

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
Северо-Западный государственный заочный технический университет

Кафедра электротехники и электромеханики

Е.П. Брандина

# **Электрические машины**

Письменные лекции

Примеры решения задач

Санкт–Петербург

2004

**Е.П. Брандина**

# **Электрические машины**

**Письменные лекции**

**Примеры решения задач**

**Санкт–Петербург**

**2004**

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
УДК 621.313 (07)

Электрические машины. Письменные лекции. Примеры решения задач. -  
СПб.: СЗТУ, 2004. - 152 с.

Рассматриваются принципы устройства, основные вопросы теории, режимы работ, эксплуатационные свойства трансформаторов и электрических машин. Приведены численные примеры решения задач.

Издание предназначено для студентов, изучающих дисциплины: "Электромеханика", "Электрические машины", "Электрические машины специального назначения", "Электрические машины и аппараты", "Технические средства управления и информатики".

Рассмотрено на заседании кафедры "Электротехника и электромеханика" 8.02.99 г., одобрено методической комиссией энергетического факультета 6.06.99 г.

Рецензенты: кафедра "Электротехника и электромеханика" СЗТУ (зав. Кафедрой профессор В.И.Рябуха); Ю.Ф.Кокунов, ст. преп. кафедры "Электрические машины" СПГПТУ.

Составитель : Е.П. Брандина, канд. техн. наук, доц

© Северо-Западный государственный технический университет, 2004  
© Брандина Е.П. 2004

# 1. Трансформаторы

## 1.1. Общие сведения

### 1.1.1. Определение

Трансформатор - электромагнитный статический аппарат, который преобразует параметры переменного тока : напряжение, ток, частоту, число фаз .

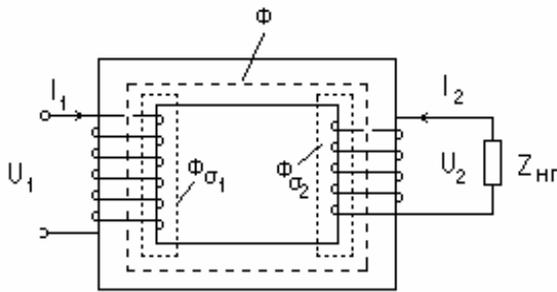


Рис.1.1

В простейшем случае трансформатор представляет собой магнитопровод, с размещенными на нем двумя обмотками (рис.1.1).

### 1.1.2. Принцип работы

При включении первичной обмотки на переменное напряжение  $U_1$  возникает ток  $I_1$ , который создает переменное магнитное поле. Это поле наводит в обеих обмотках ЭДС ( $E_1$  и  $E_2$ ). Если вторичную обмотку включить на нагрузку ( $Z_{нГ}$ ), то возникает ток  $I_2$ . Основным магнитный поток  $\Phi$  создается суммарным действием токов  $I_1$  и  $I_2$  (рис.1.2).

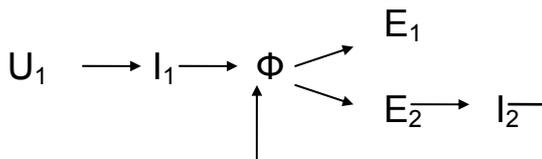


Рис.1.2

### 1.1.3. Классификация трансформаторов

Классификация трансформаторов возможна по признакам [9] :

- по области применения (силовые, измерительные, специальные);
- по конструкции (стержневые, броневые, тороидальные),
- по способу охлаждения (сухие, масляные),
- по электрическим параметрам (по мощности, числу фаз, напряжению, частоте, числу обмоток).

Различают трансформаторы

- по числу фаз : однофазные, трехфазные и многофазные;
- по числу обмоток : двухобмоточные и многообмоточные;
- по напряжению: повышающие ( $U_2 > U_1$ ) и понижающие ( $U_2 < U_1$ ).

Наибольшее применение находят силовые трансформаторы напряжения [ 9 ]. Суммарная мощность таких трансформаторов, установленных в электрических сетях, превышает мощность источников энергии в 7...10 раз. Это обусловлено необходимостью многоступенчатого повышения и понижения уровня напряжения.

Магнитопровод силового трансформатора выполняется шихтованным, т.е. набранным из отдельных листов электротехнической стали. При  $f = 50$  Гц толщина листов обычно составляет 0,5 мм, при повышении частоты толщина листов уменьшается. Шихтовка применяется для уменьшения потерь в стали на вихревые токи.

#### 1.1.4. Схемы и группы соединения обмоток трансформатора

Для однофазного трансформатора возможны 2 случая намотки вторичной обмотки (рис.1.3 ) [1]. При этом ЭДС первичной обмотки  $E_1$  и вторичной обмотки  $E_2$  будут находиться соответственно в фазе или в противофазе. Группа соединения обмоток определяется углом сдвига фаз между первичным и вторичным линейными напряжениями. При этом вектор первичной линейной ЭДС эквивалентируется минутной стрелкой часов, расположенной на цифре 12, а вектор вторичной линейной ЭДС эквивалентируется часовой стрелкой. Таким образом , для однофазного трансформатора возможны две группы соединения: 0 и 6.

ГОСТ 11677-85 допускает для промышленного использования только нулевую группу соединения.

Рассмотрим трехфазный трансформатор при соединении первичных и вторичных обмоток в " звезду " (  $Y$  ) . Если одноименные фазы находятся на одном и том же стержне , то аналогично однофазному трансформатору получаем две группы соединений: 0 и 6. Если же одноименные фазы будут находится на разных стержнях, то получим остальной спектр четных групп: 2 и 8, 4 и 10. Например, на рис. 1.4 показано соединение обмоток для группы 0 [1]. При наличии вывода нулевой точки соединение обмоток обозначается  $Y_0$

Рассмотрим соединение фаз первичной обмотки в  $Y$  , а фаз вторичной обмотки в "треугольник" ( $\Delta$ ). На рис. 1.5 показано соединение обмоток, соответствующее группе 11. Если поменять начала и концы фаз, например вторичной обмотки, то получим группу соединений 5. Если поменять местами фазировку, то можно получить все остальные нечетные группы: 7 и 1, 9 и 3 [1].

ГОСТ [ ] допускает для промышленного использования только 0 и 11 группы соединений . Итак, по ГОСТу предусматривается применение следующих групп:  $Y / Y_0 - 0$ ,  $\Delta / Y_0 - 11$ ,  $Y / \Delta - 11$ ,  $Y_0 / \Delta - 11$ ,  $Y / Z - 11$ .

Схема соединения Z (зигзаг) показана на рис. 1.6 [1]. Эта схема может применяться при несимметричной нагрузке фаз.

