость процесса нагревания. Чем больше теплоемкость, тем медленнее нагревается двигатель. Чем больше теплоотдача, тем быстрее идет нагрев. Постоянная времени нагрева у двигателей закрытого типа больше, чем у двигателей открытого типа, так как

внешняя поверхность охлаждения закрытых двигателей при тех же потерях должна быть больше, а с увеличением поверхности растут и габаритные размеры двигателя. При этом если поверхность и теплоотдача увеличиваются в квадрате, то объем двигателя и его теплопемкость растут в кубе от линейных размеров.

При всех прочих равных условиях двигатели с вентиляцией будут иметь постоянную времени нагрева, меньшую, чем двигатели без вентиляции.

Каждой нагрузке соответствуют определенные потери, и при установившемся режиме конечное превышение температуры ( $\vartheta_{y_{cm}} = \frac{Q_x}{A}$ )

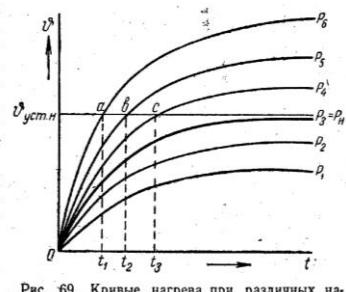


Рис. 69. Кривые нагрева при различных нагрузках.

Рис. 2 Кривые нагрева при различных нагрузках

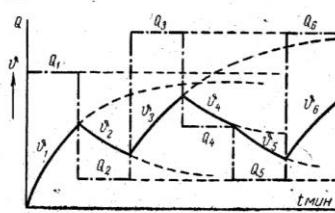


Рис. 70. Кривая нагрева при переменной нагрузке.

Рис. 3 Кривые нагрева при переменной нагрузке

При работе двигателя - с различными нагрузками  $P_1, P_2, P_3, P_4$  и т. д. получится ряд кривых нагрева для данного двигателя (рис. 69). Номинальному режиму соответствует кривая  $P_3$ . Кривые  $P_4, P_5$  и  $P_6$  характеризуют термическую перегрузку, а  $P_1$  и  $P_2$  — термическую недогрузку двигателя.

При нагрузках  $P_4, P_5$  и  $P_6$  продолжительность работы двигателя ограничена отрезками времени  $t_1, t_2$  и  $t_3$ . Работа сверх этого времени будет протекать при  $\vartheta > \vartheta_{y_{cm,n}}$ , что не допускается нормами.

При переменной нагрузке с потерями  $Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_6$  (рис. 70) кривая нагрева будет ломаной. С каждым изменением нагрузки

ки кривая нагрева стремится к своей  $\vartheta_{y_{cm}}$  (указано пунктиром), соответствующей потерям, происходящим на данном отрезке времени.

С увеличением нагрузки температура растет, с уменьшением нагрузки ( $Q_2, Q_5$  - потери холостого хода двигателя) температура двигателя снижается.

Из уравнения нагрева для установившегося режима работы двигателя следует, что  $Q = A \vartheta_{y_{cm}} = 0,24 \sum \Delta P$ , откуда

$$\sum \Delta P = \frac{A \vartheta_{y_{cm}}}{0,24} \quad (*)$$

Но так как  $\sum \Delta P = \frac{P_n}{\eta_n} - P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}$  то, учитывая выражение (\*), мощность двигателя  $P_n$  можно определить через факторы, характеризующие его потери и термические свойства:

$$P_n = \sum \Delta P \frac{\eta_n}{1 - \eta_n} = \frac{A \vartheta_{yctm}}{0,24} \cdot \frac{\eta_n}{1 - \eta_n} \quad (**)$$

Выражение (\*\*) показывает, что при одних и тех же габаритных размерах мощность двигателя может быть значительно повышена за счет повышения коэффициента полезного действия, увеличения теплостойкости материалов, характеризуемой  $\vartheta_{yctm}$ , и усиления теплоотдачи двигателя. Улучшением конструкции, тщательным расчетом и введением более теплостойких изоляционных материалов и различных систем вентиляции к настоящему времени удалось значительно снизить расход металла на единицу мощности.

## 2. Оптимальные системы регулирования и экономии электроэнергии в комплектных электроприводах.

Весьма действенным фактором в снижении массы двигателей на единицу мощности являются вентиляция и охлаждение.

При эксплуатации  $A$ ,  $\vartheta_{yctm}$  и  $\eta_n$ , двигателя фактически заданы, и задача сводится к тому, чтобы умело их использовать. В частности, необходимо регулярно очищать поверхность двигателя от пыли. Иногда на практике двигатель открытого типа кустарным способом защищают от пыли или водяных брызг. Однако из-за ухудшения теплоотдачи мощность, которую можно взять от двигателя, в таком случае значительно снижается.

Мощность, развиваемая двигателем, ограничивается допустимой температурой нагрева его обмоток. ГОСТом 183-66 установлены пределы допустимой температуры для каждого класса изоляции (табл. 6.1).

Номинальная паспортная мощность двигателя определяется с учетом температуры окружающей среды, равной  $40^{\circ}\text{C}$ . Если двигатель будет работать при температуре окружающей среды, отличающейся от  $40^{\circ}\text{C}$ , то его допустимая по условиям нагрева нагрузка, может быть увеличена при температуре окружающей среды ниже  $40^{\circ}\text{C}$ , или понижена при температуре окружающей среды выше  $40^{\circ}\text{C}$ .

На практике надо знать, насколько может быть увеличена или уменьшена паспортная мощность двигателя при той или иной температуре окружающей среды, отличающейся от  $40^{\circ}\text{C}$ .

Искомая мощность двигателя  $P_x$  будет находиться как:

$$P_x = P_n \sqrt{1 + \frac{\Delta \Theta}{\vartheta_{yctm,n}} (\alpha + 1)}$$

При ориентировочных подсчетах отношение  $\alpha$  постоянных потерь к переменным может быть принято следующим:

для шунтовых двигателей .....	1,0
для асинхронных двигателей .....	0,5-0,7
для серийных двигателей .....	0,5
для синхронных двигателей .....	1,5-2,0

Таким образом, при температуре окружающей среды ниже стандартной двигатель в термическом отношении допускает некоторую перегрузку.

Большинство сельскохозяйственных машин приводится в действие нерегулируемым электроприводом при помощи трехфазного асинхронного двигателя переменного тока (преимущественно двигателя с короткозамкнутым ротором). Этот двигатель обладает целым рядом преимуществ по сравнению с асинхронным двигателем с контактными

кольцами. В нем отсутствуют пусковой реостат и кольца со щетками и короткозамыкателями. Он дешевле двигателя с контактными кольцами, проще в обслуживании и надежнее в эксплуатации.

Двигатель с контактными кольцами обычно применяют там, где необходимо иметь большой пусковой момент при сравнительно малом (1,5-2-кратном) пусковом токе, например в приводе станка для приработки подшипников. Здесь довольно тяжелые условия пуска при мощности двигателя 10-13 кВт. И если применить короткозамкнутый двигатель, то он в периоды пуска при соизмеримо малой мощности трансформатора будет создавать ненормальные условия для освещения и для работы других двигателей, питающихся от той же сети. Когда станки для приработки подшипников все же снабжаются двигателями с короткозамкнутым ротором, они работают по принудительному графику в периоды минимума общей нагрузки и в те часы, когда отсутствует световая нагрузка.

Основной недостаток асинхронных двигателей заключается в том, что в них затруднено регулирование частоты вращения.

Применение синхронных двигателей ограничивается их высокой стоимостью и необходимостью иметь постоянный ток для питания цепи возбуждения. Кроме того, синхронные двигатели требуют автоматической аппаратуры управления, что также удорожает установку. Поэтому их применяют в установках относительно большой мощности. Постоянный ток в сельскохозяйственных предприятиях требуется главным образом для зарядки аккумуляторов автомобилей, электрокар и радиоустановок. В этих случаях устанавливают специальные преобразователи переменного тока в постоянный.

Согласно ГОСТу 183-66, эксплуатационные значения напряжений переменного тока: 12; 36; 127; 220; 380; 500 В и 3; 6; 10; 35; 110; 154; 220; 380 кВ, а постоянного тока: 12; 24; 110; 220; 440 В.

Промышленность изготавливает электродвигатели постоянного тока на напряжения 24; 110; 220; 440 В и переменного тока на напряжения 36; 220; 380; 500; 3000; 6000 В.

В сельском хозяйстве имеются двигатели постоянного тока на различные напряжения, в зависимости от напряжения генераторов. По экономическим соображениям на зажимах двигателей рекомендуются напряжения 220 и 440 В.

Наиболее распространенным напряжением переменного тока в сельскохозяйственных электроустановках в настоящее время является система 380/220 В.

При выборе электродвигателя по частоте вращения приходится учитывать массу, стоимость и к.п.д. электродвигателя в зависимости от различных номинальных частот вращения, стоимость и к.п.д. механических передач, связанных с электродвигателем, выбранным на ту или иную частоту вращения. Из основного соотношения между мощностью, моментом и частотой вращения  $M_h = 9550 \cdot f$  - следует, что при одной и той же мощности, развиваемой электродвигателем, его момент должен быть тем больше, чем меньше частота вращения, на которую он рассчитан.

Электродвигатели одной и той же модели, габарита и массы выпускаются заводами на различную мощность в зависимости от частоты вращения. Чем выше частота вращения электродвигателя, тем меньше его масса, а следовательно, стоимость единицы его мощности. Отсюда понятно стремление к установке (где это только возможно) электродвигателей на повышенную частоту вращения. Одновременно следует учесть, что высокоскоростные электродвигатели имеют более высокий к.п.д. и  $\cos\varphi$  по сравнению с тихоходными двигателями той же мощности.

