

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

**Методические рекомендации для  
самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

**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

1. Организация самостоятельной работы .....	3
2. Методические рекомендации по самостоятельному изучению вопросов .....	3
3. Методические рекомендации по подготовке к занятиям .....	24
4. Методические указания по выполнению индивидуальных домашних заданий.....	25

## 1. ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

### 1.1. Организационно-методические данные дисциплины

№ п.п.	Наименование темы	Общий объем часов по видам самостоятельной работы (из табл. 5.1 РПД)				
		подготовка курсового проекта (работы)	подготовка реферата/эссе	индивидуальные домашние задания (контр. раб.)	самостоятельное изучение вопросов (СИБ)	подготовка к занятиям (ПкЗ)
1	2	3	4	5	6	7
1	Электроприводы механизмов с различного типа нагрузкой	-	-	-	17	5
2	Промышленная реализация и номенклатура комплектных электроприводов	-	-	30	17	5
3	Конструирование, контроль и диагностика электроприводов	-	-	-	17	5
4	Применение современных микропроцессорных преобразователей в частотно-регулируемых электроприводах	-	-	-	18	5

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВОПРОСОВ

**2.1 Процессы коммутации и способы улучшения коммутации. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока. Реакция якоря и ее влияние на работу машины постоянного тока.**

Коммутацией в электрических машинах называется процесс переключения секций обмотки из одной параллельной ветви в другую и связанные с этим явления. На рис. 1, а показана секция перед коммутацией на рис. 1, б – секция в процессе коммутации (замкнутая накоротко через щетки 1, 2), на рис. 1, в – секция после коммутации.

Процесс переключения секции протекает достаточно быстро: время коммутации одной секции, называемое периодом коммутации  $T_k$ , составляет примерно 0,001 – 0,0003 с. Явления, происходящие при коммутации, существенно влияют на надежность и долговечность работы машины постоянного тока.

При плохой коммутации появляется значительное искрение под щетками и связанное с ним обгорание коллектора.

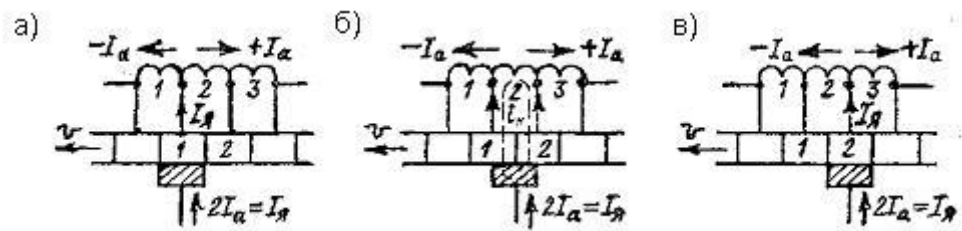


Рис. 1 Секции

Ток  $i$  в короткозамкнутой секции 2 за время  $T_k$  меняет свое направление на противоположное: от  $+I_a$  до  $-I_a$  (рис. 2), где  $I_a$  – ток в параллельной ветви. Вследствие изменения тока в секции наводится ЭДС самоиндукции

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

Кроме этого, коммутируемая секция, если щетки расположены на геометрической нейтрали, пересекает поперечное поле якоря и поэтому в ней наводится ЭДС  $e_v = B_{\perp} l v$ , называемая ЭДС вращения, где  $B_{\perp}$  – индукция поперечного поля. Обе ЭДС вызывают ток коммутации  $i_K$ , который замыкается по цепи: секция, коллекторная пластина, щетка, коллекторная пластина, секция (штриховая линия на рис. 1.13,б). От сопротивления этой цепи, а также от значений и направления  $e_L$  и  $e_v$  зависит значение и направление тока  $i_K$ . Кроме того, по коммутируемой секции протекает часть тока якоря.

Если  $e_L$  и  $e_v$  направлены навстречу друг другу и равны, то  $e_L + e_v = 0$  и ток в коммутируемой секции изменяется по закону  $i = I_a (1 - 2t / T_k)$ , т.е. линейно (рис. 1.14, прямая 1). В этом случае плотность тока под щеткой везде одинакова и не изменяется в процессе коммутации – искрение под щетками не наблюдается.

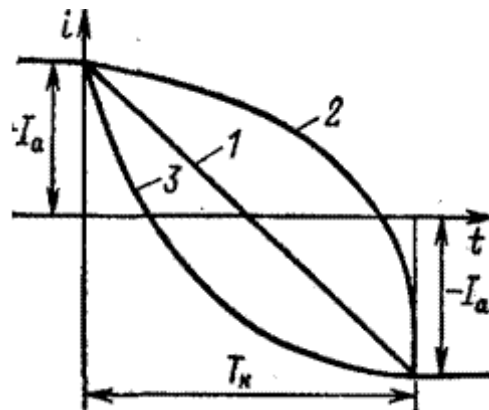


Рис. 2 График изменения тока

Однако практически  $e_L + e_v \neq 0$ . В этом случае ток  $i_K$  алгебраически суммируется с частью тока якоря в коммутируемой секции и общий ток в коммутируемой секции изменяется в соответствии с кривыми 2 или 3 (рис. 1.14). В первом случае коммутация называется замедленной, во втором – ускоренной. В обоих случаях плотность тока под щеткой неодинакова, особенно она велика в набегающей части щетки для генератора и в сбегающей – для двигателя. В результате возникает искрение под щеткой и на коллекторе.

*Пути улучшения коммутации.* В предыдущем параграфе были рассмотрены электромагнитные причины плохой коммутации. Однако к искрению под щетками могут приводить и механические причины: неравномерный износ коллектора и его вибрация, чрезмерный износ щеток, выступание отдельных коллекторных пластин и изоляции и т.д. С учетом этого *улучшение коммутации* возможно несколькими путями:

- обеспечением в машине прямолинейной или несколько ускоренной коммутации; это достигается созданием в зоне коммутации секции дополнительного магнитного поля такой величины и направления, чтобы  $e_L + e_D = 0$ ;

- увеличением сопротивления короткозамкнутой цепи секции в целях уменьшения тока короткого замыкания; это достигается применением твердых графитовых щеток с повышенным переходным сопротивлением (мягкие медно-графитовые щетки с малым переходным сопротивлением применяются только в тихоходных машинах на напряжение до 30 В);

- тщательным контролем за состоянием поверхности коллектора и щеток.

Главным средством улучшения коммутации в машинах средней мощности являются дополнительные полюсы. Магнитное поле дополнительных полюсов подбирается таким образом, чтобы  $e_L + e_D = 0$  или было несколько больше нуля.

Дополнительные полюсы устанавливаются у всех машин постоянного тока мощностью свыше 1 кВт. В крупных машинах применение дополнительных полюсов сочетается с установкой компенсационной обмотки. В машинах малой мощности (менее 1 кВт) коммутацию настраивают поворотом щеток по направлению вращения у генераторов, а у двигателей – против направления вращения за положение физической нейтральной линии. Практически это положение определяется на глаз по наименьшему искрению под щетками. Улучшение коммутации поворотом щеток – малоэффективный метод, так как при изменении нагрузки положение физической нейтральной линии изменяется, а положение щеток остается фиксированным.

### Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

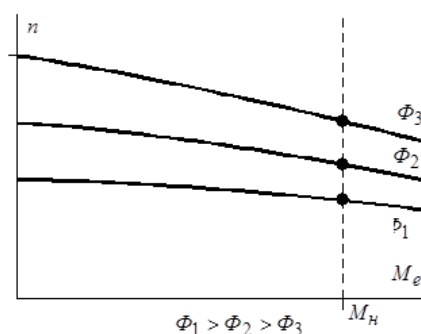


Рис.3 Зависимость потока от частоты вращения

Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока можно осуществлять путем изменения потока  $\Phi$ , введения дополнительного сопротивления  $R_{доп}$  в цепь якоря и изменения напряжения сети  $U_c$ . В двигателях параллельного возбуждения наиболее просто осуществляется регулирование изменением потока, реализуемого с помощью реостата  $R_p$  в цепи возбуждения. При увеличении сопротивления  $R_p$  поток  $\Phi$  уменьшается и частота вращения растет. На рис. 4а представлены механические характеристики двигателя параллельного возбуждения при трех значениях потока. Таким способом регулируют частоту вращения в пределах 1:1,5, 1:2. Верхний уровень частот ограничивается условиями коммутации. Кроме того, при глубоком уменьшении потока

возбуждения усиливается размагничивающее действие реакции якоря, жесткость механической характеристики растет, и падающая характеристика при номинальном потоке может стать возрастающей при ослабленном потоке, что приведет к нарушению устойчивой работы двигателя.

Регулирование частоты вращения двигателя путем введения в цепь якоря дополнительного сопротивления  $R_{доп}$  позволяет изменять частоту вращения вниз от номинальной в широких пределах (рис. 4 б). Но этот способ не экономичен. Полезная мощность двигателя при постоянном моменте пропорциональна частоте вращения (без учета потерь в якоре):

$$P_2 \approx M_e \frac{2\pi n}{60},$$

а потребляемая из сети мощность от частоты вращения не зависит,

$$P_1 = U_c I_a = \frac{U_c M_e}{C_M \Phi}.$$

Поэтому КПД двигателя пропорционален частоте вращения якоря,

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2\pi C_M \Phi}{60 U_c} n.$$

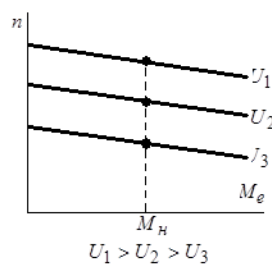


Рис.4 Зависимость частоты от напряжения

Кроме того, при введении дополнительного сопротивления  $R_{доп}$  жесткость механической характеристики двигателя снижается, что может привести к ухудшению работы приводного механизма.

Более совершенным способом регулирования частоты вращения вниз является регулирование путем изменения подводимого к двигателю напряжения. На рис. 5 представлены механические характеристики двигателя параллельного возбуждения для трех значений напряжений. Жесткость механических характеристик практически не меняется, поэтому таким способом можно регулировать частоту вращения от номинальной до нуля.

В качестве источников регулируемого напряжения используются генератор постоянного тока (рис. 2, а) либо полупроводниковый выпрямитель (рис. 2,б). Схема с полупроводниковым выпрямителем обладает более высоким быстродействием по сравнению со схемой генератор-двигатель, но уступает по перегрузочной способности. Кроме того, работа полупроводникового преобразователя ухудшает качество электрической энергии сети переменного тока из-за генерации высших гармоник напряжения и тока.

Рассмотренные способы регулирования частоты вращения двигателей параллельного возбуждения применяются и в двигателях смешанного возбуждения.

Регулирование частоты вращения двигателей последовательного возбуждения осуществляется путем изменения тока в последовательной обмотке  $I_{fn}$  или напряжения якоря  $U_c$  помощью шунтирующих реостатов.

При шунтировании обмотки возбуждения ток  $I_{fn}$  уменьшается и частота вращения якоря растет, а при шунтировании якоря напряжение якоря уменьшается, поэтому частота вращения падает.

Регулирование частоты вращения вверх осуществляется практически при постоянном КПД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M_e \cdot 2\pi n}{60 U_c I_a} = \frac{M_e \cdot 2\pi n \cdot C_\Phi \Phi}{60 U_c \cdot M_e} = \frac{2\pi n \cdot C_\Phi E}{60 U_c \cdot C_e} \approx const$$

Верхний уровень частоты вращения ограничивается условиями коммутации.