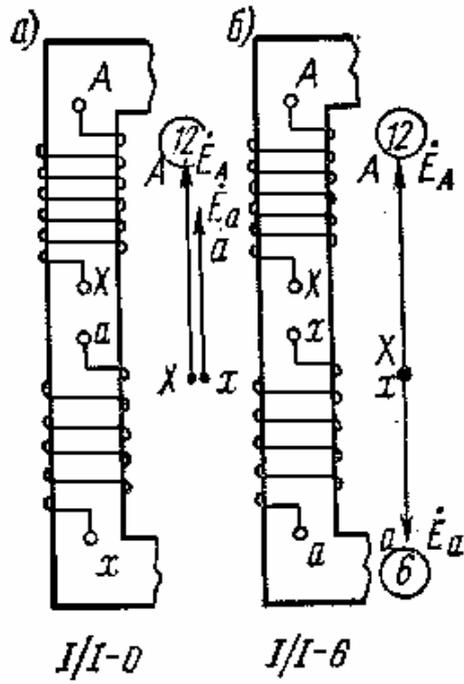


Рис.1.3

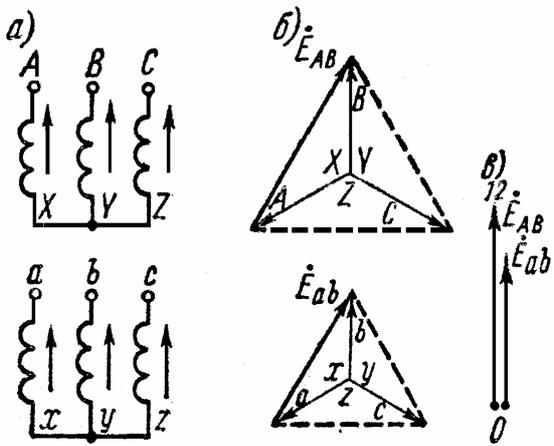


Рис.1.4

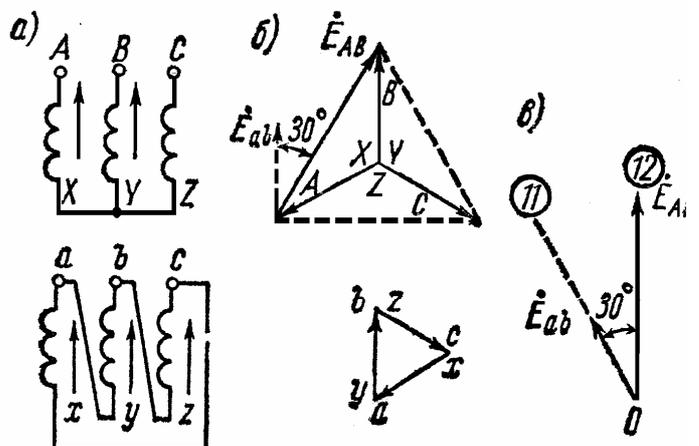


Рис.1.5

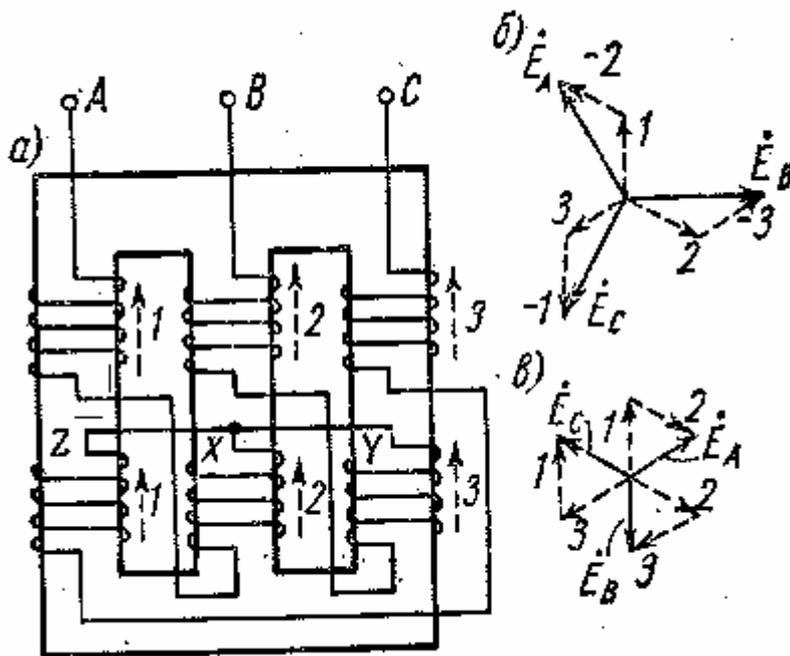


Рис. 1.6

## 1.2. Основные уравнения

### 1.2.1. ЭДС обмоток

По закону Максвелла ЭДС, индуцируемая в контуре с числом витков  $W$  переменным магнитным потоком  $\Phi$ , равна

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.1)$$

Примем, что  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ,  
где круговая частота

$$\omega = 2\pi f,$$

$f$  - частота питающей сети.

Тогда

$$e = -W\omega\Phi_m \cos\omega t = -W\omega\Phi_m \sin(90^\circ - \omega t) = W\omega\Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1.2)$$

Амплитуда ЭДС

$$E_m = W\omega\Phi_m$$

Действующее значение ЭДС

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi f\Phi_m W \approx 4,44 f\Phi_m W.$$

(1.3)

Индекс "m" у потока  $\Phi$  обычно опускают.

По фазе ЭДС  $E$  отстает от потока  $\Phi$  на  $90^\circ$ , что следует из сравнения формул (1.1) и (1.2).

На векторной диаграмме (рис.1.7) показано расположение векторов  $E$  и  $\Phi$ .

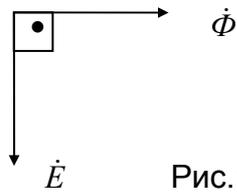


Рис.1.7

Согласно (1.3) ЭДС первичной и вторичной обмоток имеют вид

$$E_1 = 4,44f\Phi W_1 ; \quad E_2 = 4,44f\Phi W_2$$

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2} . \quad (1.4)$$

Обмотки трехфазного трансформатора могут быть соединены в «звезду» (Y) или в «треугольник» ( $\Delta$ ) .

Соотношение линейных и фазных напряжений и токов:

для Y -  $U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi, I_L = I_\phi ;$

для  $\Delta$  -  $U_L = U_\phi, I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi$

Полная мощность :

однофазного трансформатора  $S = U \cdot I$

трехфазного трансформатора  $S = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$

Активная мощность нагрузки  $P = S \cos\varphi,$

реактивная мощность  $Q = S \sin\varphi,$

где  $\varphi$  - угол нагрузки.

### 1.2.2. Уравнения напряжений

Магнитный поток трансформатора (рис.1.1) можно представить в виде основного магнитного потока  $\Phi$  , созданного совместным действием токов  $I_1$  и  $I_2$ , и сцепляющегося с обеими обмотками, и потоков рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  и  $\Phi_{\sigma 2}$  , каждый из которых создается только своим током ( $I_1$   $\Phi_{\sigma 1}$  и  $I_2$   $\Phi_{\sigma 2}$ ) и сцепляющихся только со своей обмоткой. Основной магнитный поток  $\Phi$  наводит основные ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . Потоки рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  и  $\Phi_{\sigma 2}$  наводят соответственно ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 1}$  и  $E_{\sigma 2}$  (каждый поток - в своей обмотке).

Потокосцепление рассеяния  $\psi_\sigma = L i ,$

где  $i = I_m \sin\omega t,$

$L$  - коэффициент самоиндукции обмотки.

ЭДС рассеяния

$$e_{\sigma} = -\frac{d\psi_{\sigma}}{dt} = -L \frac{di}{dt} = -\omega LI_m \cos \omega t = \omega LI_m \sin(\omega t - 90^{\circ}).$$

Действующее значение ЭДС в комплексном виде

$$\dot{E}_{\sigma} = -jxI = -j\omega LI, \quad (1.5)$$

где  $x = \omega L$  - индуктивное сопротивление рассеяния (самоиндукции).