Теоретически асинхронные двигатели могут быть построены на сколь угодно малую частоту вращения. Но, как правило, двигатели с синхронной частотой вращения ниже 600 об/мин почти не применяются, потому что они получаются слишком громоздкими и дорогими.

В тех случаях, когда частота вращения вала рабочей машины менее 600 об/мин, экономически оказывается выгодным и технически вполне оправданным вместо тихоход-

ных двигателей для непосредственного соединения с рабочим валом машины устанавливать высокоскоростные двигатели с редукторной или другой механической передачей.

Из нагрузочной диаграммы видно, на какой режим работы должен быть выбран двигатель, но по ней нельзя решить вопроса о типе двигателя, то есть о том, по какому каталогу он должен быть подобран:

При переменной нагрузке мощность двигателя, определенная по условиям нагрева (методом среднеквадратичной), должна быть проверена на механическую перегрузку и кратковременную перегрузку по току.

Механическая перегрузочная способность двигателя характеризуется отношением максимального момента к номинальному или кратностью максимального момента

$$\mu_k = \frac{M_{\max}}{M_n}.$$

Учитывая возможность снижения напряжения при перегрузках, заводские проспекты рекомендуют, чтобы ни одно из мгновенных значений нагрузочного момента двигателя не доходило до предельного значения  $M_{\max}$ , а было не более (0,7-0,8)  $M_{\max}$ .

При длительной работе электродвигатель проверяют на перегрузочную способность и на пусковой режим, то есть устанавливают, достаточен ли начальный пусковой момент для преодоления статического сопротивления машины в момент трогания и избыточный момент для обеспечения разбега системы электродвигатель - рабочая машина в течение времени, допустимого по условиям производства.

Современные электродвигатели допускают кратковременные перегрузки по току в следующих пределах:

а) машины постоянного тока и коллекторные переменного тока - 50% в течение 1 мин;

б) асинхронные двигатели единой серии мощностью более 0,6 кВт - 50% в течение 2 мин и мощностью менее 0,6 кВт - 50% в течение 1 мин (ГОСТ 183-66).

Колебание напряжения. Пуск короткозамкнутых асинхронных двигателей от генераторов и подстанций малой мощности вызывает большие колебания напряжений в сети, оказывающие сильное влияние на пусковой режим включаемых двигателей и поведение других двигателей, уже работающих. Часто неправильно выбранный двигатель, включенный в сеть маломощной станции или подстанции, не разбегается и вызывает такое большое снижение напряжения в сети, что работающие двигатели останавливаются не будучи в состоянии преодолеть нагрузочные моменты машин. Поэтому при выборе мощности и типа асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором необходимо иметь в виду возможное снижение напряжения на зажимах двигателя.

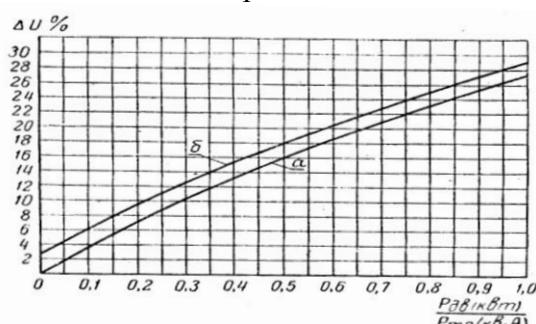


Рис. 142. Кривые потери напряжения в процентах при прямом пуске асинхронных двигателей от силовых трансформаторов:  
а — работающих вхолостую; б — работающих с 50% индуктивной нагрузки.

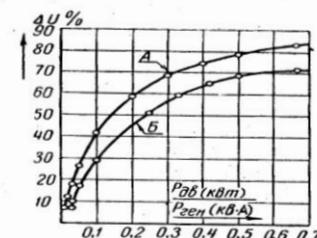


Рис. 143. Кривые потери напряжения в процентах при прямом пуске асинхронных двигателей от синхронных генераторов:  
а — работающих вхолостую;  
б — работающих с 50% индуктивной нагрузки.

Рис. 4 Кривые потери напряжения в процентах

На рисунке 4 приведены кривые зависимости потери напряжения при прямом пуске короткозамкнутых асинхронных двигателей от силовых трансформаторов и синхрон-

ных генераторов без учета потери напряжения в проводах соединительной воздушной линии.

Если воздушная линия имеет достаточную длину и небольшое сечение проводов, то в ней нельзя пренебрегать потерей напряжения. На зажимах двигателя потеря напряжения определяется по формуле:

$$\Delta U = \frac{Z_{TP} + Z_{L}}{Z_{TP} + Z_{L} + Z_{dB}} \cdot 100$$

где  $Z_{TP}$  - полное сопротивление короткого замыкания обмоток трансформатора, Ом;

$Z_{L}$  - полное сопротивление соединительной линии, Ом;

$Z_{dB}$  - полное сопротивление короткого замыкания асинхронного двигателя, Ом.

Для трансформаторов мощностью от 10 до 100 кВ·А  $Z_{TP}$  приведен в таблице 7.1

Таблица 3

Мощность трансформатора, кВт·А	$Z_{TP}$ , Ом
10	0,8
20	0,4
30	0,27
50	0,16
100	0,08

Значения полных сопротивлений соединительной линии  $Z_{L}$  на 1 км длины для наиболее ходовых стандартных сечений проводов приведены в таблице 7.2.

Таблица 4

Марка провода	M10	M16	M25	A16	A25	A35	ПС05	ПС25	ПС35	ПС50
$Z_{L}$ , Ом	1,88	1,27	0,84	2,00	1,34	1,00	12,00	6,70	5,40	3,90

Согласно «Руководящим указаниям по проектированию сельских электроустановок», при пуске асинхронного короткозамкнутого двигателя допускается снижение напряжения на его зажимах до 70% от номинального, если при этом обеспечивается нормальный разбег системы двигатель – рабочая машина. Что же касается отклонения напряжения на зажимах любого из остальных работающих в данной сети электродвигателей, то оно не должно в этом случае снижаться более чем на 20% от номинального напряжения сети.

Когда установка работает изолированно от других токоприемников (электромоторъяба), допустимая потеря напряжения может быть выше 30%. Однако и здесь она определяется условиями запуска включаемого двигателя и нормальной работой ранее включенных двигателей.

По условиям запуска требуется такое напряжение на зажимах электродвигателя, при котором врачающий момент, развиваемый двигателем, превышал бы момент трогания рабочей машины на  $(0,2\dots 0,3)M_n$ . Тогда электродвигатель преодолевает не только момент трогания, но и сможет сообщить начальное ускорение массам двигателя и рабочей машины.

### 1.3 Лекция №3 (2 часа).

Тема: «Конструирование, контроль и диагностика электроприводов»

#### 1.3.1 Вопросы лекции

1. Конструирование электроприводов. Контроль и диагностика электроприводов.
2. Надежность, резервирование, наладка электроприводов.

#### 1.3.2 Краткое содержание вопросов

1. Конструирование электроприводов. Контроль и диагностика электроприводов.

Основной тип электропривода, используемого в отраслях агропромышленного комплекса (АПК), — *асинхронный* мощностью от десятка ватт до 200 кВт. В составе электроприводов мобильных установок с автономным аккумуляторным питанием, а также в качестве электропривода ручного электроинструмента широкое распространение получили *коллекторные электроприводы* с питанием от источников постоянного или переменного тока.

В электроприводах мощностью свыше 100 кВт, используемых, например, в оросительных системах, для электропривода мощных компрессоров и др. преимущественно применяют *синхронные электроприводы*.

С развитием автоматизации управления технологическими процессами АПК нарастает потребность в *регулируемых электроприводах*.

Современные электроприводы АПК, как правило, выполняют полностью *комплектными*. Их нетрудно преобразовать в замкнутые системы автоматического регулирования (САР) (рис 1).

Типичный пример комплектного электропривода (ЭП), широко используемого в составе систем автоматического регулирования, — автоматизированный ЭП отопительно-вентиляционных установок сельскохозяйственных производственных помещений (свинарников, картофелехранилищ, теплиц и т.д.), а также автоматизированный ЭП установок сельскохозяйственного водоснабжения.

Устройство управления электроприводом УУ может быть аппаратным или *программным*, например в виде управляющей микро-ЭВМ или программируемого микроконтроллера.

Современные системы электроприводов максимально удовлетворяют требованиям технологических машин, работающих в самых различных режимах по нагрузкам и частотам вращения. В них применяются специальные и встроенные электроприводы с программным управлением.

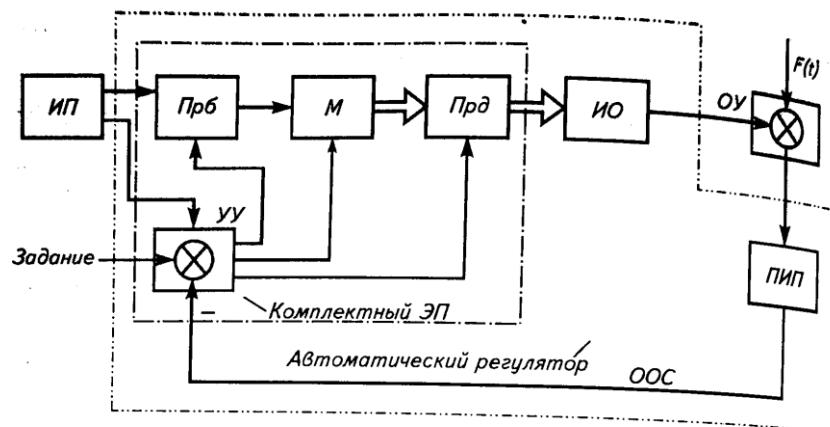


Рис. 1 Функциональная схема автоматического регулятора на основе комплексного электропривода

Электрический привод применяют в различных отраслях сельского хозяйства, а также во вспомогательных производствах, в том числе по обслуживанию и ремонту сельскохозяйственной техники, по первичной переработке разнообразной продукции. Наиболее широко его используют в стационарных процессах производства, и прежде всего в животноводстве и птицеводстве. Именно в этих отраслях сельскохозяйственного производства электрический привод имеет наиболее высокий уровень автоматизации в системах отопления и вентиляции, в установках водоснабжения, приготовления и раздачи кормов. В растениеводстве электрический привод применяют в установках по очистке, сушке и сортировке зерна, при переработке и хранении картофеля и другой плодоовощной продукции. В теплицах и оранжереях электрический привод используют в системах обеспечения микроклимата помещений по выращиванию растений, для привода различных машин и механизмов для обработки почвы, в системах полива и подкормки растений. Применяют электрический привод для привода технологических установок подсобных предприятий и производств агропромышленного сектора, в частности в составе установок производства строительных материалов (пиломатериалов, кирпича, бетона и др.), а также в составе станочного оборудования ремонтных предприятий и мастерских. Многие виды работ в агропромышленном секторе выполняют с использованием инструмента, оснащенного электрическим приводом, что существенно повышает производительность и улучшает условия труда работающих.