Регулирование частоты вращения вниз может осуществляться вплоть до нуля, однако КПД этого способа снижается пропорционально напряжению якоря и частоте вращения:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2\pi n \cdot C_\Phi \Phi}{60 U_c} \approx \frac{2\pi \cdot C_\Phi U}{60 U_c \cdot C_e} \approx \frac{2\pi n \cdot C_\Phi}{60 n_c \cdot C_e},$$

$$n_c = \frac{U_c}{C_e \Phi}$$

где частота вращения якоря при  $U = U_c$ .

Таким образом, этот способ регулирования так же, как и реостатный способ регулирования частоты вращения двигателя с параллельным возбуждением, является неэкономичным. Он используется лишь в случае двигателей малой мощности.

#### **Реакция якоря и ее влияние на работу машины постоянного тока.**

Магнитный поток в машине постоянного тока создается всеми ее обмотками, по которым протекает ток. В режиме холостого хода по обмотке якоря генератора ток не протекает, а по обмотке якоря двигателя протекает ток холостого хода, небольшой по значению. Поэтому в машине существует только основной магнитный поток  $\Phi_0$ , создаваемый обмоткой возбуждения полюсов и симметричный относительно их осевой линии (рис. 5, а).

На рис. 5, а (коллектор не показан) щетки расположены рядом с проводниками обмотки якоря, от которых идут отпайки к тем коллекторным пластинам, с которыми в данный момент соединены щетки. Такое положение щеток называется положением на геометрической нейтрали, т. е. на линии, проходящей через центр якоря и проводники обмотки, в которых индуцируемая основным магнитным потоком э. д. с. равна нулю. Геометрическая нейтраль перпендикулярна осевой линии полюсов.

Когда к обмотке якоря генератора присоединена нагрузка  $R_n$  или когда на вал двигателя действует тормозной момент, по обмотке протекает ток якоря  $I_a$ , который создает магнитный поток якоря  $\Phi_a$  (рис. 5, б). Магнитный поток якоря направлен по линии, на которой расположены щетки. Если щетки расположены на геометрической нейтрали, то поток якоря направлен перпендикулярно основному магнитному потоку и поэтому называется поперечным магнитным потоком.

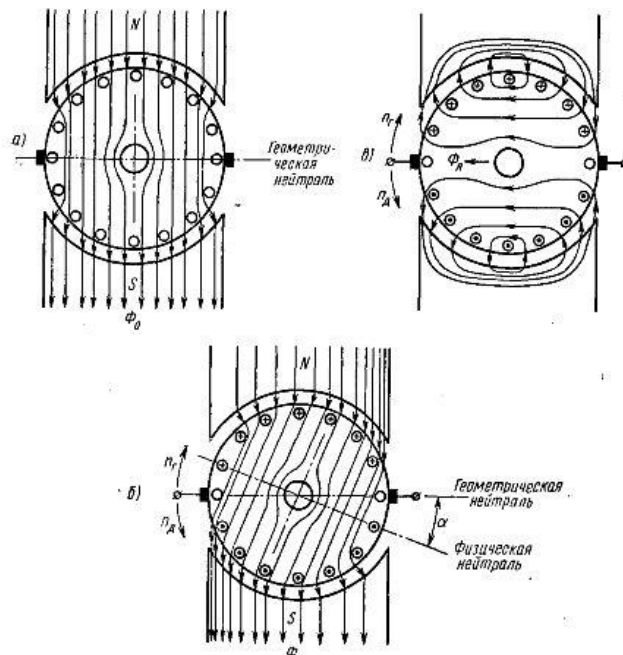


Рис. 5. Магнитные потоки в машине постоянного тока: а — магнитный поток полюсов; б — магнитный поток обмотки якоря; в — результирующий магнитный поток

Влияние магнитного потока якоря на основной магнитный поток называется реакцией якоря. В генераторе постоянного тока под «сбегающим» краем полюса магнитные потоки складываются, под «набегающим» — вычитаются. У двигателя — наоборот. Таким образом под одним краем полюса результирующий магнитный поток  $\Phi$  увеличивается по сравнению с основным магнитным потоком, под другим краем полюса — уменьшается. В результате он становится несимметричным по отношению к осевой линии полюсов (рис. 5, в).

Физическая нейтраль — линия, проходящая через центр якоря и проводники обмотки якоря, в которых индуцируемая результирующим магнитным потоком э. д. с. равна нулю, поворачивается на угол  $\alpha$  по отношению к геометрической нейтрали (в сторону опережения у генераторов, в сторону отставания — у двигателей). При холостом ходе физическая нейтраль совпадает с геометрической.

В результате реакции якоря магнитная индукция в зазоре машины становится еще более неравномерной. В проводниках якоря, находящихся в точках повышенной магнитной индукции, индуцируется большая э. д. с, что приводит к увеличению разности потенциалов между соседними пластинами коллектора и к возникновению искрения на коллекторе. Иногда электрическая дуга перекрывает весь коллектор, образуя «круговой огонь».

Кроме того, реакция якоря приводит к уменьшению э. д. с. якоря, если машина работает в области, близкой к насыщению. Это связано с тем, что когда основной магнитный поток  $\Phi_0$  создает насыщенное состояние магнитопровода, то увеличение магнитного потока на  $+\Delta\Phi$  под одним краем полюса будет меньшим, чем уменьшение на  $-\Delta\Phi$  под другим (рис. 2). Это приводит к уменьшению суммарного потока полюса и э. д. с. якоря, так как

$$E = c_e \cdot n \cdot \Phi$$

Отрицательное влияние реакции якоря можно уменьшить, сдвигая щетки на физическую нейтраль. При этом поток якоря поворачивается на угол  $\alpha$  и встречный поток под набегающим краем полюса генератора уменьшается. Сдвиг щеток осуществляют у генератора по направлению вращения якоря, а у двигателя — против направления вращения якоря. Угол  $\alpha$  меняется с изменением тока якоря  $I_a$ . На практике щетки обычно устанавливают на угол, соответствующий средней нагрузке.

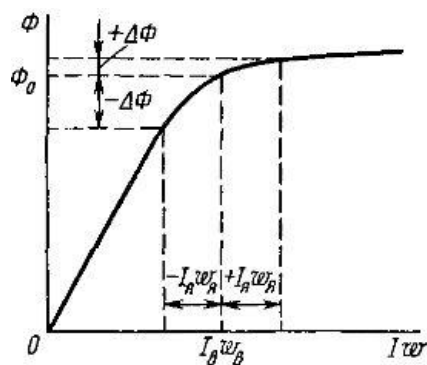


Рис. 6. Влияние степени намагничивания на результирующий магнитный поток ( $I_B \omega_B$  – м.д.с обмотки возбуждения;  $I_A \omega_A$  – м.д.с обмотки якоря).

В машинах средней и большой мощностей применяют компенсационную обмотку, расположенную в пазах главных полюсов и включаемую последовательно с обмоткой якоря так, чтобы ее магнитный поток  $\Phi_k$  был противоположен магнитному потоку  $\Phi_A$ . Если при этом  $\Phi_k = \Phi_A$ , то магнитный поток в воздушном зазоре из-за реакции якоря практически не искажается.

## 2.2 Построение механической характеристики асинхронного электродвигателя по каталожным данным. Работа трехфазного электродвигателя от однофазной сети.

На практике широко используют приближенное аналитическое выражение механической характеристики. Электромагнитный момент асинхронного двигателя

$$M = \Delta P_{эл2} / (\omega_1 s) = m_2 I_2^2 R_2 / (\omega_1 s) = m_2 s E_2^2 R_2 / [\omega_1 (R_2^2 + s^2 X_2^2)]. \quad (1)$$

Принимая приближенно  $E_2 \approx \text{const}$ , т. е. считая, что магнитный поток машины при изменении нагрузки не изменяется, и приравнявая нулю производную  $dM/ds$ , полученную из формулы (1), можно найти критическое скольжение, соответствующее максимальному моменту,  $s_{кр} = \pm R_2 / X_2$  и соответственно максимальный момент

$$M_{\max} = \pm t_2 E_2^2 / (2 \omega_1 X_2). \quad (2)$$

Разделив выражение (1) на (2), после преобразования получим

$$M/M_{\max} = 2 / (s_{кр} / s + s / s_{кр}). \quad (3)$$

Формула (3) является приближенной и, конечно, дает погрешность, так как не учитывает падение напряжения в обмотках статора. Особенно велика погрешность при переходе из двигательного режима в генераторный, где разница в моментах может быть существенной. Однако для исследования одного режима выведенная формула дает приемлемую точность. Это объясняется тем, что в области малых скольжений от  $s = 0$  до  $s_{кр}$  магнитный поток изменяется незначительно и, следовательно, в этой области формула не может дать большой погрешности, тем более, что точки при  $s = 0$  и  $s_{кр}$  являются фиксированными.

При скольжениях, близких к единице, формула (3), казалось бы, должна давать завышенные значения момента, так как при больших токах сильнее проявляется падение напряжения в статоре. Однако в реальных машинах при скольжениях, близких к единице, уменьшается сопротивление  $X_2$  из-за явления вытеснения тока в проводниках ротора, что ведет к увеличению момента. В результате оказывается, что погрешность, обусловленная пренебрежением падения напряжения в статоре, и погрешность, вызванная изменением параметров ротора, взаимно противоположны, вследствие чего точность приближенной формулы (3) достаточна для практических целей.

### Работа трехфазного электродвигателя от однофазной сети.

Наиболее простым способом запуска 3-фазного двигателя является раскручивание ротора с помощью шнура длиной около метра, предварительно намотанного на вал. Такой способ неудобен и применяется там, где двигатель запускается без нагрузки.

При наличии двух одинаковых или близких по мощности электродвигателей один из них можно использовать в качестве генератора «сдвинутой» фазы. Делается это следующим образом. Один из двигателей запускают, например, первым способом и после разгона оставляют включенным в сеть. Второй двигатель легко запускается при включении рубильника Вк2. Эта схема может быть использована там, где установлено несколько двигателей. Любой работающий двигатель позволяет получить «сдвинутую фазу» для другого двигателя, который требуется включить.

Наиболее эффективный способ пуска электродвигателя—это подключение третьей обмотки через фазосдвигающий конденсатор.

Для нормальной работы двигателя с конденсаторным пуском емкость конденсатора должна меняться в зависимости от числа оборотов. Поскольку это условие трудно выполнимо, на практике управление двигателем производят двухступенчато. Включают двигатель с расчетной (пусковой) емкостью конденсатора, а после его разгона пусковой конденсатор отключают, оставляя рабочий.

Пусковой конденсатор отключается центробежными выключателями, вручную или специальными схемами. Рабочая емкость конденсатора для 3-фазного двигателя определяется по формуле

### **2.3 Параллельная работа синхронного генератора с энергосистемой. Синхронный компенсатор.**

В настоящее время электроэнергетические системы состоят из параллельно работающих электрических станций, соединенных линиями электропередачи, что повышает надежность электроснабжения потребителей по сравнению с автономным электроснабжением. Кроме того, при этом уменьшается установленная мощность электрических станций при неизменной мощности нагрузки и увеличивается экономичность за счет возможности включения(отключения) отдельных генераторов и целых электростанций в случае изменения нагрузки в системе и т. д.