Наличие (-j) в формуле (1.5) означает, что вектор ЭДС  $\dot{E}_{\sigma}$  отстает по фазе от вектора тока  $\dot{I}$  на  $90^{\circ}$ .

Согласно (1.5) можно записать

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -jx_1 \dot{I}_1, \quad \dot{E}_{\sigma 2} = -jx_2 \dot{I}_2. \quad (1.6)$$

Применим закон Кирхгофа к первичной и вторичной обмоткам:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} &= \dot{I}_1 r_1, \\ \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} &= \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2. \end{aligned} \quad \text{---}$$

С учетом (1.6) можно записать

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1, \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j\dot{I}_2 x_2. \end{aligned} \quad (1.7)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  - активные сопротивления обмоток

Полное сопротивление обмоток  $z_1 = r_1 + jx_1$ ;  $z_2 = r_2 + jx_2$ .

Тогда

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1, \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2. \end{aligned}$$

### 1.2.3. Уравнение токов

Рассмотрим уравнение напряжения

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1.$$

Величина  $I_1 z_1$  для трансформаторов средней мощности составляет 5-10%  $U_1$ , поэтому можно принять, что  $U_1 \approx E_1 = 4,44 f\Phi W$ . Так как напряжение сети  $U_1 = \text{const}$ , то отсюда следует, что поток, определяемый напряжением сети,  $\Phi = \text{const}$ . Следовательно для всех режимов работы постоянна МДС, создающая этот поток.

МДС при нагрузке  $F = I_1 W_1 + I_2 W_2$ .

МДС при холостом ходе (х.х.)  $F = I_{10} W_1$ , где  $I_{10}$  - ток х.х.,  $I_2 = 0$ .

Приравнявая эти МДС, получаем уравнение

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_{10} W_1 .$$

Разделим на  $W_1$  и, с учетом  $k = \frac{W_1}{W_2}$ , получим уравнение токов

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{1}{k} = \dot{I}_{10} . \quad (1.8)$$

### 1.3. Схема замещения. Приведенный трансформатор

Уравнения напряжений (1.7) и токов (1.8) позволяют определить все режимы работы трансформатора. Однако неудобство этих расчетов заключается в первую очередь, как правило, значительным отличием параметров и следовательно токов и напряжений первичной и вторичной обмоток, что затрудняет построение векторной диаграммы и т. д. Кроме того, в данном случае между обмотками существует не только электрическая, но и магнитная связь.

Для того, чтобы можно было связать первичную и вторичную обмотки электрически, устранить их магнитную связь и воспользоваться схемой замещения, принимают, что  $E_1 = E_2$  и  $W_1 = W_2$ . Такой трансформатор называется приведенным. Параметры вторичной обмотки приведенного трансформатора обозначаются со штрихами. Схема замещения имеет вид, показанный на рис.1.8. Схема замещения относится к одной фазе трансформатора. Параметры обмоток  $z_1$  и  $z'_2$  на схеме замещения выносят отдельно [2].

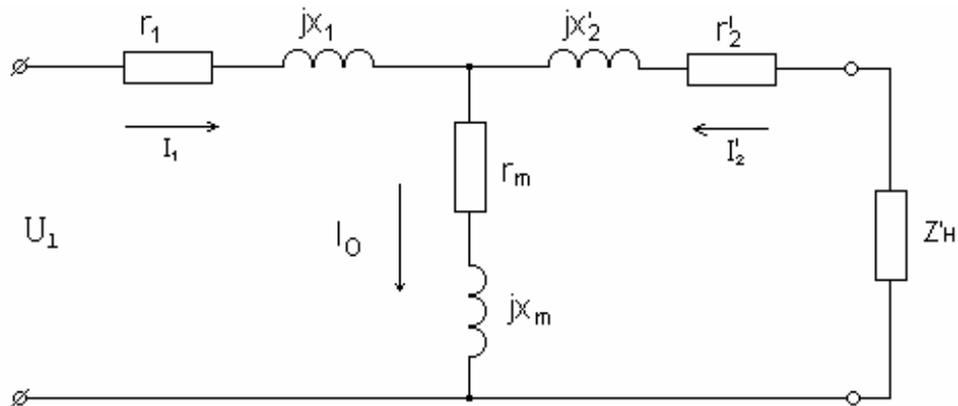


Рис.1.8

Активное сопротивление  $r_m$  определяется потерями в стали

$$P_{cm} = m_1 I_o^2 r_m ,$$

где  $m_1$  - число фаз трансформатора.

Индуктивное сопротивление  $x_m$  отражает взаимоиндукцию обмоток.

Коэффициенты перехода от приведенного трансформатора к реальному определяются из условия сохранения энергетических

показателей :

$$E'_2 = E_2 \frac{W_1}{W_2} = kE_2 ,$$

$$I'_2 = I_2 \frac{1}{k} \quad (\text{из равенства } E_2 I_2 = E'_2 I'_2),$$

$$r'_2 = r_2 k^2 \quad (\text{из равенства } I^2_2 r_2 = I'^2_2 r'_2).$$

Аналогично,

$$x'_2 = x_2 k^2 , \quad z'_2 = z_2 k^2 .$$

Уравнения напряжений и токов для схемы замещения (рис.1.8) согласно уравнениям (1.7 и 1.8) примут вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 r'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 \quad (1.9)$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_{10}$$

#### 1.4. Режим холостого хода ( $I_2 = 0$ )

Так как в режиме х.х. вторичная обмотка разомкнута ( $I_2 = 0$ ), то схема замещения имеет вид рис.1.9.

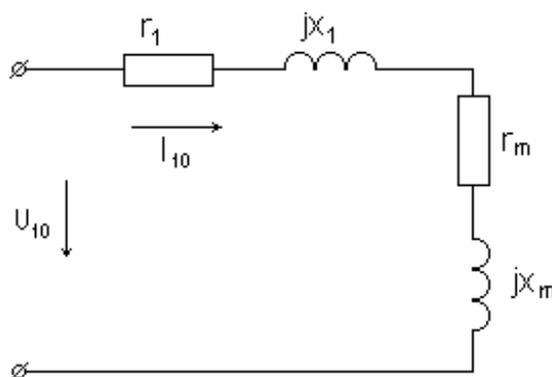


Рис. 1.9

Поскольку  $r_1 \ll r_m$  и  $x_1 \ll x_m$ , то сопротивлением  $r_1$  и  $x_1$  (рис.1.9) можно пренебречь.

Опытное определение параметров производится по схеме рис. 1.10.

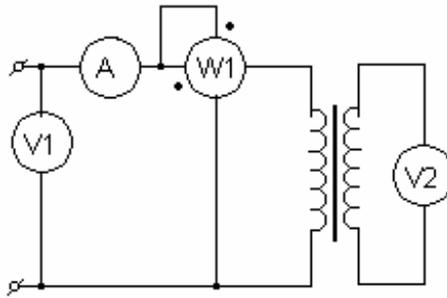


Рис.1.10

В результате опыта определяем параметры:

$$k = \frac{U_1}{U_2}; \quad z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}} \approx z_m; \quad r_0 = \frac{P_{10}}{I_{10}^2} \approx r_m; \quad x_0 \approx x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2}. \quad (1.10)$$

Значение  $I_{10}$  составляет 2...5 %  $I_H$ .

Мощность  $p_0$ , потребляемая трансформатором в режиме х.х, определяется в основном потерями в стали (на гистерезис и вихревые токи), т.к. потерями в первичной обмотке  $p_{M1} = m_1 I_{10}^2 r_1$  можно пренебречь в силу малости тока  $I_{10}$ . Значение  $p_0$  приводится в паспортных данных трансформатора.