Многочисленные технологические установки осуществляют в большинстве случаев однотипные технологические функции: водоснабжения, вентиляции, транспортирования, дробления. Поэтому при рассмотрении электроприводов сельскохозяйственных машин, механизмов и установок целесообразно сгруппировать их по характерным признакам и для каждой группы выделить наиболее значимые из них.

По назначению и конструктивным особенностям рабочих органов, по основным приводным характеристикам и режимам работы электроприводные машины и механизмы, используемые в сельском хозяйстве, условно подразделяют на *восемь характерных групп*: центробежные механизмы;

- грузоподъемные механизмы циклического действия;
- механизмы непрерывного транспорта;
- установки с кривошипно-шатунным механизмом;
- машины и установки первичной обработки продукции;
- мобильные и машинные установки;
- станочное оборудование;
- ручной инструмент.

#### Центробежные механизмы.

К группе электроприводных центробежных механизмов относят: различные центробежные насосы и вентиляторы, центрифуги, молочные сепараторы, ротационные вакуум-насосы, центробежные пневматические транспортеры и др.

Характерные особенности электроприводов центробежных механизмов:

- вентиляторная или близкая к ней механическая характеристика нагрузки;
- методы регулирования производительности (подачи) и инерционные характеристики;
- режимы работы и особенности автоматизации.

Грузоподъемные механизмы циклического действия. Группу электроприводных грузоподъемных механизмов циклического действия представляют всевозможные лебедки, тельферы, кран-балки, различные по назначению краны и экскаваторы с электрическим приводом.

Характерные особенности электроприводов грузоподъемных механизмов циклического действия:

- наличие независящего от скорости активного (однонаправленного) момента - статической нагрузки на валу электродвигателя привода подъема – опускания груза и соответственно оснащение электроприводов тормозными средствами;
- ограниченность области применения груза и соответственно оснащение системы управления путевыми (конечными) выключателями;
- необходимость ограничения ускорений механизма и получение малых скоростей перемещения, в том числе при нагрузках, близких к номинальной;
- малая инерционность электроприводов;
- разнообразие режимов работы и использование толчковых схем управления электроприводами.

**Механизмы непрерывного транспорта.** Особенности группы электроприводов механизмов непрерывного транспорта, которую представляют электроприводы различных конвейеров и транспортеров, а также электроприводы поточно-транспортных линий (ПТЛ) и систем (ПТС):

- наличие замкнутого тягового органа и (или) непрерывная подача груза;
- относительно высокий момент трогания, особенно с нагрузкой;
- слабопеременная либо переменная нагрузка, которая практически не зависит от скорости перемещения грузопотока;
- малая инерционность электропривода;
- взаимосвязанность отдельных электроприводов.

**Установки с кривошипно-шатунным механизмом.** Кривошипно-шатунный механизм служит для преобразования вращательного движения в поступательное и наоборот. Поэтому таким механизмом оснащают технологические установки, в которых необходимо преобразование одного вида движения в другой, например поршневые насосы и компрессоры, пильные рамы, всевозможные прессы, установки штампований, обкатки двигателей внутреннего сгорания и др.

Характерные особенности электропривода с кривошипно-шатунным механизмом:

- переменный момент инерции, степень неуравновешенности которого зависит от значения дополнительных маховых масс;
- затрудненные условия пуска, связанные, в частности, не только со значением нагрузки при пуске, а и с положением шатуна механизма относительно оси вращения кривошипа;
- необходимость применения дополнительных маховых масс и электродвигателей с мягкой механической характеристикой.

**Машины и установки первичной обработки продукции.** Как правило, большинство видов продукции растениеводства, животноводства и других отраслей сельского хозяйства подвергают первичной переработке непосредственно на местах ее производства. Кроме того, подобные установки используют для приготовления кормов, для предпосевной обработки семян различных культур и др. С этой целью применяют соответствующие специальные технологические агрегаты и установки с электрическим приводом.

Отличительные особенности данной многообразной группы электроприводов:

- большое разнообразие нагрузок случайно переменного характера;
- наличие нескольких рабочих органов в одном агрегате; необходимость в ручном или автоматическом регулировании загрузки.

**Мобильные машины и установки.** Электрический привод имеет ряд существенных преимуществ перед тепловым приводом на основе двигателей внутреннего сгорания (ДВС). По этой причине электропривод стал основным в стационарных технологических установках, его используют для привода мобильных машин и механизмов, где преобладающее значение имеет тепловой привод от ДВС. В частности, электроприводом оснащают различные мобильные раздатчики кормов, внутри складской и цеховой электротранспорт в виде электрокар, электромобилей и электропогрузчиков, энергонасыщенные мобильные установки с электротрансмиссией и др.

- Отличительные особенности электропривода мобильных установок и машин:
- способ электропитания централизованный или автономный;
  - вид электропитания (кабельный, троллейный, аккумуляторный, конденсаторный, электротрансмиссия и др.);
  - необходимость реверсирования и регулирования скорости движения в широком диапазоне;
  - большой диапазон неоднозначных нагрузок.

**Станочное оборудование.** Специализированное станочное оборудование с электрическим приводом используют в металлообрабатывающих и деревообрабатывающих мастерских и на вспомогательных производствах.

Характерные особенности этой группы электроприводных установок:

- большое разнообразие режимов работы электроприводов по нагрузке;
- использование комплектного унифицированного электрооборудования;
- строгое поддержание заданного технологического процесса.

**Ручной инструмент.** Ручные электрифицированные машины в виде различного электроинструмента используют в различных отраслях и вспомогательных производствах сельского хозяйства. Это прежде всего ручные стригальные машинки с электрическим приводом, электроинструмент по уходу за садовыми и овощными культурами, различные электродрели, режущие и шлифующие электрические машинки, электропилы и многое другое.

Отличительные особенности этой группы электроприводов:

- повышенная опасность поражения электрическим током и ухудшенные условия охлаждения, так как электроинструмент находится в руках работающего;
- неоднозначность нагрузок и режимов работы, которые определяются в значительной степени физическими данными работающего с электроинструментом и его квалификацией;
- широкий диапазон возможных условий окружающей среды.

Следует рассматривать электроприводы, используемые в сельском хозяйстве, именно по приводным характеристикам и особенностям работы, так как это позволяет выделить наиболее существенные свойства ЭП каждой группы.

## 2. Надежность, резервирование, наладка электроприводов.

Необходимость в периодическом ремонте и обслуживании различной автотракторной и сельскохозяйственной техники, обеспечение всевозможных производств строительными материалами обусловили создание в структуре агропромышленного комплекса соответствующих ремонтных заводов, мастерских, цехов и производственных участков, оснащенных необходимым станочным оборудованием. Электрооборудование используемых станков в основном состоит из электропривода и системы местного освещения которыми станок комплектует изготовитель. Электропривод станков характеризуется многообразием возможных режимов работы по нагрузке от S1 до S8, необходимостью плавного или ступенчатого регулирования частоты вращения основных рабочих органов и их позиционирования. Преобладающий режим работы электроприводов главного привода станков по нагрузке — перемещающийся S6.

По основному виду обрабатываемого материала станки подразделяют на *деревообрабатывающие* и *металлообрабатывающие*. По характеру выполняемой работы различают станки *сверлильные*, *токарные*, *фрезерные* и пр. В мастерских сельскохозяйственного производства наибольшее распространение получили универсальные станки, позволяющие на одном станке выполнять различные виды станочных работ.

Для ряда станков по обработке материалов резанием (особенно круглопильных, ленточнопильных, фрезерных, шлифовальных) характерны высокие скорости резания:

20...100 м/с. В связи с большими скоростями резания рабочие валы таких станков имеют повышенные частоты вращения: 3...6 тыс. об/мин.

**Сверлильные станки.** Они предназначены для сверления и дальнейшей обработки отверстий. По расположению шпинделя их подразделяют на: *вертикальные* и *горизонтальные*, с постоянным положением оси шпинделя и радиальные. По числу шпинделей различают *одношпиндельные* и *многошпиндельные* станки.

Вертикально-сверлильный станок (рис. 9.2) — наиболее распространенный тип станка для дерево- и метало- обработки. Его используют для получения и обработки отверстий. Инструмент (сверло, зенкер, развертка и др.) закрепляют в вертикальном шпинделе, деталь — на столе станка. Оси обрабатываемого отверстия и инструмента совмещают перемещением детали. Для подготовки и обработки отверстий диаметром до 12 мм используют одношпиндельные настольные станки. Тяжелые и крупногабаритные детали а также детали с отверстиями, расположеннымными по дуге окружности обрабатывают на радиально-сверлильных станках. В деревообработке полмили распространение одно- и многошпиндельные вертикальные и горизонтальные сверлильные станки и станки с поворотным шпинделем, который может располагаться вертикально и горизонтально. На деревообрабатывающих станках сверлят отверстия, делают пазы, гнезда, удаляют сучки и т. п.