При параллельной работе с общей электрической сетью мощности отдельных синхронных генераторов по сравнению с общей мощностью энергосистемы незначительны. Поэтому при любых изменениях режима работы отдельного генератора, включенного в энергосистему, ее напряжение  $\vec{U}_c$  и частота  $f_c$  остаются практически неизменными и поддерживаются всеми остальными генераторами.

В дальнейшем при рассмотрении параллельной работы синхронного генератора с сетью будем исходить из условия, что  $\vec{U}_c = \text{const}$ ,  $f_c = \text{const}$ .

#### **Способы включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью**

Процесс включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью называется синхронизацией. При этом различают точную синхронизацию и самосинхронизацию (или грубую синхронизацию). При включении генератора в сеть не должны возникать большие толчки тока, так как они вызывают большие моменты, действующие как на ротор, так и на статор, и значительные электродинамические силы, которые могут привести к повреждению обмоток.

Принципиальная схема синхронизации трехфазных генераторов приведена на рис. 1, а соответствующая ей расчетная электрическая схема для одной фазы — на рис. 2.

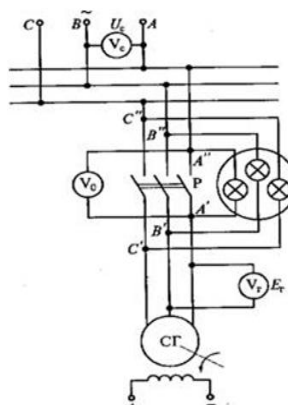


Рис. 1. Схема включения трехфазного синхронного генератора на параллельную работу с сетью (ламповый синхроскоп включен при этом на потухание света)

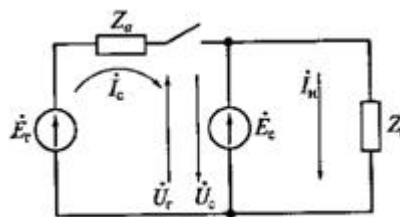


Рис. 2. Электрическая схема для расчета тока  $I_c$  (одной фазы)

При замыкании рубильника (P) в схеме на рис. 1 ток синхронизации  $I_c$  (см. рис. 2) определяется по формуле

$$\dot{I}_c = (\dot{E}_g - \dot{E}_c) / Z_a = (\dot{U}_g - \dot{U}_c) / Z_a, \quad (1)$$

где  $\dot{E}_g, \dot{E}_c$  ( $\dot{U}_g, \dot{U}_c$ ) ЭДС (напряжения) генератора и сети соответственно;  $Z_a$  — полное сопротивление обмотки якоря генератора.

Чтобы ток  $I_c$  был равен нулю (в контуре EG Ec на рис. 2), необходимо выполнение следующих условий:

1. ЭДС генератора  $\dot{E}_g$  и сети  $\dot{E}_c$  должны быть равны по значению и находиться в противофазе.
2. Частота генератора  $f_g$  и частота сети  $f_c$  должны быть равны, иначе после синхронизации синхронный генератор будет работать в режиме асинхронного двигателя (при  $f_g < f_c$ ) или асинхронного генератора (при  $f_g > f_c$ ).
3. Порядок чередования фаз генератора и сети должен быть одинаковым, иначе после синхронизации ротор генератора будет вращаться с синхронной скоростью против направления вращения магнитного поля, т. е. будет работать в режиме электромагнитного тормоза со скольжением  $s = 2$ .

Перечисленные условия являются условиями точной синхронизации.

Выполнение условий синхронизации проверяется следующим образом (см. рис. 1). При отключенном рубильнике (P) синхронный генератор (СГ) работает в режиме холостого хода, при этом между контактами рубильника действует ЭДС  $\Delta \dot{E} = \dot{E}_g - \dot{E}_c = \dot{E}_g \dot{E}_c$ . Регулированием тока возбуждения генератора добиваются равенства ЭДС  $E_g$  и  $E_c$ , контролируя их значения с помощью вольтметров  $V_g$  и  $V_c$ .

Если бы частота вращения генератора была постоянной и равной номинальной, то частота индуцируемой ЭДС равнялась бы частоте напряжения сети и векторы  $\dot{E}_g$  и  $\dot{E}_c$  вращались с одинаковой угловой частотой, а  $\Delta \dot{E}$  была бы постоянной.

В действительности получить строго постоянную частоту вращения генератора не удается и частоты ЭДС сети и генератора несколько отличаются. Поэтому векторы  $\vec{E}_{10}$  и  $\vec{E}_c$  перемещаются относительно друг друга с угловой частотой  $\omega = 2\pi(f_g - f_c)$ .

Вследствие этого  $\Delta E$  изменяется от нуля до значения, равного сумме  $\vec{E}_{10} + \vec{E}_c$  и соответственно этому изменяется напряжение в трех лампах, которые одновременно то загораются, то гаснут. Наиболее благоприятным для включения генератора в сеть является момент, когда  $\Delta E = 0$ , что соответствует выполнению первого условия точной синхронизации. Однако лампы накаливания гаснут при напряжениях, равных 30...60% от номинальных значений. Поэтому, для того чтобы более точно определить момент выполнения первого условия синхронизации, параллельно одной из них включают так называемый нулевой вольтметр  $V_0$ . В момент выполнения первого условия показания этого вольтметра равны нулю и лампы не горят. Если в этот момент замкнуть рубильник  $P$ , ток в подключенном к сети генераторе будет равен нулю. Включение ламп по схеме, приведенной на рис. 1, называется включением на потухание света.

Возможна другая схема соединения трех ламп: одна из них подключается к одноименным фазам генератора и сети, а две другие — к разноименным фазам. При такой схеме включения, называемой включением на вращение света, лампы будут попеременно загораться и гаснуть. Вместе эти три лампы образуют ламповый синхроскоп.

В настоящее время вместо ламповых применяются более сложные синхроскопы, позволяющие полностью автоматизировать процесс синхронизации.

Частоту генератора в процессе синхронизации регулируют изменением скорости вращения его первичного (приводного) двигателя. Если частоты генератора и сети совпадают, то лампы синхроскопа не мигают, поскольку  $\Delta E = \text{const}$ . Таким образом, с помощью лампового синхроскопа проверяют выполнение второго условия точной синхронизации.

С помощью лампового синхроскопа проверяют и третье условие точной синхронизации — одинаковость порядка чередования фаз сети и генератора. Если при схеме включения ламп, приведенной на рис. 15.1, будет наблюдаться вращение, а не потухание света, то это будет означать, что сеть и генератор имеют разный порядок чередования фаз, который в этом случае необходимо изменить, что достигается путем переключения двух фаз либо сети, либо генератора.

Для применения метода точной синхронизации требуется довольно много времени (до 10 мин). В ряде случаев при резком увеличении нагрузки в электрической системе этого времени в распоряжении персонала электрической станции может не оказаться. Тогда для ускорения включения генератора в сеть применяют способ самосинхронизации, при котором требуется выполнить лишь последние два условия точной синхронизации:

одинаковый порядок чередования фаз генератора и сети;

примерно равные частоты генератора и сети ( $f_g \approx f_c$ ).

Соблюдение условия чередования фаз обычно проверяется при монтаже генератора, а следовательно, выполняется на электрической станции автоматически. Время разгона генератора, определяемое постоянной инерции блока приводной двигатель — генератор, достаточно мало. Поскольку равенство частот должно соблюдаться приближенно, то возможны два варианта включения на параллельную работу сети и генератора:  $f_g < f_c$  и  $f_g > f_c$ . В первом случае после включения синхронный генератор начинает работать параллельно с сетью в режиме асинхронного двигателя, а во втором — в режиме асинхронного генератора.

Как уже указывалось, самосинхронизация применяется при внезапном увеличении нагрузки в системе для быстрой компенсации дефицита активной мощности в электрической системе. Следовательно, при работе в режиме асинхронного двигателя этот дефицит будет возрастать, так как двигатель будет дополнительно потреблять активную мощность. Значит, желательно осуществлять включение синхронного генератора на параллельную работу при  $f_g < f_c$ .

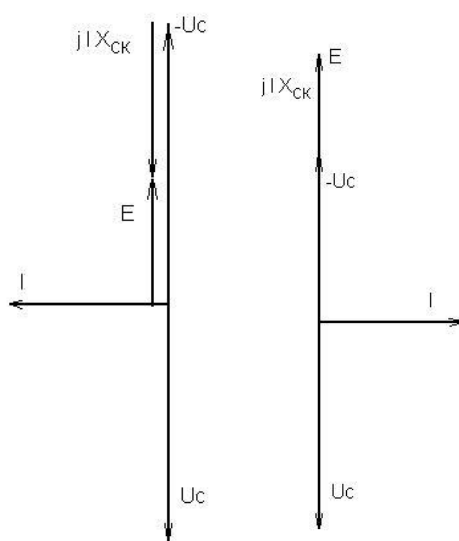
При самосинхронизации генератор включают в сеть невозбужденным ( $E_f=0$ ), поэтому включение сопровождается скачком тока, установившееся значение которого

$$I_c = E_c / z_a = U_c / z_a. (2)$$

Скачок тока якоря приводит к броску потока якоря и ЭДС, наводимой в обмотке возбуждения. Чтобы избежать возникновения перенапряжений и возможного в связи с этим электрического пробоя, обмотку возбуждения на период включения генератора замыкают на балластное активное сопротивление  $r_b = (4...6)r_v$ , где  $r_v$  — активное сопротивление обмотки возбуждения. Часто в качестве балластного используют дугогасительное сопротивление. После установления тока якоря обмотку возбуждения переключают с активного сопротивления на источник постоянного тока и плавно увеличивают ток возбуждения. Таким образом генератор втягивается в синхронизм и работает параллельно с сетью. Далее путем увеличения мощности приводного двигателя увеличивают активную мощность генератора до требуемого значения.

Синхронным компенсатором называется синхронный двигатель, работающий без нагрузки на валу и потребляющий по отношению к напряжению сети реактивный опережающий или отстающий ток. Синхронный компенсатор, как правило, работает с избыточным током в его обмотке возбуждения, и поэтому потребляет из сети емкостный ток, компенсирующий отстающий (индуктивный). Применение синхронного компенсатора позволяет разгружать питающие линии от индуктивных токов. При этом снижаются потери в сетях и улучшаются мощностные показатели использования станционных генераторов. Кроме того, синхронные компенсаторы позволяют поддерживать неизменным напряжение на приемных концах линий. При передаче энергии по электрическим линиям большой протяженности и при наличии большой индуктивной нагрузки, напряжение у потребителей может быть значительно ниже, чем на станции. С другой стороны, при малых нагрузках напряжение у потребителей может оказаться повышенным ввиду того, что ЛЭП обладают емкостным сопротивлением. Для сглаживания этих процессов и стабилизации напряжения у потребителей, синхронный компенсатор работает в номинальном режиме с избыточным током обмотки возбуждения. Поэтому условия нагревания синхронного компенсатора более тяжелые, чем у СД и СГ.

Векторная диаграмма синхронного компенсатора имеет следующий вид:



Недостаточный ток ОБ

Избыточный ток ОБ

Рис. 3 Векторная диаграмма синхронного компенсатора

U-образная характеристика синхронного компенсатора не отличается от такой же для СД при  $P_a=0$ .