### 1.5. Режим короткого замыкания ( $U_2 = 0$ )

В режиме короткого замыкания (к.з.) токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}'_2$  сдвинуты по фазе почти на  $180^\circ$  и примерно равны, поэтому

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_{10} \approx 0.$$

Это позволяет пренебречь контуром намагничивания (ветвью  $r_m, X_m$ ).

Кроме того, если учесть, что  $r_1 + r'_2 = r_k, \quad x_1 + x'_2 = x_k$ ,

то схема замещения примет вид рис. 1.11.

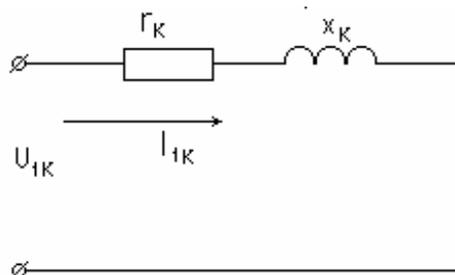


Рис. 1.11

Опытное определение параметров производится по схеме рис. 1.12 .

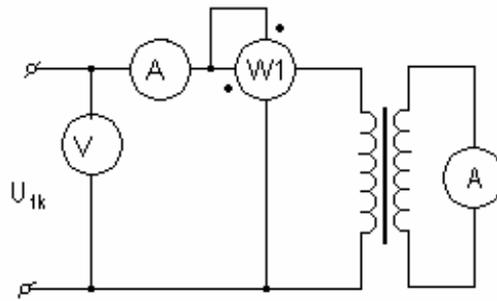


Рис.1.12

В результате опыта определяем параметры:

$$z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}; \quad r_K = \frac{P_{1K}}{I_{1K}^2}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}; \quad r_1 \approx r_2' = \frac{r_K}{2}; \quad x_1 \approx x_2' = \frac{x_K}{2}. \quad (1.11)$$

Таким образом, опыты х.х. и к.з. позволяют определить все параметры схемы замещения (рис.1.8).

Напряжением короткого замыкания  $u_K$  называется такое напряжение, при котором ток короткого замыкания равен номинальному току  $I_K = I_H$ ,

$$u_K = I_H Z_K.$$

(1.12)

Активная и реактивная составляющие:

$$u_{KA} = I_H r_K = u_K \cos\varphi_K, \quad u_{KP} = I_H x_K = u_K \sin\varphi_K, \quad (1.13)$$

где  $\cos\varphi_K = r_K / Z_K$ ,  $\sin\varphi_K = x_K / Z_K$ .  
(1.14)

Напряжение короткого замыкания выражается в процентах:

$$u_{K\%} = u_K / U_H \cdot 100\% \quad (1.15)$$

и приводится в паспортных данных трансформатора, а также его актив- ная и реактивная составляющие. Значение  $u_{K\%}$  составляет 5...10%.

Мощность, потребляемая трансформатором в режиме к. з. , определяется потерями в обмотках. Для номинального значения тока эта мощность равна

$$p_{KH} = m I_H^2 r_K. \quad (1.16)$$

Это значение приводится в паспортных данных.

Потери в обмотках для текущего значения тока можно определить по формуле

$$p_k = p_{кн} (k_{нг})^2, \quad (1.17)$$

где коэффициент нагрузки

$$k_{нг} = I / I_H. \quad (1.18)$$

### 1.6. Внешние характеристики

Изменение напряжения при нагрузке трансформатора зависит от характера нагрузки (коэффициента мощности  $\cos\varphi_2$ ) и может быть определено приближенной формулой [1]:

$$\Delta u_{\%} \approx (u_{кА} \cos\varphi_2 + u_{кР} \sin\varphi_2) k_{нг}. \quad (1.19)$$

Вид внешних характеристик показан на рис. 1.13.

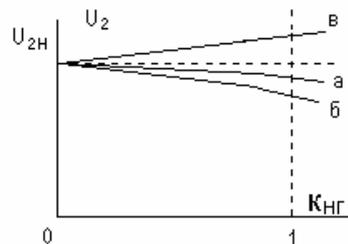


Рис. 1.13

а) активная нагрузка ( $\cos\varphi_2 = 1$ ); б) активно-индуктивная нагрузка; в) активно-емкостная нагрузка.

### 1.7. КПД трансформатора

КПД [ ] равен отношению полезной мощности  $P_2$  к потребляемой мощности  $P_1$

$$\eta = P_2 / P_1, \quad (1.20)$$

где  $P_2 = S_H k_{нг} \cos\varphi_2$ , (1.21)

$\cos\varphi_2$  - коэффициент мощности нагрузки,

$S_H = m U_{\phi H} I_{\phi H}$  - номинальная мощность трансформатора,

$P_1 = P_2 + p_0 + p_k$ .

Таким образом

$$\eta = \frac{S_H \kappa_{HG} \cos \varphi_2}{S_H \kappa_{HG} \cos \varphi_2 + p_0 + p_{KH} \kappa_{HG}^2} . \quad (1.22)$$

Потери в стали  $p_0$  называются постоянными потерями, т.к. они не зависят от тока нагрузки. Эти потери зависят от  $\Phi^2$ , т.е. от  $U^2$ , и от частоты  $f$  питающей сети.

Потери в обмотках  $p_K$  (1.15) зависят от  $I^2$  и называются переменными.

Чтобы определить  $\kappa_{HG}$ , соответствующий максимуму КПД, следует взять производную и приравнять ее нулю:  $\frac{d\eta}{d\kappa_{HG}} = 0$ .

Отсюда получаем

$$p_0 = \kappa_{HG}^2 p_{KH} \quad \text{и} \quad \kappa_{HG} = \sqrt{\frac{p_0}{p_{KH}}} . \quad (1.23)$$

Условие максимума КПД трансформатора, как и электрических машин, соответствует равенству постоянных и переменных потерь.

### 1.8. Параллельная работа трансформаторов

Для включения трансформаторов на параллельную работу согласно ГОСТ 11677-85 необходимо выполнить ряд условий:

- группа соединений трансформаторов должна быть обязательно одинаковой,
- коэффициенты трансформации трансформаторов должны быть одинаковыми (допускается отклонение не более 5%, а при  $k > 3$  не более 1%),
- напряжение  $u_K$  могут отличаться не более чем на 10%.

При отличии напряжений  $u_K$  распределение мощностей между трансформаторами определяется формулой

$$S_{I*} : S_{II*} : S_{III*} = 1 / u_{K1\%} : 1 / u_{K2\%} : 1 / u_{K3\%} , \quad (1.24)$$

где 
$$S_{I*} = \frac{S_1}{S_{H1}} = \frac{S}{u_{K1} \sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{Kn}}} \quad \text{и т.д.}$$

$S$  - общая мощность нагрузки.

Мощности трансформаторов могут отличаться не более, чем в 3 раза.

При несоблюдении всех этих условий возникают уравнивающие токи в обмотках трансформаторов.

## 2. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

### 2.1. Общие сведения

#### 2.1.1. Устройство

Асинхронные машины, как и другие электрические машины, обратимы и могут работать в качестве как двигателя, так и генератора. Как правило, асинхронные машины используются в качестве двигателей [10] (асинхронные двигатели - АД).

Конструктивное устройство асинхронной машины показано на рис.2.1.