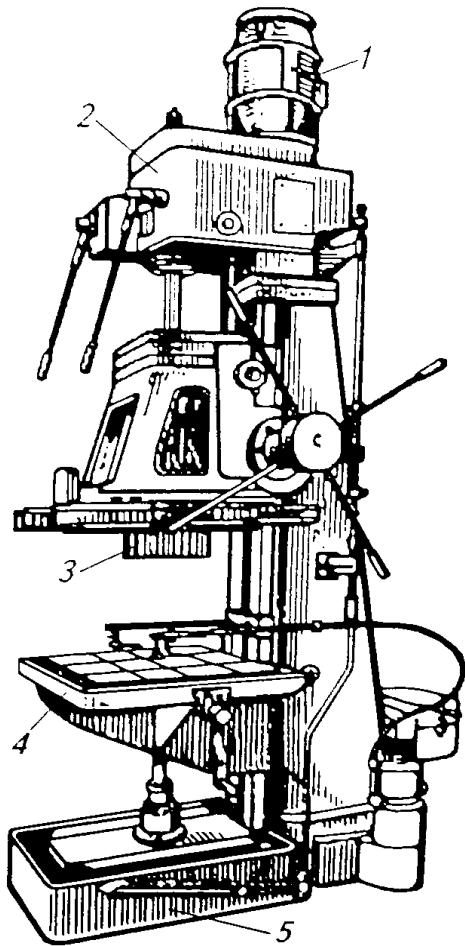


Рис. 2 Общий вид вертикально – сверлильного станка: 1 – электродвигатель привода; 2 – редуктор; 3 – шпиндель; 4 – вертикально перемещаемый стол; 5 – станина.

**Электроприводные токарные станки.** Их используют для изготовления и обработки деталей резанием, представляющих собой тела вращения. Применяя специальные приспособления, на токарном станке можно фрезеровать, шлифовать, нарезать зубья и др. В составе электропривода главного движения токарного станка используют одно- или много-

скоростные асинхронные электродвигатели и многоступенчатые коробки скоростей или механический вариатор, либо регулируемый электропривод постоянного тока с коробкой скоростей.

Электроприводные фрезерные станки. Их применяют для изготовления и обработки резанием при помощи различных фрез плоских изделий, плоских и фасонных поверхностей, пазов, уступов, поверхностей тел вращения, зубьев, зубчатых колес и т. п.

Оптимальная скорость резания. На станках по обработке материалов резанием изделия обрабатывают при оптимальной скорости резания, которая зависит от твердости обрабатываемого материала, геометрических размеров режущего инструмента и обрабатываемого изделия, а также от характера обработки (предварительная, грубая или чистовая). Например, на сверлильных или токарных станках соответственно с изменением диаметра сверла или диаметра обрабатываемой заготовки  $d$ , мм, при постоянной частоте вращения сверла или заготовки  $n$ , об/мин, будет изменяться и скорость резания, которую можно представить в виде, м/мин:

$$v_{pes} = \frac{\pi d n}{100},$$

где  $\pi = 3.14$ .

Из анализа следует, что для поддержания оптимальной скорости резания или в области оптимальной скорости резания необходимо с изменением диаметра сверла сверлильного станка, фрезы фрезерного станка или диаметра заготовки токарного станка измерять их длину вращения плавно или по минимуму ступенчато. На многих станках до настоящего времени по экономическим соображениям применяют односкоростные асинхронные электроприводы с короткозамкнутыми двигателями.

Мощность нагрузки  $P_x$ , Вт, на валу электродвигателя главного привода станка для обработки материалом резанием определяют на основе нагрузочной диаграммы двигателя, которую рассчитывают по наиболее напряженному по нагрузке технологическому процессу для рассматриваемого станка:

$$P_x = \frac{F_{pes} v_{pes}}{60 \eta_{\Pi}},$$

где  $F_{pes}$  - усилие резания, Н;  $v_{pes}$  - технологическая скорость резания, м/мин;  $\eta_{\Pi}$  - КПД механической передачи станка, принимаемый 0.7...0.85 для станков с вращательным движением рабочих органов и 0.4...0.5 для станков с вращательно-поступательным движением.

Электроинструмент используют в металлообработке. Для механизации процесса рубки металлов применяют электрические рубильные молотки, у которых вращение вала электродвигателя преобразуется в возвратно-поступательное движение зубила, закрепленного на конце ударника. При резке металлов используют различные электрические ножовки, дисковые пилы, при резке листовой стали толщиной до 3 мм — электрические ножницы вибрационного типа, производительность которых достигает 3...6 м/мин. Они особенно удобны при резке по фигурному раскрою.

Для сверления и развертывания отверстий используют ручные сверлильные машины (электродрели) различных типов: легкие, средние и тяжелые для обработки отверстий диаметром соответственно до 9, 14 и 32 мм и угловые - для обработки отверстий в труднодоступных местах.

Для механизации процесса нарезания резьбы применяют электрорезьбонарезатели, оснащенные специальными насадками. При шабрении используют электромеханические шаберы и электрические шабровочные головки.

В деревообработке наиболее распространены:

- дисковые электропилы;
- цепные электропилы;
- электрорубанки;
- электрофрезы;
- электросверла;
- электродолбенки;
- сучкорезки.

Для выполнения различных сборочных и вспомогательных работ используют гайковерты, лобзики, шуруповерты, электромолотки, трамбовки и многое другое. Для обработки почвы в сооружениях защищенного грунта используют электромотыги и электрофрезы, применение которых позволяет существенно облегчить и в несколько раз увеличить производительность труда по сравнению с ручной обработкой почвы.

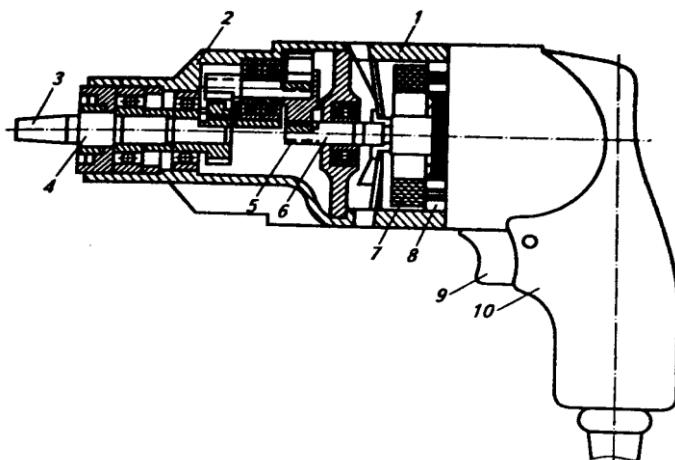


Рис. 3 Конструкция электродрели:

1 – корпус; 2, 5 – зубчатые пары редуктора; 3 – конус; 4 – рабочий вал; 6 – ведущий вал; 7 – статор; 8 – ротор; 9 – выключатель; 10 – рукоятка.

**Электродрели.** Наиболее распространенный вид ручных машин с электрическим приводом — сверлильный (электродрели). Их основное исполнение — *прямые односкоростные*. Кроме того, имеются *многоскоростные со ступенчатым и с плавным регулированием частоты вращения, ударно-вращательные* (перфораторы). Действующим стандартом установлены сверлильные машины по максимальному диаметру сверла: 6, 8, 9(10), 13(14), 23 и 32 мм. В машинах до 13 мм сверло закрепляют в патроне, насаженном на укороченном конусе шпинделя. В машинах 14...32 мм сверло устанавливают во внутренний конус шпинделя. В ряде случаев рассматривают различные приспособления и насадки, которые расширяют область применения сверлильных машин. На рисунке 9.3 приведена одна из возможных типовых конструкций электродрели. При необходимости плавное регулирование частоты вращения электродрели достигают применением встроенного в ручку дрели тиристорного регулятора напряжения. При этом курок выключателя воздействует на переменный резистор, являющийся задатчиком выходного напряжения тиристорного регулятора, на выходное напряжение которого включен электродвигатель привода дрели.

Ударно-вращательные сверлильные машины предназначены для сверления отверстий в камне, кирпиче, бетоне. Производительность при обработке этих материалов возрастает, когда резание сочетается с ударным скальванием.

**Шлифовальные и режущие электроприводные инструменты.** Их используют для обработки изделий шлифованием и полированием, строганием и для раскряя различных материалов с использованием соответствующих сменных насадок. Эти ручные машины, как правило, имеют защитный кожух, охватывающий режущий диск на дуге до  $180^\circ$  с указанием направления вращения шпинделя. Их выпускают на стандартизованные размеры

режущих дисков: 40, 63,80, 100, 125, 150(180) и 200(230) мм. При этом скорость резания достигает 50...80 м/с.