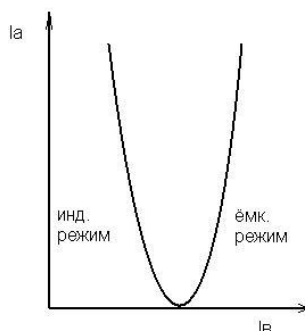


Рис. 4 U-образная характеристика синхронного компенсатора

Реально ток синхронного компенсатора имеет не большую активную составляющую, которая идет на покрытие потерь. Из сети потребляется энергия, идущая на покрытие потерь в стали, меди, а также механических. Суммарно она составляет 1-2% от номинальной мощности синхронного компенсатора. При недостатке  $I_b$  синхронного компенсатора по отношению к сети является индуктивностью, при избытке  $I_b$  – емкостью.

При снижении напряжения сети  $U_c$  синхронный компенсатор отдает в сеть большую реактивную мощность, чем при номинальном напряжении сети  $U_{c.ном.}$ . При  $U_c > U_{c.ном.}$  синхронный компенсатор уменьшает отдачу в сеть реактивной мощности.

Как правило, в синхронном компенсаторе используется автоматическое регулирование  $I_b$  в зависимости от  $U_c$ .

Полная номинальная мощность синхронного компенсатора:

$$P_{номСК} = m \cdot U_H \cdot I_H$$

Максимальная мощность синхронного компенсатора достигается при  $I_b=0$ . В этом случае:

$$I_a = j \cdot \frac{U_{номСК}}{X_d}$$

Полная мощность:

$$P = m \cdot \frac{U_{номСК}^2}{X_d}$$

Уравнения синхронного компенсатора отличаются от уравнений СД лишь тем, что в них  $M=0$ .

Синхронный компенсатор работает при угле нагрузки  $\theta=0$ , и поэтому нет необходимости заботиться о его статической перегружаемости.

Для снижения  $I_b$  синхронные компенсаторы выполняются с меньшими воздушными зазорами, чем СД. Поэтому у синхронных компенсаторов больше значение  $x_d^*=1.8 \div 2.5$ .

**2.4 Нагрев и расчет мощности двигателя электропривода. Переходные процессы электропривода. Автоматизация электропривода. Электропривод мобильных машин и установок. Электропривод станочного оборудования.**

Продолжительность нагрузки двигателя ЭП и её значение определяется технологическим процессом, в котором используют конкретно электропроводную установку.

Различный характер работы технологических установок обусловил выделение восьми стандартизированных нагрузочных режимов работы двигателя ЭП, условные обозначение которых, представленное на паспортном щитке ЭД, S1, S2, ...S8. Из них S1 – продолжительный, S2 – кратковременный, S3 – повторно-кратковременный и S6 – перемещающийся – основные, а S4 – повторно-кратковременный с частыми пусками, S5 – повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением, S7 – перемещающийся с частыми реверсами и S8 – перемещающийся с изменением частоты вращения – дополнительные режимы.

Дополнительный нагрузочный режим работы S1 двигателя ЭП, характеризующийся длительной номинальной мощностью, которую указывают на паспортном щитке ЭД. С этой мощностью двигатель может работать неограниченно долго. При этом температура всех частей ЭД достигает установившихся значений. Для кратковременного нагрузочного режима работы S2 помимо мощности указывают и предельную продолжительность работы с этой мощностью. ЭД режима S2 выпускают на стандартные продолжительности работы 10, 30, 60 90 минут.

Нагрузочный режим повторно-кратковременный S3 дополнительно к паспортной мощности характеризуется относительной продолжительностью включения (ПВ),

$$ПВ = 100 \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{ц}}} ; \quad t_{\text{ц}} = t_{\text{раб}} + t_{\text{откл}}$$

Где  $t_{\text{раб}}$ ,  $t_{\text{откл}}$ ,  $t_{\text{ц}}$  продолжительности работы отключения и одного цикла при  $\leq 10$  мин

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

Режимы нагрузки двигателя ЭП повторно-кратковременный с частыми пусками S4 и повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением S5, помимо значения мощности и ПВ ещё характеризуется допускаемой частотой включений в час (h) со стандартными значениями 30, 60, 120, 240 при оговорённом коэффициенте инерции ЭП со стандартными значениями 1,2; 1,6; 2,5 и 4. Электродвигатели перемещающегося режима S6 наряду с номинальной мощностью характеризуются номинальным значением продолжительностью нагрузки (ПН)

$$ПВ = 100 \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{ц}}} ; \quad t_{\text{ц}} = t_{\text{раб}} + t_{\text{ох}}$$

Где  $t_{\text{ц}}$ ,  $t_{\text{раб}}$ ,  $t_{\text{ох}}$  – продолжительности работы х.х. и одного цикла при 10 мин.

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

Для режима перемещающегося с частыми реверсами S7 дополнительно указывают числа реверса в час (станд. значения 30, 60, 120, 240 рев/ч при F=1,2; 1,6; 2,5 и 4), а для перемещающегося режима с изменением частоты вращения S8 – продолжительность работы с разной частотой вращения.

В случае измененной нагрузки двигателя ЭП ее из условия сохранения средних потерь мощности и соответственно среднего превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды заменяют среднеквадратической, являющейся эквивалентной постоянной:

$$\alpha_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m L_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^m t_i}},$$

где  $L_i$ , – значения показателя и продолжительности нагрузки для i-го участка нагрузочной диаграммы ЭП, m-число участков нагрузочной диаграммы. При постоянной нагрузке её значение для одного участка нагрузки (m=1) совпадает с эквивалентным значением  $L_i = L_{\text{экв}}$

### **Выбор двигателя по нагреву.**

Выбор двигателя завышенной мощности в 1,5 раза и более ведёт к резкому ухудшению его энергетических показателей (КПД,  $\cos \varphi$ ) и неоправданному перерасходу средств и электропотребления, кроме того, из-за систематической недогрузки двигатель в период работы не прогревается до необходимой температуры. В условиях влажной окружающей среды изоляция двигателя во время длительных пауз в работе постепенно увлажняется и её сопротивление понижается. Это может привести к электрическому пробое изоляции при включении двигателя и его преждевременному выходу из строя.

Таким образом, мощность двигателя рассчитывают, прежде всего, исходя из обеспечения его нормированного нагрева, а затем в зависимости от характера нагрузки проверяют по дополнительным условиям: обеспечение пуска, устойчивой работы при перегрузках. Для правильного выбора мощности двигателя по нагреву необходимо знать закон, по которому его температура изменяется во времени.

### **Переходные процессы электропривода**

Переходным процессом принято называть процесс перехода электропривода от одного установившегося состояния к другому, когда одновременно изменяются скорость, момент и ток двигателя, а также скорость и моменты всех звеньев кинематической цепи, соединяющей двигатель с рабочим органом механизма.

К переходным процессам относятся пуск, торможение и реверс электропривода, переход с одной скорости на другую, а также процессы, вызванные изменениями момента на валу двигателя, изменением напряжения сети. Характер протекания и длительность переходного процесса в ряде производственных механизмов определяют производительность, особенно когда длительность рабочего цикла соизмерима с временем разгона и торможения.

Вместе с тем, потери энергии в двигателе при пуске и торможении могут оказаться соизмеримыми с потерями в установившихся режимах. По этой причине при определении мощности двигателя крайне важно учитывать потери при пуске и торможении, особенно когда число пусков и торможений в час относительно велико.

Характер и длительность переходного процесса определяются моментом двигателя, моментами сил сопротивления (трения, резания, деформации и т. д.), массами и моментами инерции движущихся тел. Зависимости  $n$ ,  $M$ ,  $I$  от времени и продолжительность переходного процесса можно определить с помощью известного из механики уравнения движения. Для поступательного движущегося тела

$$F/F_c = mdv/dt. (1)$$

Для вращающегося тела

$$M/M_c = J d\omega/dt. (2)$$

Уравнения движения соответствуют одному поступательно движущемуся или вращающемуся телу. Любой, даже самый простейший производственный механизм, к примеру изображенный на рис. 1, состоит не из одного, а из нескольких движущихся или вращающихся с различными частотами тел (шестерен, валов, шкивов и т. д.). По этой причине при расчете переходных процессов электроприводов потребовалось бы составить и совместно решить столько уравнений, сколько звеньев с различными скоростями имеет механизм. Для упрощения задачи все моменты инерции, моменты сил сопротивления и движущие моменты приводят к одной скорости — обычно к скорости вала двигателя; в результате этого все звенья механизма заменяют одним эквивалентным звеном, для которого составляют и затем решают одно уравнение движения.

### **Автоматизация электропривода**

Автоматизация электропривода создает возможности для повышения производительности труда, улучшения качества продукции, уменьшения расхода

электроэнергии, повышения надежности в работе. Кроме того, при автоматизации облегчается труд человека, он освобождается от необходимости выполнения утомительных и однообразных операций по управлению. Вместе с тем упрощается обслуживание, сокращается количество обслуживающего персонала.

Автоматизация электроприводов станков осуществляется в функции пути, времени, нагрузки и скорости.

Автоматизация электропривода создает возможности для повышения производительности труда, улучшения качества продукции, уменьшения расхода электроэнергии, повышения надежности в работе. Кроме того, при автоматизации облегчается труд человека, он освобождается от необходимости выполнения утомительных и однообразных операций по управлению. Вместе с тем упрощается обслуживание, сокращается количество обслуживающего персонала.

Автоматизация электроприводов и производственных процессов, создание современных методов автоматического управления, регулирования и контроля, разработка сложных автоматизированных электроприводов и комплексной механизации и автоматизации производства приводят к значительному повышению производительности труда.

Автоматизацией электропривода создается возможность для управления производственными механизмами на расстоянии (дистанционно), обеспечивается регулирование технологических процессов и строгая последовательность выполнения производственных операций.

Проектом автоматизации электропривода и нефтеперекачивающей станции предусмотрены следующие операции.

С автоматизацией электропривода связаны значительные преимущества, так как она создает возможности дальнейшего повышения производительности труда, улучшения качества продукции, уменьшения расхода электроэнергии при одновременном повышении надежности в работе. Одновременно облегчается труд людей, человек освобождается от необходимости выполнения утомительных и однообразных операций по управлению.

При осуществлении автоматизации электропривода следует уделять большое внимание способу пуска, согласуя его с возможностями питающей сети с точки зрения обеспечения при пуске нормальной работы электродвигателей, подключенных к шинам той же подстанции.

Среди средств автоматизации электроприводов значительную роль играют магнитные усилители. Их достоинствами являются высокая надежность и долговечность, простота выполненных на их основе систем управления приводами, высокая климатическая и механическая стойкость, сравнительно невысокая стоимость, доступность обслуживания персоналом, не имеющим высокой квалификации.

Совершенствуются системы автоматизации электропривода за счет использования микропроцессорной техники. Аналогичные процессы происходят и в отечественном нефтяном машиностроении.

### **Электропривод мобильных машин и установок**

Электроприводом называется машинное устройство, преобразующее электрическую энергию в механическую и состоящее из электродвигателя, передаточного механизма и аппаратуры управления и защиты. Электропривод обеспечивает управление преобразованной механической энергией. В некоторые типы электропривода входят преобразовательные устройства: выпрямители, преобразователи частоты, инверторы.