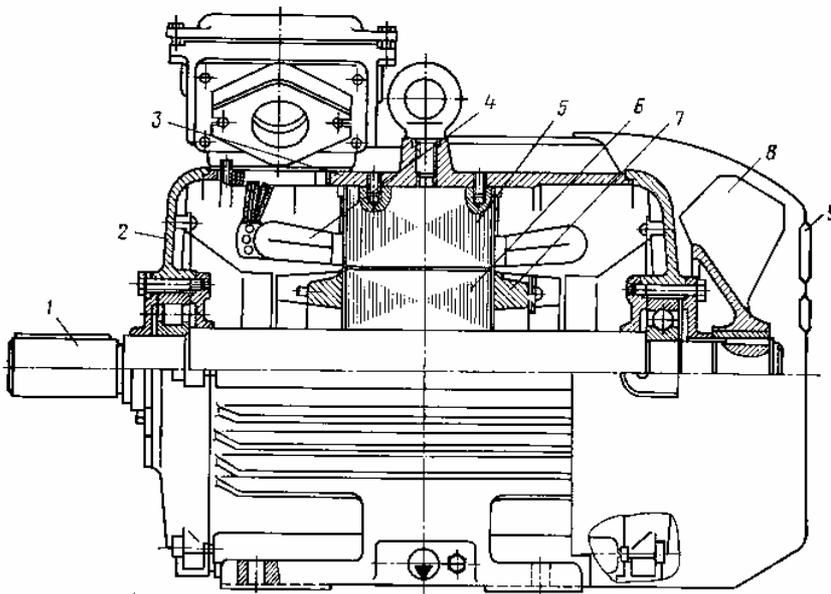


Рис.2.1.  
Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

1-вал; 2-подшипниковый щит; 3-корпус статора; 4-обмотка статора; 5-сердечник статора; 6-сердечник ротора; 7-обмотка ротора (короткозамкнутая); 8-вентилятор; 9-кожух вентилятора

Неподвижная часть машины называется статором, подвижная часть - ротором. Сердечники статора и ротора асинхронных машин собираются (шихтуются) из отдельных листов электротехнической стали (рис. 2.2).

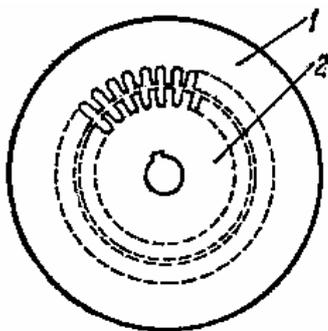


Рис.2.2

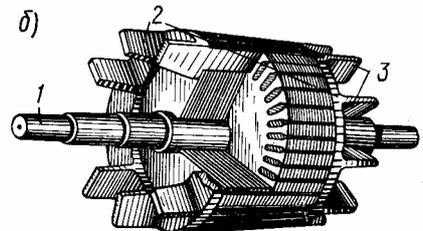
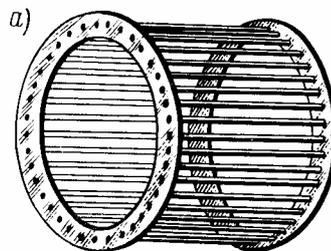


Рис.2.3

На внутренней поверхности статора и на внешней поверхности ротора имеются пазы, в которых размещаются проводники обмоток.

Обмотка статора выполняется трехфазной, подсоединяется к сети трехфазного тока и называется первичной обмоткой.

К конструктивным частям статора относятся: станина, в которую устанавливается магнитопровод, и подшипниковые щиты, служащие для поддержания вала.

Воздушный зазор между статором и ротором в асинхронных машинах выполняется минимально возможным по условиям производства и надежности работы. В машинах мощностью в несколько киловатт величина зазора составляет около 0,5 мм, с ростом мощности и габаритов машины величина зазора увеличивается.

Обмотка ротора может быть выполнена трехфазной аналогично обмотке статора. Концы фаз такой обмотки ротора соединяются обычно в «звезду», а начала с помощью контактных колец и металлографитных щеток выводятся наружу. Такая асинхронная машина называется машиной с фазным ротором. К контактным кольцам обычно присоединяется трехфазный пусковой или регулировочный реостат. Фазная обмотка ротора выполняется с тем же числом полюсов, как и статорная обмотка.

Другая разновидность обмотки ротора - обмотка в виде беличьей клетки (рис.2.3). Концы стержней такой обмотки с обоих торцов соединены коротко кольцами, поэтому обмотка выводов не имеет. Такая асинхронная машина называется машиной с короткозамкнутым (к.з.) ротором. В машинах мощностью до 100 кВт обмотка ротора выполняется путем заливки алюминия. В более крупных машинах применяется медная сварная обмотка. Отсутствие скользящего контакта на роторе обеспечивает высокую надежность работы такого двигателя, а простота технологии изготовления - дешевизну. По этим причинам асинхронные двигатели с к.з. ротором находят широкое применение и составляют основной парк электрических машин.

Следует отметить, что обе эти конструкции трехфазного асинхронного двигателя были изобретены М.О. Доливо-Добровольским в 1891 г. и сохранили по существу предложенный им вид.

### 2.1.2. Принцип действия

Обмотка статора при питании ее трехфазным током с частотой  $f_1$  создает вращающийся магнитный поток  $\Phi_1$  с частотой вращения

$$n_1 = 60 f_1 / p, \quad (2.1)$$

где  $p$  - число пар полюсов обмотки статора.

Частота вращения магнитного поля  $n_1$  называется синхронной.

Соотношение между  $p$  и  $n_1$  для  $f_1 = 50$  Гц приведено в табл. 2.1.

Таблица 2.1

|                |      |      |      |     |     |     |
|----------------|------|------|------|-----|-----|-----|
| $p$            | 1    | 2    | 3    | 4   | 5   | 6   |
| $n_1$ , об/мин | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 500 |

Вращающийся магнитный поток  $\Phi_1$  индуцирует ЭДС в обмотке ротора. Поскольку обмотка ротора замкнута, то возникает система токов ротора  $I_2$  и создается вращающийся поток ротора  $\Phi_2$ . Поток ротора вращается относительно статора в ту же сторону и с той частотой  $n_1$ , что и поток статора  $\Phi_1$  и имеет то же количество полюсов, но ориентирован, согласно правилу Ленца, практически ему навстречу. В результате взаимодействия неподвижных друг относительно друга потоков статора и ротора образуется результирующий поток  $\Phi$ . Взаимодействие потока  $\Phi$  и тока ротора приводит к возникновению электромагнитных сил и электромагнитного момента.

В режиме двигателя под действием этого момента ротор вращается в сторону вращения магнитного поля. В режиме генератора ротор вращается с помощью приводного двигателя со скоростью  $n > n_1$ , при этом ЭДС обмотки статора превышает напряжение сети, и машина отдает энергию в сеть.

Частота вращения  $n$  ротора асинхронной машины всегда отлична от частоты вращения магнитного поля  $n_1$ , которую называют синхронной. Отсюда происходит название машины - асинхронная, т.е. несинхронная, в которой  $n \neq n_1$ . В противном случае проводники ротора не будут пересекаться магнитными линиями вращающегося поля, в них не будет индуцироваться ЭДС, не будет возникать тока ротора и момента.

### 2.1.3. Скольжение

Отличие частоты вращения ротора  $n$  и магнитного поля  $n_1$  характеризуется скольжением

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (2.2)$$

Скольжение может выражаться в относительных единицах или процентах.