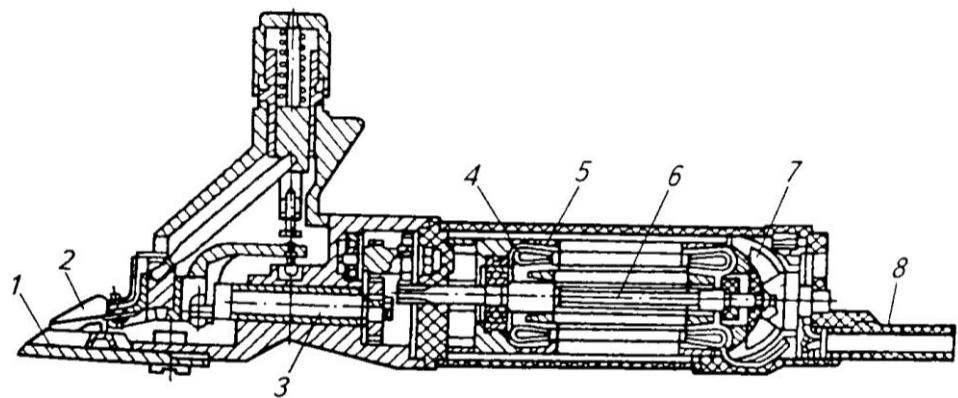


Рис. 4 Конструкция электроприводной машинки для стрижки овец типа МСУ – 200:

1 – гребенка; 2 – нож; 3 – вал привода; 4, 5, 6 – корпус, статор и ротор электродвигателя с приводной шестерней; 7 – вентилятор; 8 – шнур питания.

Высокочастотные стригальные электромашинки. Для электромеханизации трудоемкого процесса стрижки овец на овцеводческих фермах используют высокочастотные стригальные электромашинки типа МСУ-200 с приводом от трехфазного асинхронного двигателя с частотой 200 Гц, напряжением 36 В и мощностью 115 Вт (рис.9.4)

При питании электропривода стригальной машинки используют шнур от машинного или полупроводникового преобразователя частоты. При этом ее режущий аппарат совершает 2200 двойных ходов в минуту. В частности, за счет этого обеспечивается производительная и качественная стрижка.

#### 1.4 Лекция №4 (2 часа).

**Тема:** «Применение современных микропроцессорных преобразователей в частотно-регулируемых электроприводах»

##### 1.4.1 Вопросы лекции

1. Микропроцессорная техника. Применение микроконтроллеров в преобразователях. Принцип построения преобразователей частоты для электропривода.

2. Принципиальные схемы подключения преобразователя частоты и электрического двигателя. Экономическая эффективность от внедрения частотно-регулируемых электроприводов.

##### 1.4.2 Краткое содержание вопросов

1. Микропроцессорная техника. Применение микроконтроллеров в преобразователях. Принцип построения преобразователей частоты для электропривода.

Микроконтроллер (англ. *Micro Controller Unit, MCU*) — микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами. Типичный микроконтроллер сочетает на одном кристалле функции процессора и периферийных устройств, содержит ОЗУ или ПЗУ. По сути, это однокристальный компьютер, способный выполнять простые задачи.

С появлением однокристальных микро-ЭВМ связывают начало эры массового применения компьютерной автоматизации в области управления. По-видимому, это об-

стоятельство и определило термин «контроллер» (англ. *controller* — регулятор, управляющее устройство).

В связи со спадом отечественного производства и возросшим импортом техники, в том числе вычислительной, термин «микроконтроллер» (МК) вытеснил из употребления ранее использовавшийся термин «однокристальная микро-ЭВМ».

Первый патент на однокристальную микро-ЭВМ был выдан в 1971 году инженерам М. Кочрену и Г. Буну, сотрудникам американской Texas Instruments. Именно они предложили на одном кристалле разместить не только процессор, но и память с устройствами ввода-вывода.

При проектировании микроконтроллеров приходится соблюдать баланс между размерами и стоимостью с одной стороны и гибкостью и производительностью с другой. Для разных приложений оптимальное соотношение этих и других параметров может различаться очень сильно. Поэтому существует огромное количество типов микроконтроллеров, отличающихся архитектурой процессорного модуля, размером и типом встроенной памяти, набором периферийных устройств, типом корпуса и т. д. В отличие от обычных компьютерных микропроцессоров, в микроконтроллерах часто используется гарвардская архитектура памяти, то есть раздельное хранение данных и команд в ОЗУ и ПЗУ соответственно.

Кроме ОЗУ, микроконтроллер может иметь встроенную энергонезависимую память для хранения программы и данных. Во многих контроллерах вообще нет шин для подключения внешней памяти. Наиболее дешёвые типы памяти допускают лишь однократную запись. Такие устройства подходят для массового производства в тех случаях, когда программа контроллера не будет обновляться. Другие модификации контроллеров обладают возможностью многократной перезаписи энергонезависимой памяти.

Неполный список периферии, которая может присутствовать в микроконтроллерах, включает в себя:

- универсальные цифровые порты, которые можно настраивать как на ввод, так и на вывод;
- различные интерфейсы ввода-вывода, такие как UART, I<sup>2</sup>C, SPI, CAN, USB, IEEE 1394, Ethernet;
- аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи;
- компараторы;
- широтно-импульсные модуляторы;
- таймеры;
- контроллеры бесколлекторных двигателей;
- контроллеры дисплеев и клавиатур;
- радиочастотные приемники и передатчики;
- массивы встроенной флеш-памяти;
- встроенный тактовый генератор и сторожевой таймер;

Ограничения по цене и энергопотреблению сдерживают также рост тактовой частоты контроллеров. Хотя производители стремятся обеспечить работу своих изделий на высоких частотах, они, в то же время, предоставляют заказчикам выбор, выпуская модификации, рассчитанные на разные частоты и напряжения питания. Во многих моделях микроконтроллеров используется статическая память для ОЗУ и внутренних регистров. Это даёт контроллеру возможность работать на меньших частотах и даже не терять данные при полной остановке тактового генератора. Часто предусмотрены различные режимы энергосбережения, в которых отключается часть периферийных устройств и вычислительный модуль.

Использование в современном микроконтроллере достаточного мощного вычислительного устройства с широкими возможностями, построенного на одной микросхеме вместо целого набора, значительно снижает размеры, энергопотребление и стоимость по-

строенных на его базе устройств. Используются в управлении различными устройствами и их отдельными блоками:

- в вычислительной технике: материнские платы, контроллеры дисководов жестких и гибких дисков, CD и DVD;
- в электронике и разнообразных устройствах бытовой техники, в которой используется электронные системы управления — стиральных машинах, микроволновых печах, посудомоечных машинах, телефонах и современных приборах;

В промышленности:

- устройств промышленной автоматики — от программируемого реле и встраиваемых систем до ПЛК,
- систем управления станками

В то время как 8-разрядные процессоры общего назначения полностью вытеснены более производительными моделями, 8-разрядные микроконтроллеры продолжают широко использоваться. Это объясняется тем, что существует большое количество применений, в которых не требуется высокая производительность, но важна низкая стоимость. В то же время, есть микроконтроллеры, обладающие большими вычислительными возможностями, например цифровые сигнальные процессоры.

Программирование микроконтроллеров обычно осуществляется на языке ассемблера или Си, хотя существуют компиляторы для других языков, например, Форта. Используются также встроенные интерпретаторы Бейсика.

Известные компиляторы Си для МК:

- CodeVisionAVR (для AVR)
- IAR [1] (для любых МК)
- WinAVR (для AVR и AVR32)
- Keil (для архитектуры 8051 и ARM)
- HiTECH (для архитектуры 8051 и PIC от Microchip)

Для отладки программ используются программные симуляторы (специальные программы для персональных компьютеров, имитирующие работу микроконтроллера), внутрисхемные эмуляторы (электронные устройства, имитирующие микроконтроллеры, которые можно подключить вместо него к разрабатываемому встроенному устройству) и интерфейс JTAG.

Частотно-регулируемый привод (частотно-управляемый привод, ЧУП, Variable Frequency Drive, VFD) — система управления частотой вращения ротора асинхронного (или синхронного) электродвигателя. Состоит из собственно электродвигателя и частотного преобразователя.

Частотный преобразователь (преобразователь частоты) — это устройство состоящее из выпрямителя (моста постоянного тока), преобразующего переменный ток промышленной частоты в постоянный, и инвертора (преобразователя) (иногда с ШИМ), преобразующего постоянный ток в переменный требуемых частоты и амплитуды. Выходные тиристоры (GTO) или транзисторы IGBT обеспечивают необходимый ток для питания электродвигателя. Для исключения перегрузки преобразователя при большой длине фидера между преобразователем и фидером ставят дроссели, а для уменьшения электромагнитных помех — EMC-фильтр.

При **скалярном управлении** формируются гармонические токи фаз двигателя. **Векторное управление** — метод управления синхронными и асинхронными двигателями, не только формирующим гармонические токи (напряжения) фаз, но и обеспечивающим управление магнитным потоком ротора (моментом на валу двигателя).

Классический метод управления подачей насосных установок предполагает дросселирование напорных линий и регулирование количества работающих агрегатов по какому-либо техническому параметру (например, давлению в трубопроводе). Насосные агрегаты в этом случае выбираются исходя из неких расчётных характеристик (как правило, с запасом по производительности) и постоянно функционируют с постоянной частотой

вращения, без учета изменяющихся расходов, вызванных переменным водопотреблением. При минимальном расходе насосы продолжают работу с постоянной частотой вращения, создавая избыточное давление в сети (причина аварий), при этом бесполезно расходуется значительное количество электроэнергии. Так, к примеру, происходит в ночное время суток, когда потребление воды резко падает. Основной эффект достигается не за счет экономии электроэнергии, а благодаря существенному уменьшению расходов на ремонт водопроводных сетей.

Появление регулируемого электропривода позволило поддерживать постоянное давление непосредственно у потребителя. Широкое применение в мировой практике получило частотно регулируемый электропривод с асинхронным электродвигателем общепромышленного назначения. В результате адаптации общепромышленных асинхронных двигателей к их условиям эксплуатации в управляемых электроприводах создаются специальные регулируемые асинхронные двигатели с более высокими энергетическими и массогабаритностоимостными показателями по сравнению с неадаптированными. Частотное регулирование скорости вращения вала асинхронного двигателя осуществляется с помощью электронного устройства, которое принято называть частотным преобразователем. Вышеуказанный эффект достигается путем изменения частоты и амплитуды трёхфазного напряжения, поступающего на электродвигатель. Таким образом, меняя параметры питающего напряжения (частотное управление), можно делать скорость вращения двигателя как ниже, так и выше номинальной. Во второй зоне (частота выше номинальной) максимальный момент на валу обратно пропорционален скорости вращения.