Электропривод, применяемый в производственных процессах, делят на три основных типа: групповой (трансмиссионный), одиночный и многодвигательный.

Групповым называется такой электропривод, в котором от одного электродвигателя с помощью одной или нескольких трансмиссий движение передается

группе рабочих машин. Такой электропривод из-за технического несовершенства находит очень ограниченное применение.

Одиночным называется такой электропривод, который с помощью отдельного электродвигателя приводит в движение одну машину или производственный механизм. Различают простой одиночный привод и индивидуально-одиночный. В простом одиночном приводе электродвигатель с рабочей машиной соединяется плоской или клиноременной передачей через редуктор или непосредственно с помощью муфт. Такой электропривод имеют измельчители кормов «Волгарь-5М», ИГК-30Б, дробилки кормов КДУ-2,0 и КДМ-2,0 и др.

Многодвигательным называется такой электропривод, когда в одной рабочей машине для привода рабочих органов используются отдельные электродвигатели (например, зерноочистительная машина ЗВС-20, очиститель вороха ОВП-20А, гранулятор ОГМ-0,8А и др.).

С развитием производства и его технической оснащенности в классификацию электроприводов введены дополнительные характеристики основных типов приводов.

В индивидуально-одиночном приводе имеется конструктивная связь деталей электродвигателя с рабочей машиной (машинка для стрижки овец со встроенным электродвигателем, электродрель и т.п.).

В многодвигательном электроприводе различают простой многодвигательный привод, когда электродвигатель с рабочими органами машины соединяется непосредственно без конструктивных изменений двигателя, то есть с помощью муфт, ременных передач и редукторов; в индивидуально-многодвигательном приводе детали электродвигателя служат одновременно и деталями рабочих органов машин (ролики прокатного стана, привод очесывающих валиков в хлебоуборочной машине и др.); агрегатированный многодвигательный электропривод, когда согласованно действует целая система рабочих машин, объединенных в общую поточную (технологическую) линию, например зерноочистительно-сушильные комплексы, цехи для приготовления концентрированных кормов типа ОКЦ-30, ОКЦ-50, установка для приготовления витаминной муки АВМ-0,4 и др.

Электрические приводы могут быть классифицированы по ряду признаков: по условиям применения (стационарные и передвижные), по способу управления (автоматизированные, частично автоматизированные и неавтоматизированные), по числу скоростей (односкоростные и многоскоростные), по роду используемой электрической энергии (постоянный ток, однофазный и трехфазный) и др.

Развитию электропривода и разнообразию его типов во многом способствуют следующие преимущества электропривода перед другими видами приводов: быстрый и простой пуск электродвигателя, благодаря которому легко осуществить частые пуски и остановки машины; возможность точного учета расхода энергии на отдельные производственные операции, что позволяет оценивать и сравнивать влияние этой составляющей на стоимость продукции, а также сравнивать между собой рабочие машины различных типов; способность электродвигателя выдерживать значительные перегрузки; электродвигатели могут работать погруженными в воду, в безвоздушном пространстве и в прочих условиях среды, где другие двигатели работать не могут; электродвигатели имеют более длительный срок службы, меньшие габариты и металлоемкость, просты в обслуживании и надежны в эксплуатации; при электроприводе легче осуществить автоматизацию работы как отдельных машин, так и всего производственного процесса в целом; возможность использования электрической машины как в двигательном, так и в тормозном (генераторном) режиме; возможность изготовления электропривода практически любой мощности (от долей ватта до сотен и тысяч киловатт), на различную частоту вращения; возможность конструктивного упрощения рабочей машины, ее совершенствования; экономия обтирочных и других материалов, чистота в помещении, улучшение условий труда

## Электропривод станочного оборудования.

Современные многофункциональные станки и промышленные роботы оснащены многодвигательными электроприводами, осуществляющие перемещение исполнительных органов по нескольким координатным осям (рис. 1).

Управление работой станка с ЧПУ выполняется с использованием типовых систем, вырабатывающих команды в соответствии с заданной в цифровой форме программой. Создание высокопроизводительных микроконтроллеров и однокристальных микроЭВМ, составляющих программируемое ядро ЧПУ дало возможность с их помощью автоматически выполнять множество геометрических и технологических операций, а также осуществлять прямое цифровое управление системой электроприводов и электроавтоматикой.

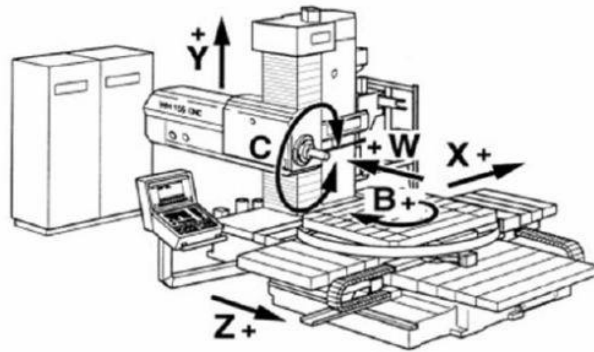


Рис. 1. Система приводов фрезерного станка с ЧПУ

## Разновидности электроприводов станков с ЧПУ и требования к ним

Процесс металлообработки резанием осуществляется посредством взаимного перемещения обрабатываемой заготовки и лезвия режущего инструмента. Электроприводы являются частью станочного оборудования, которое предназначено для осуществления и регулирования процессов металлообработки посредством системы ЧПУ.

При обработке принято выделять основные движения, обеспечивающие управляемые процессы резания при взаимном движении инструмента и заготовки, а также вспомогательные перемещения, способствующие процедурам автоматической работы оборудования (подвод и отвод приборов для осуществления контроля, замену инструмента и т. п.).

К основным относят главное движение резания, имеющее наибольшую скорость и мощность, которые обеспечивают необходимое усилие резания, а также движение подачи, необходимое для перемещения рабочего органа по пространственной траектории с заданной скоростью. Для получения поверхности изделия заданной формы рабочие органы станка сообщают заготовке и инструменту движения нужной траектории с установленной скоростью и силой. Электроприводы сообщают рабочим органам вращательное и поступательное движения, сочетания которых кинематической структурой станков обеспечивают требуемые взаимные перемещения.

Назначение и тип металлообрабатывающего станка во многом зависит от формы изготавливаемой детали (корпус, вал, диск). Возможности многооперационного станка по формированию требуемых при обработке траекторий перемещений инструментов и заготовки определяется количеством координатных осей, а, следовательно, числом взаимосвязанных электроприводов и структурой системы управления.

В настоящее время приводы преимущественно выполняют на базе надежных электродвигателей переменного тока с частотным управлением, осуществляемым цифровыми регуляторами. Различные типы электроприводов реализуют с применением типовых промышленных модулей (рис. 2).

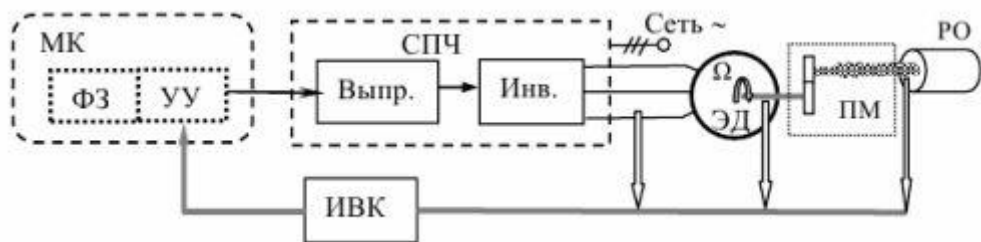


Рис. 2. Типовая функциональная схема электропривода

Минимальный состав блоков электропривода составляют следующие функциональные блоки:

- исполнительный электродвигатель (ЭД);
- силовом преобразователь частоты (СПЧ), преобразующий электроэнергию промышленной сети в трехфазное напряжение питания двигателя с требуемой амплитудой и частотой;
- микроконтроллер (МК), выполняющий функции управляющего устройства (УУ) и формирователя задания (ФЗ).

Промышленный блок силового преобразователя частоты содержит выпрямитель и силовой инвертор, вырабатывающий с использованием микропроцессорного управления выходным ШИМ коммутатором синусоидальное напряжение с требуемыми параметрами, определяемые сигналами устройства управления.

Алгоритм управления работой электропривода осуществляется микроконтроллером посредством выработки команд, полученных в результате сопоставления сигналов формирователя задания и данных, получаемых с информационно-вычислительного комплекса (ИВК) на основе обработки и анализа сигналов с совокупности датчиков.

Электропривод главного движения в большинстве приложений содержит асинхронный электродвигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора и редуктор в качестве механической передачи вращения на шпиндель станка. Редуктор часто выполняется в виде коробки скоростей с электромеханическим дистанционным переключением передач. Электропривод главного движения обеспечивает необходимое усилие резания при определенной скорости вращения и поэтому целью регулирования скорости является поддержание постоянной мощности.

Требуемый диапазон регулирования скорости вращения зависит от диаметров обрабатываемых изделий, их материалов и многих других факторов. В современных автоматизированных станках с ЧПУ привод главного движения выполняет сложные функции, связанные с нарезанием резьбы, обработкой деталей разного диаметра и многие другие. Это приводит к необходимости обеспечения весьма большого диапазона регулирования скорости, а также применения реверсивного привода. В многооперационных станках требуемый диапазон изменения скорости вращения может составлять тысячи и более.

В приводах подач также требуются весьма большие диапазоны изменения скорости. Так при контурном фрезеровании теоретически надо иметь бесконечный диапазон скорости, т. к. минимальное значение в некоторых точках стремится к нулю. Часто быстрое перемещение рабочих органов в зону обработки также осуществляется посредством привода подач, что значительно увеличивает диапазон изменения скорости и усложняет системы управления приводами.

В приводах подач нашли применение синхронные двигатели и бесконтактные двигатели постоянного тока, а также в ряде случаев асинхронные двигатели. К ним предъявляются следующие основные требования:

- широкий диапазон регулирования скорости;

- высокая максимальная скорость;
- высокая перегрузочная способность;
- высокое быстродействие при разгоне и торможении в режиме позиционирования;
- большая точность позиционирования.

Стабильность характеристик приводов должна обеспечиваться при вариациях нагрузки, изменении температуры окружающей среды, напряжения электропитания и множества других причин. Этому способствует разработка рациональной адаптируемой системы автоматического управления.

### Механическая часть станочного привода

Механическая часть привода может представлять сложную кинематическую конструкцию, содержащую множество вращающихся с разными скоростями частей. Обычно выделяют следующие элементы:

- ротор электродвигателя, создающий момент (вращающий или тормозной);
- механическую передачу, т. е. систему, определяющий характер движения (вращательное, поступательное) и изменяющую скорость перемещения (редуктор);
- рабочий орган, преобразующий энергию движения в полезную работу.

### Следящий асинхронный привод главного движения металлорежущего станка

Современный регулируемый электропривод главного движения металлообрабатывающих станков с ЧПУ преимущественно выполняется на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора, чему способствовало множество факторов, среди которых следует отметить совершенствование элементной базы информационной и силовой электроники.

Регулирование режимов двигателей переменного тока осуществляется посредством изменения частоты питающего напряжения с помощью силового преобразователя, осуществляющего наряду с регулированием частоты изменение и других параметров.

Характеристики следящего электропривода в значительной степени зависят от эффективности встроенной САУ. Применение высокопроизводительных микроконтроллеров предоставило широкие возможности организации систем управления электроприводом.