Частота вращения ротора

$$n = n_1(1 - s) \quad (2.3)$$

Ниже приводится связь частоты вращения ротора  $n$  и скольжения  $s$  с режимом работы машины.

| Генератор                      | Двигатель                    | электродинамический тормоз  |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| $n > n_1$<br>$-\infty < s < 0$ | $0 < n < n_1$<br>$0 < s < 1$ | $n < 0$<br>$1 < s < \infty$ |

$$n = n_1$$

$$s = 0$$

(режим идеального х.х.)

$$n = 0$$

$$s = 1 \text{ (режим к.з.)}$$

Для двигательного режима работы  $0 < n < n_1$  и скольжение  $0 < s \leq 1$ .

В начальный момент пуска АД  $n = 0$  (режим к.з.), и скольжение

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1$$

При  $n = n_1$  имеем  $s = 0$ . Этот режим невозможен для асинхронной машины согласно принципа её работы и называется режимом идеального холостого хода.

У АД общего назначения в номинальном режиме (т.е. в режиме, для которого машина предназначена) номинальное скольжение  $s_H = 0,015 \dots 0,06$  (или 1,5...6 %) [10].

*Числовой пример.*

Пусть общепромышленный АД ( $f = 50$  Гц) имеет частоту вращения  $n_H = 1450$  об / мин. Определим скольжение.

Прежде всего устанавливаем по табл.2.1 синхронную частоту вращения как ближайшее значение к номинальной частоте :  
 $n_1 = 1500$  об / мин.

Тогда скольжение  $s = \frac{1500 - 1450}{1500} \cdot 100\% = 3,3\%$ .

Частота тока в обмотке статора определяется частотой  $f_1$  напряжения сети. Частота тока в обмотке ротора  $f_2$  зависит от скорости пересечения проводников вращающимся полем

$$f_2 = \frac{p \cdot n_2}{60}.$$

где  $n_2 = n_1 - n = s n_1$ .

Тогда

$$f_2 = \frac{p \cdot n_1}{60} s = s \cdot f_1. \quad (2.4)$$

*Числовой пример.*

Так, если  $s = 3,3\%$ , то  $f_2 = \frac{3,3}{100} \cdot 50 = 1,65$  Гц.

Обычно у нормально нагруженного АД  $f_2 = 1 \dots 3$  Гц .

При неподвижном роторе  $f_2 = f_1$ .

## 2.2. Исходные уравнения

Физические процессы, происходящие в асинхронной машине, аналогичны процессам, происходящим в трансформаторе (ТР). Отличие заключается лишь в особенностях их конструкции. В частности, наличие воздушного зазора между ротором и статором асинхронной машины приводит к значительному увеличению тока холостого хода  $I_0$ . Для АД

средней мощности ток  $I_0$  составляет около 25 - 30% от номинального тока [6].

Основной магнитный поток  $\Phi$ , вращаясь с частотой  $n_1$ , индуцирует ЭДС взаимоиндукции в обмотке статора  $E_1$  и в обмотке ротора  $E_2$ .

По аналогии с ТР формулы этих ЭДС можно записать в виде :

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot W_1 \cdot k_{об1}; \quad (2.5)$$

$$E_{2S} = 4,44 \cdot f_2 \cdot \Phi \cdot W_2 \cdot k_{об2}, \quad (2.6)$$

где  $W_1, W_2$  - числа последовательно соединенных витков обмоток статора и ротора.

Наличие обмоточных коэффициентов  $k_{об1}, k_{об2}$  обмоток статора и ротора учитывает особенности конструкции обмоток электрических машин. Обычно величина  $k_{об} \approx 0,9 \dots 0,97$ .

Эффективные числа витков обмоток статора и ротора

$$W_{1эф}, = W_1 k_{об1}, \quad W_{2эф} = W_2 k_{об2}$$

ЭДС взаимоиндукции обмотки вращающегося ротора (2.6), с учетом формулы (2.4) для частоты  $f_2$ , можно представить в виде

$$E_{2S} = 4,44 \cdot f_2 \cdot \Phi \cdot W_2 \cdot k_{об2} = 4,44 \cdot s \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot W_2 \cdot k_{об2} = s \cdot E_2, \quad (2.7)$$

где  $E_2 = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot W_2 \cdot k_{об2}$  - ЭДС неподвижного ротора.

Кроме ЭДС взаимоиндукции в асинхронной машине, как и в ТР, существуют ЭДС самоиндукции (ЭДС рассеяния), наведенные потоками рассеяния:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 \cdot x_1, \quad \dot{E}_{\sigma 2S} = -j\dot{I}_2 \cdot x_{2S}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки вращающегося ротора

$$x_{2s} = \omega_2 \cdot L_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_2 L_2 = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L_2 = s \cdot x_2, \quad (2.8)$$

где  $L_2$  - коэффициент самоиндукции обмотки ротора,

$x_2 = 2\pi f_2 L_2$  - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки неподвижного ротора.

Активное сопротивление  $r_2$  обмотки ротора, пренебрегая эффектом вытеснения тока, можно принять постоянным.

Полное сопротивление обмотки вращающегося ротора

$$Z_{2s} = r_2 + j \cdot x_{2s} = r_2 + j \cdot s \cdot x_2.$$

Уравнение напряжения обмотки вращающегося ротора

$$\dot{E}_{2s} = z_{2s} \cdot \dot{I}_2.$$

В преобразованном виде с учетом (2.7) и (2.8) это уравнение может быть записано в виде :

$$s \cdot \dot{E}_2 = \dot{I}_2 \cdot r_2 + j \cdot s \cdot \dot{I}_2 \cdot x_2$$

Разделив обе части уравнения на  $s$ , перейдем от уравнения вращающегося ротора к уравнению эквивалентного в электромагнитном отношении неподвижного ротора, в обмотке которого протекает ток частоты  $f_2 = f_1$ ,

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \cdot \frac{r_2}{s} + j \cdot \dot{I}_2 \cdot x_2. \quad (2.9)$$

Осуществление такого формального преобразования позволяет заменить реальный вращающийся ротор фиктивным неподвижным ротором, у которого активное сопротивление обмотки меняется в зависимости от скольжения, а ЭДС - постоянна. Последнее обстоятельство позволяет осуществить приведение обмотки ротора к обмотке статора аналогично тому, как это осуществляется в ТР, и анализировать процессы в АД с помощью совмещенных для статорной и роторной цепей схем замещения и векторных диаграмм.

Рассмотрим формулы, позволяющие привести обмотку ротора к обмотке статора.

Отношение ЭДС при неподвижном роторе ( $f_1 = f_2$ ) определяет коэффициент трансформации по ЭДС

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_{1\text{эф}}}{W_{2\text{эф}}} = k_e.$$

Для того, чтобы определить коэффициент трансформации по току  $k_i$ , следует исходить из равенства МДС с учетом числа фаз

$$m_1 I_1 W_{1\text{эф}} = m_2 I_2 W_{2\text{эф}},$$

где  $m_1, m_2$  - числа фаз обмоток статора и ротора.