Метод преобразования частоты основывается на следующем принципе. Как правило, частота промышленной сети составляет 50 Гц. Для примера возьмём насос с двухполюсным электродвигателем. С учетом скольжения скорость вращения двигателя составляет около 2800 (зависит от мощности) оборотов в минуту и даёт на выходе насосного агрегата номинальный напор и производительность (так как это его номинальные параметры, согласно паспорту). Если с помощью частотного преобразователя понизить частоту и амплитуду подаваемого на него переменного напряжения, то соответственно понизится скорость вращения двигателя, и, следовательно, изменится производительность насосного агрегата. Информация о давлении в сети поступает в блок частотного преобразователя от специального датчика давления, установленного у потребителя, на основании этих данных преобразователь соответствующим образом меняет частоту, подаваемую на двигатель.

Современный преобразователь частоты имеет компактное исполнение, пыле- и влагозащищённый корпус, удобный интерфейс, что позволяет применять его в самых сложных условиях и проблемных средах. Диапазон мощности весьма широк и составляет от 0,18 до 630 кВт и более при стандартном питании 220/380 В и 50-60 Гц. Практика показывает, что применение частотных преобразователей на насосных станциях позволяет:

- экономить электроэнергию (при существенных изменениях расхода), регулируя мощность электропривода в зависимости от реального водопотребления (эффект экономии 20-50 %);
- снизить расход воды, за счёт сокращения утечек при превышении давления в магистрали, когда расход водопотребления в действительности мал (в среднем на 5 %);
- уменьшить расходы (основной экономический эффект) на аварийные ремонты оборудования (всей инфраструктуры подачи воды за счет резкого уменьшения числа аварийных ситуаций, вызванных в частности гидравлическим ударом, который нередко случается в случае использования нерегулируемого электропривода (доказано, что ресурс службы оборудования повышается минимум в 1,5 раза);
- достичь определённой экономии тепла в системах горячего водоснабжения за счёт снижения потерь воды, несущей тепло;
- увеличить напор выше обычного в случае необходимости;

- комплексно автоматизировать систему водоснабжения, тем самым снижая фонд заработной платы обслуживающего и дежурного персонала, и исключить влияние «человеческого фактора» на работу системы, что тоже немаловажно.

По имеющимся данным срок окупаемости проекта по внедрению преобразователей частоты составляет от 3 месяцев до 2 лет.

Во многих установках на регулируемый электропривод возлагаются задачи не только плавного регулирования момента и скорости вращения электродвигателя, но и задачи замедления и торможения элементов установки. Классическим решением такой задачи является система привода с асинхронным двигателем с преобразователем частоты, оснащённым тормозным переключателем с тормозным резистором.

При этом в режиме замедления/торможения электродвигатель работает как генератор, преобразуя механическую энергию в электрическую, которая в итоге рассеивается на тормозном резисторе. Типичными установками, в которых циклы разгона чередуются с циклами замедления являются тяговый привод электротранспорта, подъёмники, лифты, центрифуги, намоточные машины и т. п. Функция электрического торможения вначале появилась на приводе постоянного тока (например, троллейбус). В конце XX века появились преобразователи частоты со встроенным рекуператором, которые позволяют возвращать энергию, полученную от двигателя, работающего в режиме торможения, обратно в сеть. В этом случае, установка начинает «приносить деньги» фактически сразу после ввода в эксплуатацию.

## **2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

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

**Тема:** «Исследование механической характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя в режиме динамического торможения»

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

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

**2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** универсальный фронтальный стенд в 210

### **2.1.4 Описание (ход) работы:**

## Собираем схему экспериментальной установки

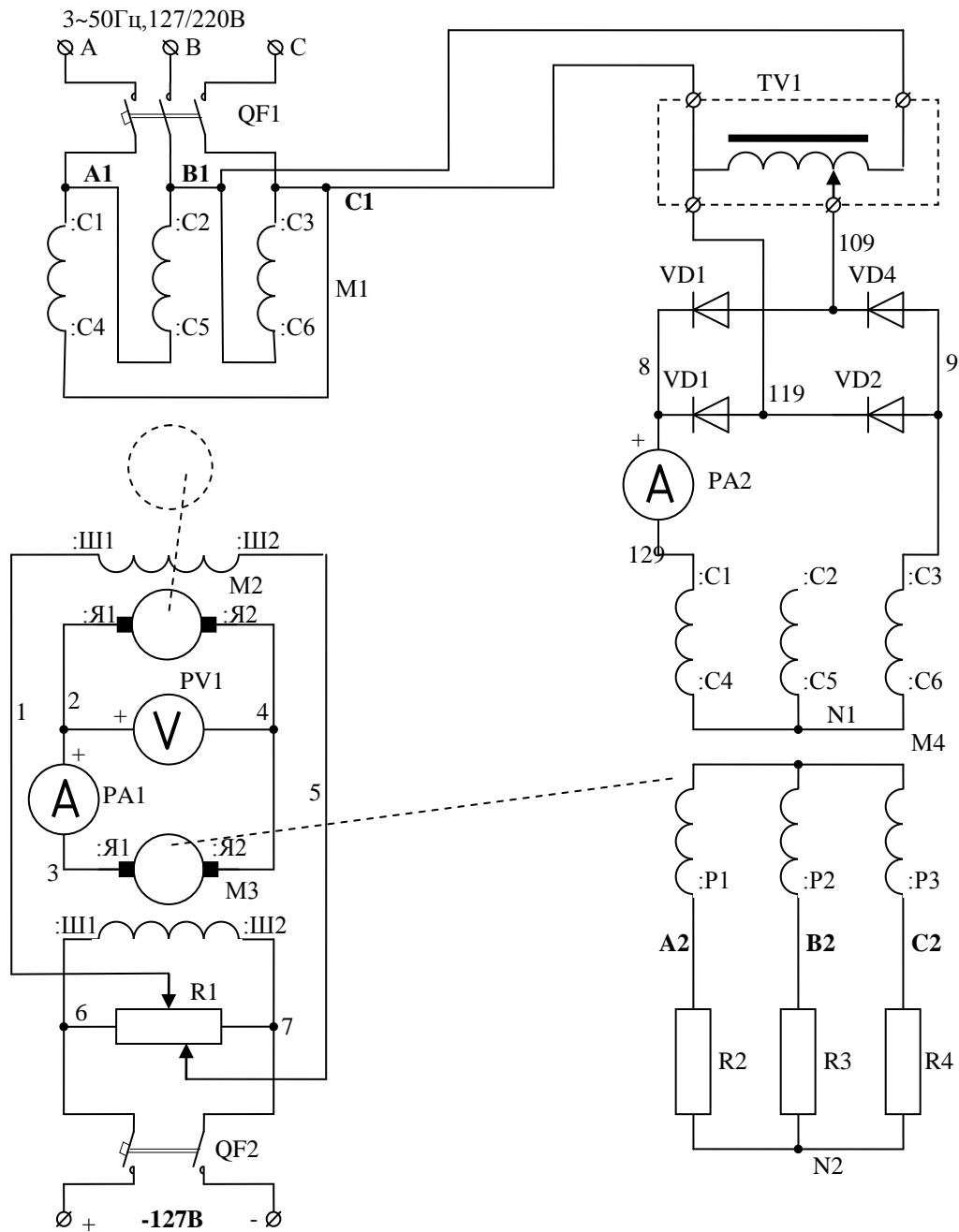


Рис. 1: Принципиальная схема установки для испытания электродвигателя.

### 3. Записываем порядок запуска установки

- а) Движок автотрансформатора устанавливается в нулевое положение (против часовой стрелки до упора), а движки потенциометра - напротив друг друга.
  - б) Подключается требуемое для снимаемой характеристики сопротивление в цепь ротора испытуемого электродвигателя М4;
  - в) Подаётся напряжение на обмотки возбуждения машин постоянного тока включением автоматического выключателя QF2.
  - г) Включается автоматический выключатель QF1, тем самым запускается спарка М1-М2;

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

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

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

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

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

*Распределяются исполнители*

Таблица 1

№ точки	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$M_{ш}$ , дел.	$n$ , об/мин	$M=15,8 \sin(180\frac{M_{ш}}{135\pi})$ , Нм	$\omega=\pi n/30$ , 1/с	$P_B=M\omega$ , Вт	$P_{\mathcal{D}2,3}=U_1 I_1$ , Вт	$\eta_3=P_B/P_{\mathcal{D}2,3}$
1	-130	-12	-58	1 2 9 0					
2	-115	-12	-56	1 1 6 0					
3	-100	-12	-55	1 1 5 0					
4	-85	-12	-55	1 0 4 0					
5	-70	-10	-49	7 8 0					
6	-55	-9	-44	6 1 0					
7	-40	-8	-40	5 2 0					
8	-25	-7	-30	2 8 0					

9	25	8	30	2 2 0				
10	40	11	40	5 0 0				
11	55	12	45	7 0 0				
12	70	14	50	9 2 5				
13	85	15	60	1 2 1 0				
14	100	16	62	1 2 5 0				
15	115	17	73	1 3 0 0				
16	130	18	77	1 3 3 0				

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

Таблица 2

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

## 7. Строим графики механических характеристик

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

*В таком же порядке строится вторая характеристика.*

*Оставить место для графиков*

## 8. Осуществляем сравнение опытных и теоретических данных

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

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

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

**2.2.1 Цель работы:** Изучить схему реверсивного управления 3-х фазным асинхронным электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия реле контроля скорости, научиться производить сборку схемы, убедиться в эффективности функционирования схемы.