Рис. 3. Типовая структура управления асинхронным двигателем с использованием преобразователя частоты

Контроллер привода генерирует числовые последовательности для силового коммутатора, осуществляющего регулирование режима работы электродвигателя. Контроллер автоматики обеспечивает требуемые характеристики в режимах пуска и торможения, а также автоматическую настройку и защиту оборудования.

Аппаратная часть вычислительной системы также содержит: аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи для ввода сигналов с датчиков и управления их работой;

- модули ввода и вывода аналоговых и цифровых сигналов, оснащенные интерфейсным оборудованием и кабельными разъемами;
- интерфейсные блоки, осуществляющие внутренние межмодульные передачи данных и связи с внешним оборудованием.

Большое количество вводимых разработчиком параметров настройки преобразователя частоты с учетом подробных данных конкретной электродвигателя обеспечивают заданные процедуры управления, среди которых можно отметить:

- многоступенчатое регулирование скорости,
- верхнее и нижнее ограничение частоты,
- ограничение крутящего момента,
- осуществление торможения с использованием подачи постоянного тока в одну из фаз двигателя,
- защита от перегрузки по току и от перегрева, обеспечение режим экономии электроэнергии.

### **Привод на основе бесконтактных двигателей постоянного тока**

К приводам подач металлорежущих станков предъявляются высокие требования к диапазону регулирования частоты вращения, линейности регулировочных характеристик и быстродействия, поскольку они определяют точность взаимного позиционирования инструмента и детали, а также скорость их перемещения.

Приводы подач преимущественно были реализованы на основе двигателей постоянного тока, которые обладали необходимыми характеристиками управления, но в то же время наличие механического щеточно-коллекторного узла было сопряжено с низкой надежностью, сложностью обслуживания, высоким уровнем электромагнитных помех.

Развитие средств силовой электроники и цифровой вычислительной техники способствовало их замене в электроприводах бесконтактными двигателями постоянного тока, что позволило улучшить энергетические показатели и повысить надежность станочного оборудования. Однако бесконтактные двигатели отличает сравнительно высокая стоимость вследствие сложности системы управления.

Но по принципу действия бесколлекторный двигатель представляет собой электрическую машину постоянного тока с магнитоэлектрическим индуктором на роторе и обмотками якоря на статоре. Количество статорных обмоток и число полюсов магнитов ротора выбирается в зависимости от требуемых характеристик двигателя. Их увеличение способствует улучшению плавности хода и управляемости, однако приводит к усложнению конструкции двигателя.

В станочном электроприводе преимущественно применяется структура с тремя якорными обмотками, выполненными в виде нескольких соединенных секций, и системы возбуждения от постоянных магнитов с несколькими парами полюсов (рис. 4).

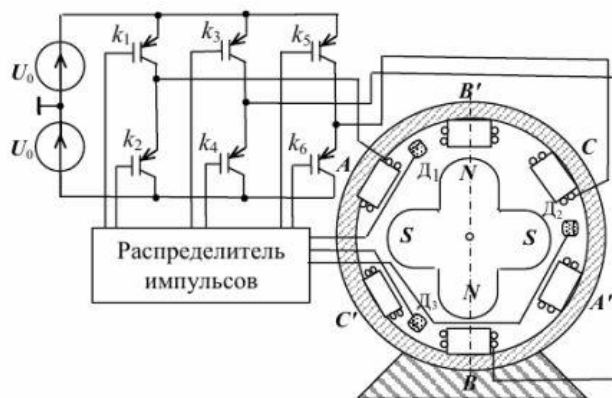


Рис. 4. Функциональная схема бесконтактного двигателя постоянного тока

Вращающий момент образуется за счет взаимодействия магнитных потоков, создаваемым токами в обмотках статора, и постоянными магнитами ротора. Неизменное направление электромагнитного момента обеспечивается соответствующей коммутацией подводимую к обмоткам статора постоянного тока. Последовательность подключения обмоток статора к источнику  $U_0$  осуществляется силовыми полупроводниковыми ключами, которые переключаются под действием сигналов распределителя импульсов при подаче напряжений с датчиков положения ротора.

В задаче регулирования режимов работы электропривода на бесконтактных двигателях постоянного тока выделяют следующие взаимосвязанные вопросы:

- разработка алгоритмов, способов и средств управления электромеханическим преобразователем посредством воздействия на доступные для измерения физические величины;
- создание системы автоматического управления привода с помощью теории и методов автоматического регулирования.

#### Электрогидропривод на основе шагового двигателя

В современных станках получили распространение совместные электрогидроприводы (ЭГП), в которых поступающие от электронной системы ЧПУ дискретные электрические сигналы преобразуются посредством синхронных электродвигателей во вращение вала. Развиваемый под действием сигналов контроллера привода (КП) системы ЧПУ электродвигателем (ЭД) вращающий момент служит входной величиной для гидроусилителя, связанное механической передачей (МП) с исполнительным органом (ИО) станка (рис. 5).



Рис. 5. Функциональная схема электрогидропривода

Управляемое вращение ротора электродвигателя посредством входного преобразования (ВП) и гидрораспределителя (ГР) приводит к вращению вала гидромотора (ГМ). С целью стабилизации параметров гидроусилителя обычно используется внутренняя обратная связь.

В электроприводах механизмов со стартстопным характером движения или непрерывного перемещения нашли применение шаговые двигатели (ШД), которые относятся к разновидности синхронных электродвигателей. Шаговые двигатели с

импульсным возбуждением наиболее приспособлены для используемого в СЧПУ прямого цифрового управления.

Прерывистое (пошаговое) перемещение ротора на определенный угол поворота на каждый импульс предоставляет возможность получения достаточно высокой точности позиционирования очень большим диапазоном изменения скорости практически от нулевой значения.

При использовании шагового двигателя в электроприводе управление им осуществляется с помощью устройства, содержащего логический контроллер и коммутатор (рис. 6).



Рис. 6. Устройство управления шаговым электродвигателем

Под действием управляющей команды выбора  $n$ -ю канала контроллер привода СЧПУ вырабатывает цифровые сигналы для управления силовым транзисторным коммутатором, который в требуемой последовательности подключает постоянное напряжение к статорным обмоткам. Для получения малых значений углового перемещения за один шаг  $\alpha = \pi/p$  на роторе помещают постоянный магнит с большим количеством пар полюсов  $p$ .

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЗАНЯТИЯМ

#### 3.1 Лабораторная работа №1 – «Исследование механической характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя в режиме динамического торможения».

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

#### 3.2 Лабораторная работа №2 – «Схема реверсивного управления АД с торможением противовключением».

На практике часто применяется способ быстрой остановки электродвигателя путем переключения электродвигателя на ходу на обратное вращение. После переключения электродвигателя магнитное поле начинает вращаться в обратном направлении, а ротор продолжает по инерции вращаться, быстро снижая частоту вращения до нуля. В этот момент напряжение с клемм электродвигателя нужно снять, иначе электродвигатель начнет вращение в обратном направлении. Вручную этот момент зафиксировать не удастся, поэтому применяют специальное реле контроля скорости (РКС).

В данной лабораторной работе предлагается 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.

### **3.3 Лабораторная работа №3 – «Изучение схемы управления асинхронным электродвигателем из двух мест с защитой от обрыва фазы».**

В ходе данной 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.

Схема предназначена для управления электродвигателем, работающим под наблюдением оператора, местонахождение которого в процессе работы может изменяться. Например, при обслуживании поточной технологической линии оператор может находиться или у центрального пульта управления, обзореая и управляя всеми машинами, реализующими технологический процесс, или непосредственно у отдельной рабочей машины, осуществляя её техническое обслуживание, наладку и регулировку. Поскольку оператор не может контролировать состояние электроприводов всех рабочих машин одновременно и в течение всего рабочего периода, каждый электродвигатель должен быть надёжно защищён от аварийных режимов. В первую очередь защищён от наиболее вероятных режимов перегрузки и неполнофазного режима.

### **3.4 Лабораторная работа №4 – «Изучение схемы реверсивного управления асинхронным электродвигателем с защитой от заклинивания ротора».**

На практике часто используется схема реверсивного управления электродвигателями, осуществляющими через редуктор перемещение задвижек в системах нефте- водо- и газоснабжения производственных объектов. Запуск и остановка электродвигателя в прямом и обратном направлениях осуществляется по командам оператора, а отключение при достижении конечных положений задвижек автоматически с помощью конечных (путевых) выключателей.

Особенностью привода задвижек является то, что отключение электродвигателя при работе на закрытие задвижки должно происходить при полном её закрытии, исключая просачивание жидкости. Использовать для цели автоматизации отключения обычный путевой выключатель, реагирующий на положение задвижки, в данном случае нельзя, так как технически невозможно установить переключатель так, чтобы он размыкался точно в тот момент, когда задвижка плотно закрыта. Если выключатель сработает несколько раньше, задвижка будет приоткрыта, а если раньше задвижка сработает на упор, то выключатель вообще не отключит электродвигатель и он сгорит. Поэтому для отключения электродвигателя в момент плотного закрытия задвижки вместо конечного выключателя используют реле тока.

## **4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОМАШНИХ ЗАДАНИЙ**

Индивидуальные домашние задания выполняются в форме контрольной работы.

### **4.1 Темы индивидуальных домашних заданий**

«Расчет электропривода производственного механизма».

### **4.2 Содержание индивидуальных домашних заданий**

Учебным планом для студентов-заочников предусмотрено выполнение одной контрольной работы.

Для выполнения контрольной работы студенту необходимо изучить соответствующую литературу, решить задачи и упражнения, приведенные в рекомендованной литературе, чтобы иметь полное представление по рассматриваемому вопросу.

В начале каждой работы должно быть указано задание, которое выдается каждому студенту индивидуально и без которого контрольная работа не рецензируется.

При выполнении контрольного задания необходимо соблюдать следующие правила:

- а) в работе должны быть переписаны условия задачи соответственно решаемому варианту;
- б) выполнение каждой работы должно сопровождаться краткими объяснениями, необходимыми обоснованиями, подробными вычислениями;
- в) при вычислении каждой величины нужно указать, какая величина определяется;
- г) решение задачи надо произвести сначала в общем виде (формулы в буквенных выражениях) и после необходимых преобразований подставлять соответствующие числовые значения;
- д) необходимо указать размерность как всех заданных в условиях задачи величин, так и полученных результатов;
- е) графический материал желательно выполнять на миллиметровой бумаге;
- ж) в конце работы необходимо дать перечень использованной литературы, подписать ее и указать дату окончания работы.

На экзамене контрольные работы сдают экзаменатору (без контрольных работ студент к экзамену не допускается).

### **ЗАДАНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

1. Для системы трехфазный асинхронный двигатель — рабочая машина (двигатель питается от сети напряжением 380/220 В):

1.1. По данным нагрузочной диаграммы, используя метод эквивалентных величин, определить необходимую мощность приводного электродвигателя по нагреву. Выбрать по каталогу в качестве приводного электродвигателя четырехполусный асинхронный двигатель общего назначения серии 4А или двигатель с.-х. назначения.

1.2. Рассчитать и построить механическую характеристику электродвигателя  $\omega = f_1(M_{дв})$ , определить мощность, потребляемую из сети в номинальном режиме, номинальный и пусковой ток электродвигателя.