Тогда

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{m_1 \cdot W_{1\text{эф}}}{m_2 \cdot W_{2\text{эф}}}.$$

Приведение числа витков вторичной обмотки (ротора) к числу витков первичной обмотки (статора) осуществляется аналогично ТР на основе сохранения энергетических показателей реального двигателя. При этом между фиктивными параметрами, относящимися к цепи обмотки неподвижного ротора, и реальными параметрами имеют место следующие соотношения (фиктивные параметры приведенной обмотки ротора обозначены штрихами) [1]:

$$E'_2 = k_e \cdot E_2 = E_1; \quad I'_2 = \frac{I_2}{k_i}; \quad r'_2 = k_e \cdot k_i \cdot r_2; \quad x'_2 = k_e \cdot k_i \cdot x_2; \quad z'_2 = \sqrt{r'^2_2 + x'^2_2}.$$

### 2.3. Т-ОБРАЗНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

Для получения схемы замещения АД запишем уравнения напряжений для одной фазы обмотки статора и приведенной обмотки ротора .

Для фазы обмотки статора ( аналогично первичной обмотке ТР)

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{1\sigma} = \dot{I}_1 \cdot r_1 ,$$

где  $U_1$ ;  $I_1$ ,  $r_1$  - напряжение, ток и активное сопротивление фазы статорной обмотки.

После преобразования уравнение примет вид:

$$U_1 = -E_1 + j I_1 x_1 + I_1 r_1 . \quad (2.10)$$

Для фазы приведенной обмотки ротора ранее было получено соотношение (2.9) :

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 \cdot \frac{r'_2}{s} + j \cdot \dot{I}'_2 \cdot x'_2 .$$

Уравнение токов (аналогично ТР)

$$\dot{I}_m = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 , \quad (2.11)$$

где  $I_m$ - ток намагничивания .

Уравнениям (2.9) - (2.11) соответствует схема замещения (рис.2.4).

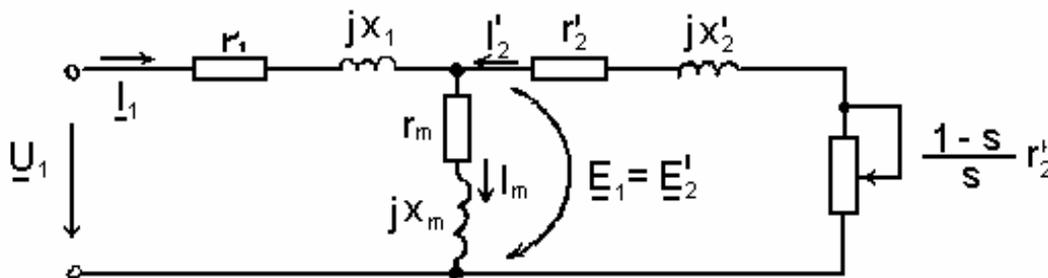


Рис. Т-образная схема замещения

Индуктивное сопротивление  $x_m$  намагничивающего контура отражает сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора.

Сопротивление  $r_m$  намагничивающего контура введено в схему замещения искусственно для учета магнитных потерь мощности  $p_{ст}$  (потерь в стали ).

На схеме сопротивление  $\frac{r'_2}{s}$  представлено в виде двух слагаемых:

$$\frac{r'_2}{s} = r'_2 + \frac{1-s}{s} \cdot r'_2 .$$

Целесообразность такого разделения состоит в том, что схема замещения приобретает наглядный физический смысл: умножив первое слагаемое  $r_2'$  на  $I_2'^2$ , получим электрические потери в обмотке ротора

$$P_{эл2} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \quad (2.12)$$

Умножив второе слагаемое  $\frac{r_2' \cdot (1-s)}{s}$  на  $I_2'^2$ , получим полную механическую мощность  $P_{мех}$ .

Полное входное сопротивление схемы замещения (пренебрегая  $r_m$ )

$$Z = r_1 + jx_1 + \frac{jx_m \left( \frac{r_2'}{s} + jx_2' \right)}{\frac{r_2'}{s} + jx_2' + jx_m}$$

#### 2.4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА

Преобразование активной мощности  $P_1$ , подводимой к статору двигателя, представлена в виде энергетической диаграммы (рис.2.5) [3].

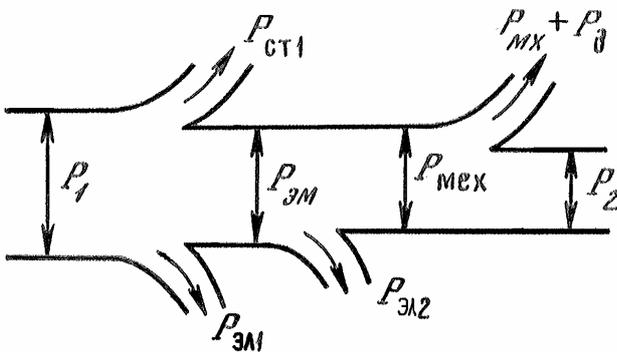


Рис.2.5. Энергетическая диаграмма

На диаграмме приняты следующие обозначения потерь мощности:  
 $P_{ст1}$  - магнитные потери (потери в стали) в магнитопроводе статора (в магнитопроводе ротора они пренебрежимо малы вследствие малости частоты  $f_2$ );

$P_{эл1}$  - электрические потери в обмотке статора;

$P_{эл2}$  - электрические потери в обмотке ротора;

$P_{мех}$  - механические потери на трение вращающегося ротора о воздух и в подшипниках;

$P_{д}$  - добавочные потери.

Электромагнитная мощность, передаваемая через воздушный зазор от статора к ротору, согласно схеме замещения (рис.2.4), выделяется на сопротивлении  $\frac{r_2'}{s}$ :

сопротивлению  $\frac{r_2'}{s}$  :

$$P_{\text{эм}} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{r_2'}{s} \quad (2.13)$$

С учетом формулы (2.12) потерь в обмотке ротора, электромагнитную мощность (2.13) можно представить в виде

$$P_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эл2}}}{s} . \quad (2.14)$$

С другой стороны,

$$P_{\text{эм}} = \omega_1 \cdot M , \quad (2.15)$$

где  $M$  - электромагнитный момент, развиваемый двигателем.

Угловая частота вращения

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot n_1}{60} = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} \quad (2.16)$$

Приравнявая (2.13) и (2.15), с учетом (2.16) получим формулу электромагнитного момента

$$M = \frac{m_1 \cdot p \cdot I_2'^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{2\pi \cdot f_1} . \quad (2.17)$$

Полезная мощность двигателя

$$P_2 = \omega \cdot M_2 , \quad (2.18)$$

где  $M_2$  - полезный момент на валу.

Угловая частота вращения ротора

$$\omega = 2\pi n / 60 = 0,105 n .$$

Тогда

$$P_2 = 0,105 \cdot n \cdot M_2 \quad (2.19)$$

КПД

$$\eta = P_2 / P_1 .$$

Для АД средней мощности ориентировочно  $\eta \approx 70...90\%$  [10].

КПД АД значительно ниже, чем у трансформаторов той же мощности, вследствие наличия механических потерь и большого значения намагничивающего тока, что ведет к увеличению потерь в обмотках.

## 2.5. Г-образная схема замещения

Недостатком Т-образной схемы (рис.2.4) является то, что при изменении нагрузки, а, следовательно, и тока  $I_1$  изменяется падение напряжения на сопротивлениях  $r_1$  и  $x_1$  и, следовательно, величина ЭДС  $E_1 = E'_2$ , что в ряде случаев затрудняет расчет. Поэтому иногда вместо Т-образной используют Г-образную схему замещения (рис.2.6), в которой намагничивающий контур вынесен на первичные зажимы и ток в нем не зависит от нагрузки [3].