**2.2.2 Задачи работы:** Собрать схему управления электродвигателем и испытать её в лабораторных условиях.

**2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** Материальное обеспечение - универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 210 (источник питания 3-х фазного переменного тока 220/380В; реле контроля скорости на панели №55; магнитный пускатель на панели №43; асинхронный электродвигатель на панели №55; трёхкнопочный пост управления на панели №24б),

#### 2.2.4 Описание (ход) работы:

## Собираем электрическую схему:

3~50Гц,380/220В

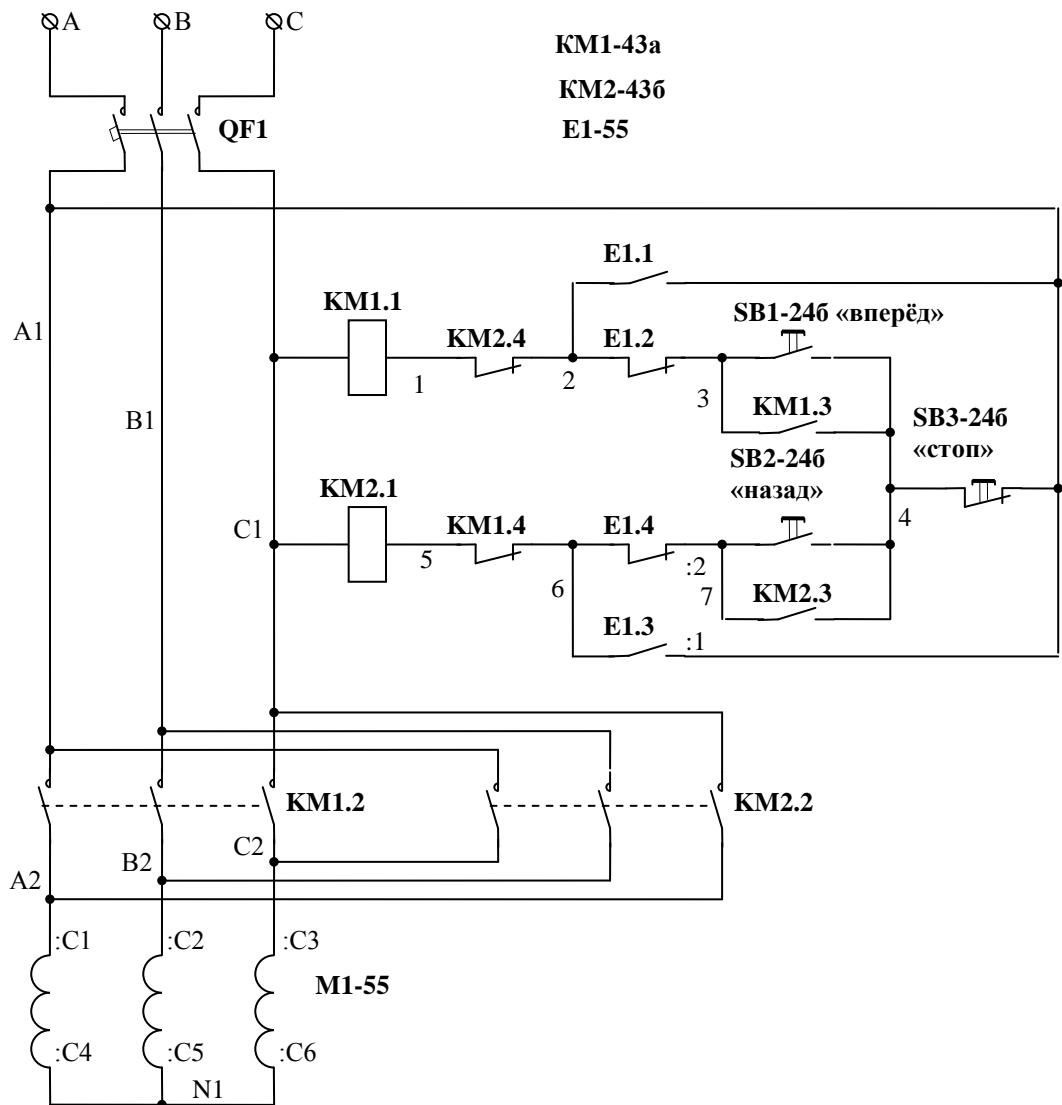


Рис. 1: Схема управления электродвигателем.

### 3. Осуществляем испытание схемы

1. объясняет, что произойдёт в схеме при включении  $QF1$ . подаёт напряжение и убеждает всех присутствующих в истинности им провозглашённого.

2. объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB1 и показывает работу схемы при данном воздействии.

3. объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB2, демонстрирует сказанное.

4. объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB3, демонстрирует сказанное

5. объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB2, демонстрирует сказанное.

7. демонстрирует работу схемы после нажатия кнопки SB3, предварительно объяснив ожидаемую реакцию схемы.

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

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

**2.3.1 Цель работы:** Изучить схему управления электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия реле обрыва фазы типа Е511, научиться производить сборку схемы, убедиться в эффективности функционирования схемы.

**2.3.2 Задачи работы:** Собрать схему управления электродвигателем и испытать её в лабораторных условиях.

**2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**  
Материальное обеспечение - универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 210 (источник питания 3-х фазного переменного тока 220/380В; реле обрыва фазы на панели №35; магнитный пускатель на панели №49; тепловое реле типа ТРН на панели №33; два двухкнопочных поста управления на панелях №23 и №24; один трёхкнопочный пост управления на панели №23; асинхронный электродвигатель на панели №51), плакат «Управление электродвигателем из двух мест с защитой от обрыва фазы».

#### **2.3.4 Описание (ход) работы:**

Собираем схему экспериментальной установки

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

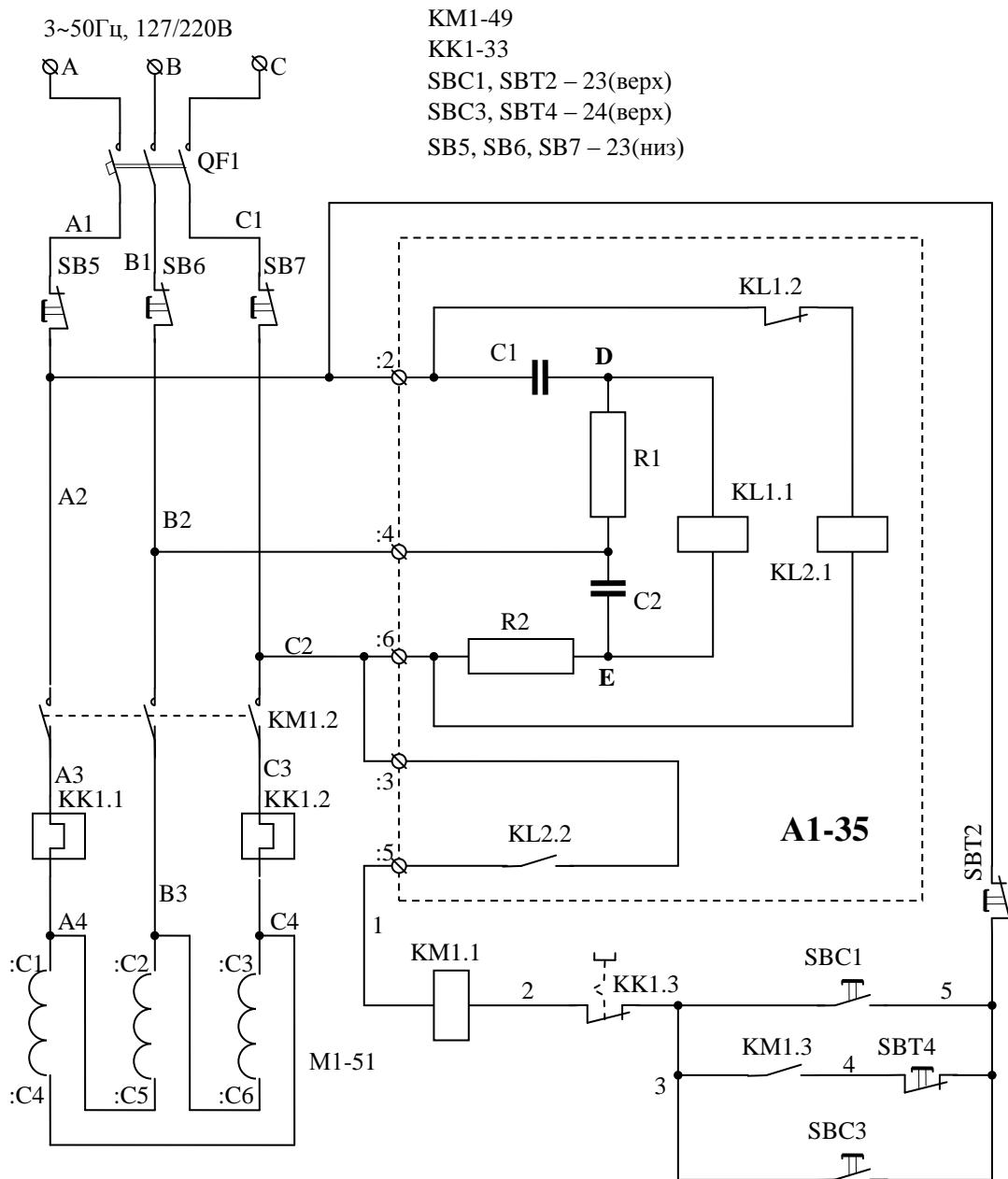


Рис. 1: Схема включения электродвигателя с возможностью управления из двух мест.