1.3. Рассчитать и построить на том же графике механическую характеристику рабочей машины  $\omega = f_2(M_c)$ , приведенную к угловой скорости вращения вала электродвигателя.

1.4. Определить графоаналитическим методом (методом площадей) продолжительность пуска электродвигателя с нагрузкой при номинальном напряжении.

1.5. Оценить условия запуска электродвигателя с нагрузкой при снижении питающего напряжения на  $\Delta U\%$ .

2. Составить принципиальную электрическую схему автоматизированного электропривода в соответствии с заданием. Предусмотреть защиту электродвигателя от перегрузки и токов короткого замыкания. Дать краткое описание работы схемы. Привести технические данные электрооборудования, аппаратуры управления и защиты.

3. По данным задания определить мощность водонагревательной установки типа УАП (ВЭТ) и выбрать нагревательные элементы по приложению. Привести принципиальную электрическую схему водонагревателя. Дать краткое описание установки.

## Методические рекомендации

### 1 Назначение

Научиться осуществлять построение круговой диаграммы асинхронного электродвигателя и по ней определять рабочие характеристики.

### 2. Краткие теоретические положения

Для построения круговой диаграммы по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания произвольно устанавливают масштабы электрических величин: масштаб тока  $m_i$  (А/мм) выбирают таким, чтобы при построении диаграммы на листе формата А1  $I_{1к.ном}/m_i = 100...150 мм$ ; масштаб напряжения

$m_u$  (В/мм); масштаб мощности  $m_p = m_i^3 U_{1ном}$  (Вт/мм); масштаб момента  $m_M = \frac{m_p}{\omega_1}$  (Нм/мм).

Построение круговой диаграммы (рис. 1) выполняется в следующем порядке. Проводят координатные оси и на оси ординат откладывают отрезок  $U_{1ном}/m_u$ , равный  $U_{1ном}$  в выбранном масштабе. Затем откладывают от него под углами  $\phi_{10}$  и  $\phi_{1к}$  отрезки ОХ и ОК, равные соответственно току холостого хода и короткого замыкания:  $ОХ = I_{10}/m_i$ ;  $ОК = I_{1к.ном}/m_i$ . Из точки Х проводят перпендикуляр к оси абсцисс, получая отрезок ХО<sub>1</sub>, который в масштабе мощности представляет собой сумму магнитных и механических потерь. Если по данным опыта холостого хода потери разделены, то отрезок О<sub>1</sub>Х следует разделить так, чтобы  $ХС = \Delta P_{мех}/m_p$ . Приближённо отрезок О<sub>1</sub>Х можно разделить на равные отрезки ХС и СО<sub>1</sub>, где  $СО_1 = \Delta P_m/m_p$ . Далее соединяют точку С с точками О и К, получая вектор тока идеального холостого хода  $I_c = m_i CO$  и приведённое значение тока ротора в режиме короткого замыкания  $-I'_{2к} = m_i CK$ . Через точку С параллельно оси абсцисс проводят линию СВ, которая определяет положение диаметра окружности круговой диаграммы. Восстановив из середины отрезка СК перпендикуляр до пересечения с линией СВ, находят центр О<sub>2</sub> окружности и проводят её радиусом СО<sub>2</sub>.

В пределах дуги окружности СК асинхронная машина работает в двигательном режиме: точка С соответствует режиму идеального холостого хода, при котором потребляемая из сети мощность расходуется на перемагничивание и нагрев стали сердечника статора ( $\Delta P_m$ ), а точка К – режиму работы двигателя с заторможенным ротором, при котором мощность затрачивается на нагрев обмоток статора и ротора, т.е.

$$P_{1к} = \Delta P_m + \Delta P_{\phi 1} + \Delta P_{\phi 2}. \quad (1)$$

Поскольку потребляемая из сети мощность  $P_{1к}$  пропорциональна активной составляющей тока статора  $I_{1к.ном}$ , то на круговой диаграмме в масштабе мощности  $m_p$  её изображают отрезком  $KN = KM + MN$ . Так как отрезок  $MN = CO_1 = \Delta P_m/m_p$ , то отрезок  $KM$  представляет собой в масштабе мощности сумму потерь мощности  $\Delta P_{\phi 1} + \Delta P_{\phi 2}$ . Разделив отрезок  $KM$  в отношении  $KL/LM = R'_2/R_1$  и проводя через точку L прямую СТ, получаем ещё одну характерную точку Т круговой диаграммы. В этой точке поступающая из сети электрическая мощность  $P_1$  расходуется только в статоре:  $P_1 = \Delta P_m + \Delta P_{\phi 1}$ . Это означает, что

сопротивление ротора  $R'_2/s = 0$ , а следовательно, скольжение  $s = \pm\infty$ . Такого режима можно достичь только теоретически.

Точки С, К и Т делят окружность на три части, соответствующие работе асинхронной машины в двигательном режиме (часть окружности САК), генераторном режиме (часть СВТ) и режиме электромагнитного торможения (часть КТ). В двигательном режиме частота вращения ротора изменяется в диапазоне  $0 \leq \omega_2 \leq \omega_1$ , а скольжение – от нуля до единицы; в генераторном -  $\omega_2 > \omega_1$  и скольжение изменяется от 0 до минус бесконечности; в тормозном режиме, когда  $\omega_2 < 0$ , скольжение изменяется от 1 до плюс бесконечности.

На круговой диаграмме линию ОН называют линией электрической мощности  $P_1$ , подводимой к асинхронной машине из сети (или отдаваемой ею в сеть), линия СТ является линией электромагнитной мощности  $P_{эм}$  или электромагнитного момента М, линия СК – линией полной механической мощности  $P_{мех}$ , а линия ХК – линией полезной мощности на валу  $P_2$ . Мощности определяют отрезками, измеренными по вертикали от заданной точки на окружности токов до указанных линий.

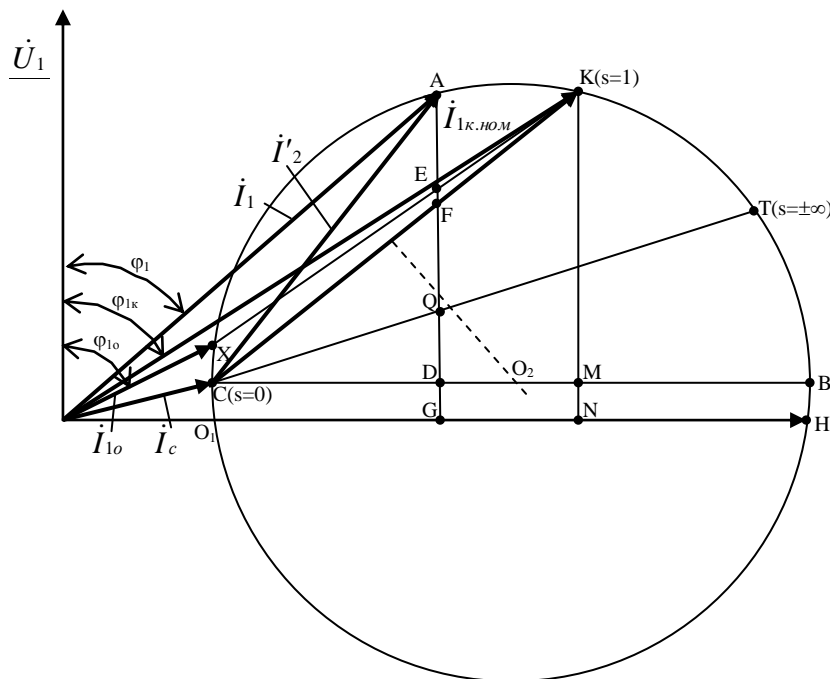
Для определения различных величин, характеризующих работу асинхронной машины, рассмотрим режим её работы в точке А. Из диаграммы (рис. 1) имеем:  $I_1 = OA m_i$ ;  $-I'_2 = C A m_i$ ;  $P_1 = AG m_p$ ;  $\Delta P_M = DG m_p$ ;

$\Delta P_{\text{э1}} = DQ m_p$ ;  $P_{эм} = AQ m_p$ ;  $P_{\text{э2}} = QF m_p$ ;  $M = AQ m_M$ ;  $\Delta P_{мех} + \Delta P_{доб} = FE m_p$ ;  $P_{мех} = AF m_p$ ;  $P_2 = AE m_p$ .

Приведённые построения считают основными, но иногда применяют и дополнительные построения для определения скольжения  $s$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$  и коэффициента полезного действия  $\eta$ . Однако

их можно определить и из основных построений  $s = \frac{\Delta P_{\text{э2}}}{P_{эм}} = \frac{F Q}{A Q}$ ;

$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{A E}{A G}$ ;  $\cos \varphi$  определяют непосредственно по значению угла  $\varphi_1$ .



### Рис. 1: Круговая диаграмма

Приведённую упрощённую диаграмму применяют благодаря своей простоте и наглядности. Однако достоверные результаты по ней могут быть получены, если ток статора не превышает номинального значения, а скольжение не больше критического значения.

### Дополнительная литература

Сукманов В.И. Электрические машины и аппараты. – М.:Колос, 2001 с.155-159

### 3 Задание:

Построить круговую диаграмму и рабочие характеристики трёхфазного асинхронного электродвигателя с каталожными данными, приведёнными в таблице.

Таблица 0-1

Вариант	дв.	$P_{\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	$\mu_k$	$\mu_p$	$\mu_{\min}$	$k_i$
1	4AA50B2Y3	120	220	2740	0,6	0,7	2,2	2	1,2	5
2	4AA56A2Y3	180	380	2800	0,66	0,76	2,2	2	1,2	5
3	4AA56B2Y3	250	220	2770	0,68	0,77	2,2	2	1,2	5
4	4A71A4Y3	550	220	1390	0,705	0,7	2,2	2	1,6	4,5
5	4A63A2Y3	370	380	2750	0,7	0,86	2,2	2	1,2	5
6	4A63B2Y3	550	220	2740	0,73	0,86	2,2	2	1,2	5
7	4A71A2Y3	750	380	2840	0,77	0,87	2,2	2	1,2	5,5
8	4A71B2Y3	1100	220	2810	0,775	0,87	2,2	2	1,2	5,5
9	4A80A2Y3	1500	380	2850	0,81	0,85	2,2	2	1,2	6,5
10	4AA56A4Y3	120	220	1375	0,63	0,66	2,2	2	1,2	5
11	4AA56B4Y3	180	380	1365	0,64	0,64	2,2	2	1,2	5
12	4AA63A4Y3	250	220	1380	0,68	0,65	2,2	2	1,2	5
13	4AA63B4Y3	370	380	1365	0,68	0,69	2,2	2	1,2	5
14	4A71A4Y3	550	220	1390	0,705	0,7	2,2	2	1,6	4,5