### 3. Осуществим испытание схемы

1. Объясняет, что произойдёт в схеме при включении  $QF1$ . подаёт напряжение и убеждает всех присутствующих в истинности им провозглашённого.

2. Объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки  $SBC1$ , а затем - кнопки  $SBT2$ ; убеждает присутствующих в достоверности предсказания. То же самое проделывает с кнопками  $SBC3$  и  $SBT4$ .

3. Демонстрирует возможности независимого управления из двух мест, включая электродвигатель в одном месте, а отключая в другом: нажимает сначала  $SBC1$ , а затем  $SBT4$ . Далее нажимает  $SBC3$ , а затем  $SBT2$ .

4. Демонстрирует работу реле обрыва фазы: включает электродвигатель, а затем обрывает фазу **A**, нажав на кнопку  $SBT5$ . То же самое проделывает с фазами **B** и **C**.

Меняет местами фазы **В** и **С**, убеждает аудиторию, что включения электродвигателя в обратную сторону не происходит. Детально объясняет аудитории, что происходило в схеме при каждом из его действий.

5. Демонстрирует работу теплового реле: включает электродвигатель, доказывает присутствующим, что тепловое реле должно сработать, и терпеливо ожидает свершения этого предсказания.

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

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

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

**2.4.2 Задачи работы:** Собрать схему управления электродвигателем и испытать её в лабораторных условиях.

**2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**  
Материальное обеспечение - универсальный лабораторный стенд, расположенный в аудитории 210 (источник питания 3-х фазного переменного тока 220/380В; реле времени на панели №32а; реверсивный магнитный пускатель на панели №44; трёхкнопочный пост управления на панели №23б; двухкнопочный пост управления на панели №23а; асинхронный электродвигатель на панели №55; плакат; амперметр на панели №14а; вольтметр переменного тока на панели №16б; реле тока на панели №32б; реле промежуточное на панели №30а; предохранитель на панели №18.

#### **2.4.4 Описание (ход) работы:**

Соберём электрическую схему

*Сидоров – собирает узел 1; Козлов – узел 2 и так далее. Во время сборки осуществляется перечерчивание схемы с плаката в тетради.*

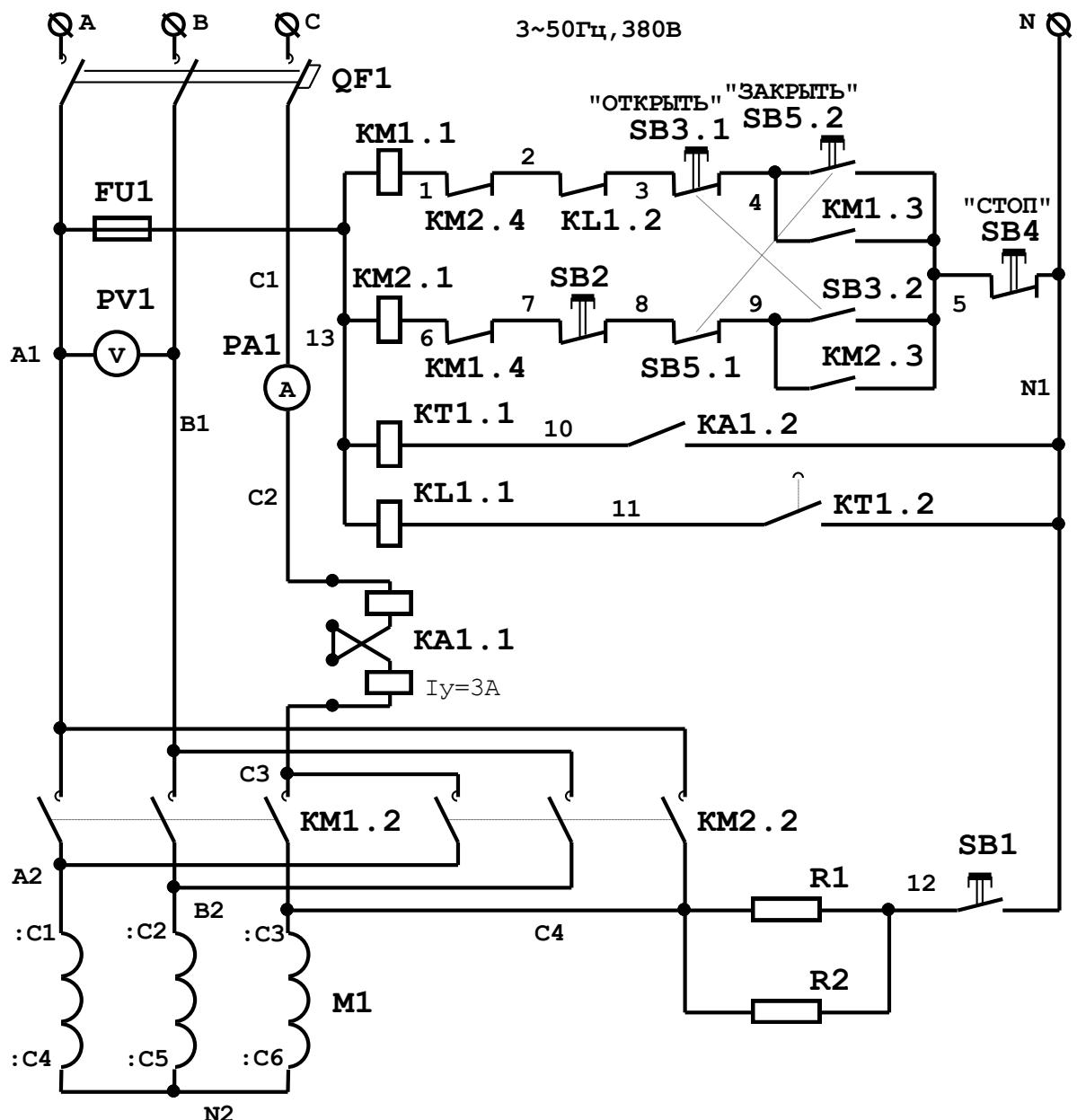


Рис. 1: Принципиальная схема реверсивного управления асинхронным электродвигателем с использованием реле тока.

Расположение выводов элементов реле времени и реле тока приведено на таблицах. Монтажная схема промежуточного реле изображена ниже.

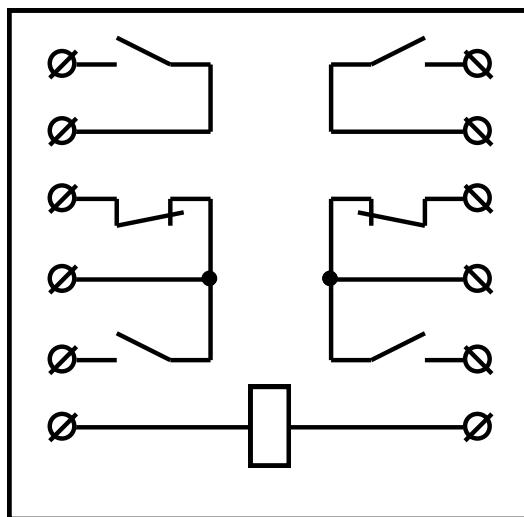


Рис.2: Монтажная схема промежуточного реле.

Работает схема следующим образом. При включении автоматического выключателя QF1 напряжение сети подаётся на вход силовых контактов KM1.2 и KM2.2 магнитных пускателей KM1 и KM2, а также через предохранитель FU1 на схему управления. Так как силовые контакты и контакты в цепи управления разомкнуты, ток ни в одной из цепей не протекает.

Допустим, что задвижка в начальный момент находится в промежуточном положении. Если по ходу протекания технологического процесса возникла необходимость увеличить пропускную способность задвижки, нажимается кнопка SB3 «открыть». При этом размыкаются контакты SB3.1 кнопки, отключая или предотвращая включение магнитного пускателя KM1, срабатывающего на закрытие задвижки, и замыкаются контакты SB3.2. Получает питание катушка KM2.1 магнитного пускателя KM2 по цепи: фаза А – FU1 – KM2.1 – KM1.4 – размыкающий контакт кнопки SB2, имитирующей конечный выключатель, срабатывающий при полном открытии задвижки, – SB5.1 – SB3.2 – размыкающий контакт кнопки SB4 – нейтральный провод сети. Срабатывает магнитный пускатель KM2, и своими силовыми контактами KM2.2 включает электродвигатель привода задвижки на открывание. Одновременно контакт KM2.3 пускателя блокирует контакт SB3.2 кнопки SB3, исключая отключение электродвигателя при отпускании кнопки, а контакт KM2.4 разомкнётся, предотвращая случайное включение пускателья KM1.

Отключение электродвигателя может произойти в трёх случаях: а) Если оператор считёт, 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 – KM1.2 – 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, обесточивая 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

### 3. Осуществляем испытание схемы

1. Объясняет, что произойдёт в схеме при включении QF1, подаёт напряжение и убеждает всех присутствующих в истинности им провозглашённого.

2. Объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB3. Убеждает присутствующих в достоверности сказанного. Обращает внимание на кратковременность срабатывания реле тока и реле времени.

3. Объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB4; убеждает присутствующих в достоверности сказанного. Снова запускает электродвигатель на открытие и объясняет, что произойдёт в схеме при нажатии кнопки SB2, имитирующей конечный выключатель, срабатывающий при полном открытии задвижки. Демонстрирует предсказанное.

3. Объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB5; убеждает присутствующих в достоверности сказанного. Снимает и записывает показания приборов в таблицу на доске.

4. Объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB4; убеждает присутствующих в достоверности сказанного.

5. Снова запускает электродвигатель на закрытие задвижки. Объясняет что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB1, имитирующей повышение тока при заклинивании электродвигателя. Убеждает присутствующих в достоверности сказанного.