15	4A71B4Y3	750	380	1390	0,72	0,73	2,2	2	1,6	4,5
16	4A80A4Y3	1100	220	1420	0,75	0,81	2,2	2	1,6	5
17	4AA63A6Y3	180	380	885	0,56	0,62	2,2	2,2	1,5	3
18	4A63B6Y3	250	220	890	0,59	0,62	2,2	2,2	1,5	3
19	4A71A6Y3	370	380	910	0,645	0,69	2,2	2	1,8	4
20	4A71B6Y3	550	220	900	0,675	0,71	2,2	2	1,8	4
21	4A80A6Y3	750	380	915	0,69	0,74	2,2	2	1,6	4
22	4A80B6Y3	1100	220	920	0,74	0,74	2,2	2	1,6	4
23	4A90L6Y3	1500	380	935	0,75	0,74	2,2	2	1,7	4,5
24	4A100L6Y3	2200	220	950	0,81	0,73	2,2	2	1,6	5
25	4A112MA6Y3	3000	380	955	0,81	0,76	2,5	2	1,8	6
26	4A71B8Y3	250	220	680	0,56	0,65	1,7	1,6	1,2	3
27	4A80A8Y3	370	380	675	0,615	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5
28	4A80B8Y3	550	220	700	0,64	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5
29	4A90LA8Y3	750	380	700	0,68	0,62	1,9	1,6	1,2	3,5
30	4A90LB8Y3	1100	220	700	0,7	0,68	1,9	1,6	1,2	3,5

#### 4. Порядок выполнения задания

Как показано выше, для построения круговой диаграммы электродвигателей требуется получить исходные данные из опытов холостого хода и короткого замыкания. Поскольку проведение таких опытов каждым студентом для заданных электродвигателей невозможно из-за трудоёмкости опытов и отсутствия материальной базы, построение круговой диаграммы осуществляется приближённо по каталожным данным в следующем порядке:

1. Определяем суммарные потери мощности в электродвигателе при номинальном режиме

$$\Delta P_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\eta_H} (1 - \eta_H) =$$

**Формула 1**

2. Определяем потери мощности при холостом ходе из условия, что общие потери мощности при любой нагрузке электродвигателя равны сумме постоянных потерь  $\Delta P_c$  (не зависящих от нагрузки) и переменных потерь  $\Delta P_v$  (пропорциональных квадрату мощности на валу)

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_v = \Delta P_c + \Delta P_{v.НОМ} \left( \frac{P^2}{P_{НОМ}^2} \right)$$

**Формула 2**

Тогда

$$\Delta P_{НОМ} = \Delta P_c + \Delta P_{v.НОМ} \cdot$$

**Формула 3**

Известно, что для асинхронного электродвигателя в среднем

$$\Delta P_{v.HOM} = \Delta P_c / 0,6.$$

**Формула 4**

Подставив это выражение в формулу 3, получим

$$\Delta P_c = \Delta P_{xx} = \frac{3}{8} \Delta P_{HOM} =$$

**Формула 5**

3. При отсутствии опытных данных по распределению потерь холостого хода между магнитными и механическими потерями ориентировочно можно принять, что распределяются они поровну

$$\Delta P_{MEX.XX} = \Delta P_M = \Delta P_{XX} / 2 =$$

**Формула 6**

4. Определяем номинальный ток статора

$$I_{1.HOM} = \frac{P_{HOM}}{3U_{HOM}\eta_H \cos \varphi_{HOM}} =$$

**Формула 7**

5. Определяем ток короткого замыкания, равный пусковому току

$$I_{1K.HOM} = I_n = I_{1HOM} k_i =$$

где  $k_i$  – кратность пускового тока по отношению к номинальному.

**Формула 8**

6. Определяем ток холостого хода, равный в первом приближении 40% от номинального тока

$$I_{1.0} = 0.4 I_{1.HOM} =$$

**Формула 9**

7. Определяем угол между током и напряжением статора при номинальном режиме электродвигателя

$$\varphi_{HOM} = \arccos \varphi_{HOM} =$$

**Формула 10**

8. Определяем момент на валу номинальный

$$M_{HOM} = P_{HOM} / \omega_{HOM} =$$

**Формула 11**

9. Определяем электромагнитный момент при номинальном режиме

$$M_{\varepsilon.HOM} = \frac{P_{MEX.HOM}}{\omega_{HOM}} = \frac{P_{HOM} + \Delta P_{MEX.XX}}{\omega_{HOM}} = \frac{P_{HOM} + \Delta P_{MEX.XX} \frac{\omega_{HOM}}{\omega_1}}{\omega_{HOM}} =$$

**Формула 12**

10. Определяем электромагнитную мощность при номинальном режиме

$$P_{\text{ЭМ.НОМ}} = M_{\text{ЭМ.НОМ}} \omega_1 =$$

**Формула 13а**

11. Определяем максимальный или критический момент

$$M_{\text{MAX}} = M_K = \mu_K M_{\text{НОМ}} =$$

**Формула 14**

где  $\mu_K$  – кратность критического момента по отношению к номинальному моменту (перегрузочная способность).

12. Определяем номинальное скольжение

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_1 - n_{\text{НОМ}}}{n_1} =$$

где  $n_1$  – частота вращения магнитного поля, равная  $60f/p$  ( $p$ - число пар полюсов)

**Формула 15**

13. Определяем критическое скольжение

$$s_K = s_{\text{НОМ}} \left( \mu_K + \sqrt{\mu_K^2 - 1} \right) =$$

**Формула 16**

14. Обозначим:

активное сопротивление короткого замыкания  $R_K = R_1 + R'_2$ ;

**Формула 17**

индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_K = X_1 + X'_2$ ;

**Формула 18**

15. Определяем полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = U_{\text{НОМ}} / I_{\text{К.НОМ}} =$$

**Формула 19**

16. Примем

$$R_1 = R'_2 = R_K / 2$$

**Формула 20**

17. В выражении

$$s_K = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}},$$

**Формула 21**

приняв активное сопротивление обмотки статора  $R_1$  равным нулю, так как оно значительно меньше реактивного сопротивления короткого замыкания  $X_K$ , получим

$$2s_K = \frac{R_K}{X_K} = \text{ctg } \varphi_K.$$

**Формула 22**

Подставив выраженное из полученной формулы значение  $X_K$  в выражение полного сопротивления короткого замыкания

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + \frac{R_K^2}{4S_K^2}} = \frac{R_K}{2S_K} \sqrt{4S_K^2 + 1},$$

**Формула 23**

найдем

$$R_K = \frac{2S_K Z_K}{\sqrt{4S_K^2 + 1}} =$$

**Формула 24**

18. Определяем индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} =$$

**Формула 25**

19. Определяем диаметр окружности круговой диаграммы

$$D = U_{НОМ} / X_K =$$

**Формула 26**

20. Определяем коэффициент мощности при коротком замыкании

$$\cos \varphi_K = \frac{R_K}{Z_K} =$$

**Формула 27**

21. Определяем угол между током и напряжением в номинальном режиме

$$\varphi_{НОМ} = \arccos \varphi_{НОМ} =$$

**Формула 28**

22. Определяем угол между током и напряжением в режиме короткого замыкания

$$\varphi_K = \arccos \varphi_K =$$

**Формула 29**

Выбираем масштабы тока, мощности, напряжения и момента из условия, что диаграмма будет изображена на листе формата А1:  $m_i$  (А/мм) выбираем таким, чтобы  $I_{1K.НОМ} / m_i = 300 \dots 450 \text{ мм}$ ; масштаб напряжения  $m_u$  (В/мм); масштаб мощности

$$m_p = 3U_{НОМ} m_i \text{ (Вт/мм)}; \text{ масштаб момента } m_M = \frac{m_p}{\omega_1} \text{ (Нм/мм)}.$$

23. На листе формата А1 выполняем следующие построения:

- откладываем в выбранном масштабе вектор напряжения  $U_{ном}=U_{1ном}$ ;
- горизонтально проводим линию ОН (линию подведённой мощности), перпендикулярную вектору напряжения;
- под углом  $\varphi_{1ном}$  из начала координат проводим вектор номинального тока статора, в масштабе равного длине отрезка  $OA_{ном}=I_{1ном}/m_i$ ;
- из точки  $A_{ном}$  опускаем перпендикуляр на линию ОН;
- откладываем отрезок  $A_{ном}E$ , равный в масштабе  $m_p$  номинальной мощности электродвигателя ( $A_{ном}E=P_{2ном}/m_p$ );
- под углом  $\varphi_K$  из начала координат проводим вектор тока короткого замыкания, в масштабе равного длине отрезка  $I_{1К.ном}/m_i$ , тем самым определяем точку К;
- соединяем точки  $A_{ном}$  и К и из середины отрезка  $A_{ном}K$  проводим перпендикуляр до пересечения с линией ОН;
- с центром в точке пересечения в первом приближении проводим окружность через точки  $A_{ном}$  и К;
- через точки К и Е проводим линию полезной мощности КЕ тем самым определяем точку Х на пересечении линии с окружностью;
- из точки Х опускаем перпендикуляр до пересечения с линией ОН в точке  $O_1$ ;
- приняв механические и магнитные потери равными друг другу делим отрезок  $XO_1$  пополам и получаем точку С;
- корректируем окружность и положение точек Х и С, переместив центр окружности  $O_2$  на пересечение перпендикуляра с линией СВ
- строим вектора приведённых токов ротора при номинальном и пусковом режимах, соединив точку С соответственно с точками  $A_{ном}$  и К;
- на пересечении перпендикуляра  $A_{ном}G_{ном}$  с вектором приведённого тока ротора при заторможенном роторе  $-I'_{2к}$ , являющимся одновременно линией механической мощности, отмечаем точку  $F_{ном}$
- на перпендикуляре  $A_{ном}G_{ном}$  откладываем отрезок  $AQ_{ном}$  и проводим линию электромагнитной мощности  $CQ_{ном}$  до пересечения с окружностью в точке Т.
- проведём касательные к окружности (две), параллельные линии СТ, в точках касания  $A_{к.дв}$  и  $A_{к.ген}$  будем иметь максимальные (критические) моменты соответственно для двигательного и генераторного режимов.

24. Перемещая точку А по окружности для каждого из её положений определить: ток статора :

$I_1=OAm_i$ ; приведённый ток ротора  $-I'_2=C A m_i$ ; потребляемую из сети мощность  $P_1=AGm_p$ ;  $\Delta P_M=DGm_p$ ; электрические потери в меди статора  $\Delta P_{\sigma 1}=DQm_p$ ; электромагнитную мощность  $P_{эм}=AQm_p$ ; электрические потери в роторе  $P_{\sigma 2}=QFm_p$ ; электромагнитный момент  $M=AQm_m$ ; сумму механических и добавочных потерь  $\Delta P_{мех}+\Delta P_{доб}=FEm_p$ ; механическую мощность  $P_{мех}=AFm_p$ ; полезную мощность (мощность

на валу)  $P_2 = A E m_p$ ; скольжение  $s = \frac{\Delta P_{\omega_2}}{P_{\omega_2}} = \frac{F Q}{A Q}$ ; коэффициент полезного действия

$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{A E}{A G}$ ; частоту вращения вала электродвигателя  $\omega_2 = \omega_1(1-s)$  и непосредственно по

значению угла  $\varphi_1 - \cos \varphi_1$

Между точками С и  $A_{НОМ}$  взять 4...5 точек, между точками  $A_{НОМ}$  и  $A_{К.дв}$  – 2...3 точки, между точками  $A_{К.дв}$  и К 4...5 точек, между точками С и  $A_{К.ген}$  4...5 точек.

Результаты определения свести в таблицу.

На отдельном листе формата А1 построить рабочие характеристики электродвигателя в диапазоне полезной мощности  $P_2$  от 0 до  $1,5 P_{2НОМ}$  и механическую характеристику в диапазоне частоты вращения от нуля до

$\omega_{к.ген}$