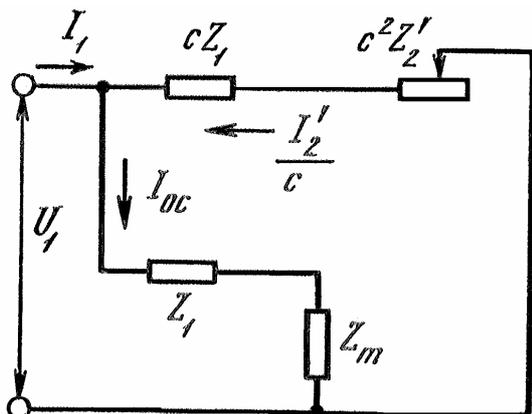


Рис.2.6. Г-образная схема замещения.

При переходе от Т-образной к Г-образной схеме замещения все энергетические показатели сохраняются, благодаря введению коэффициента

$$c = 1 + \frac{Z_1}{Z_m} \approx 1 + \frac{X_1}{X_m} .$$

Обычно  $c = 1,02 \dots 1,06$ . Для приближенных расчетов принимают  $c = 1$ .

На схеме замещения (рис.2.6)  $I_{oc}$  - ток обмотки статора в режиме идеального холостого хода при  $s = 0$ .

Полные сопротивления

$$Z_1 = r_1 + jX_1; \quad Z_2' = \frac{r_2'}{s} + jX_1' ; \quad Z_m = r_m + jX_m .$$

Определим ток обмотки ротора из Г-образной схемы замещения:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{cr_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + cx_2')^2}} . \quad (2.20)$$

## 2.6. Электромагнитный момент

Вращающий электромагнитный момент АД создается в результате взаимодействия результирующего магнитного поля с током обмотки ротора. Получим его аналитическое выражение. Подставим в формулу (2.18) электромагнитного момента формулу тока ротора (2.20) из Г-образной схемы замещения. Тогда электромагнитный момент можно представить в виде

$$M = \frac{m_1 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + \frac{cr_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + cx_2')^2} . \quad (2.21)$$

Следует обратить особое внимание, что электромагнитный момент асинхронной машины пропорционален квадрату напряжения сети  $U_1^2$ . Такая зависимость приводит к значительному уменьшению момента при уменьшении напряжения сети, что является недостатком АД.

*Числовой пример. Определить, как изменится вращающий момент АД, если напряжение сети снизилось на 10 %.*

*Момент двигателя уменьшится примерно на 20% :  $M = 0,9^2 M_H = 0,81 M_H$ .*

График механической характеристики  $M=f(s)$  для двигательного режима работы, соответственно формуле (2.21), представлен на рис.2.7,а. В других координатах механическая характеристика  $n=f(M)$  показана на рис. 2.7,б.

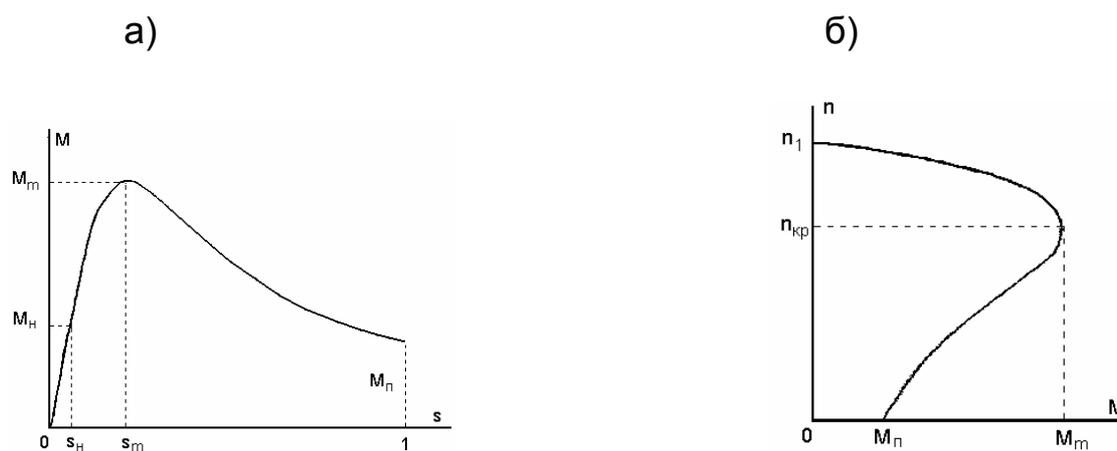


Рис.2.7. Механические характеристики АД

Режим пуска на графике механической характеристики соответствует значению  $n=0$  или  $s = 1$ , когда АД развивает начальный пусковой момент  $M_{II}$ .

Формулу пускового момента можно получить из ( 2.21 ) при  $s = 1$

$$M_{II} = \frac{m_1 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{U_1^2 \cdot r_2'}{(r_k)^2 + (x_k)^2}, \quad (2.22)$$

где  $r_k = r_1 + r_2'$ ,  $x_k = x_1 + x_2'$ .

В среднем кратность пускового момента  $K_{II} = \frac{M_{II}}{M_H} = 1 \dots 2$ . [10, 6].

Критическое скольжение  $s_m$  (его также иногда обозначают  $s_{кр}$ ) соответствует максимальному моменту  $M_m$ .

Диапазон изменения скольжения  $s_0 \leq s \leq s_m$  является рабочим и соответствует устойчивому участку механической характеристики ( $s_0$  - скольжение холостого хода). Диапазон  $s_m < s < 1$  нерабочий, так как работа здесь неустойчива. Обычно  $s_m = 0,08 \dots 0,2$  [10,6], таким образом, рабочая зона АД незначительна. Двигатель имеет жесткую механическую характеристику с небольшим изменением скорости.

Для того ,чтобы получить формулу критического скольжения  $s_m$ , необходимо взять производную  $\frac{dM}{ds}$  и приравнять её нулю. Решив это уравнение , получим в результате [2]

$$s_m = \frac{cr_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + cx_2')^2}}. \quad (2.23)$$

Приближенная формула имеет вид

$$s_m = \frac{r_2'}{x_k}. \quad (2.24)$$

Подставляя  $s_m$  в выражение для  $M$  (2.21), получим формулу максимального момента

$$M_m = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi \cdot f_1 (r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2})} \approx \frac{m_1 p}{4\pi \cdot f_1} \cdot \frac{U_1^2}{x_k}. \quad (2.25)$$

Обычно кратность максимального момента  $K_M = \frac{M_m}{M_H} = 1,8 \dots 2,8$ . [10,6].

Величина  $K_M$  характеризует перегрузочную способность АД.

Критическое скольжение можно определить, зная  $K_M$  и  $s_H$  [4]:

$$s_m = s_H (k_m + \sqrt{k_m^2 - 1}). \quad (2.26)$$

В расчетной практике широкое распространение получило приближенное аналитическое выражение механической характеристики (формула Клосса)

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2}{\left(\frac{s_m}{s}\right) + \left(\frac{s}{s_m}\right)}. \quad (2.27)$$

Следует обратить внимание, что максимальный момент (2.25) не зависит от активного сопротивления  $r'_2$  роторной цепи. Однако критическое скольжение  $s_m$  прямо пропорционально  $r'_2$ , поэтому при увеличении  $r'_2$  место расположения максимума момента на механической характеристике  $M = f(s)$  сдвигается вправо, а пусковой момент увеличивается (рис.2.8).

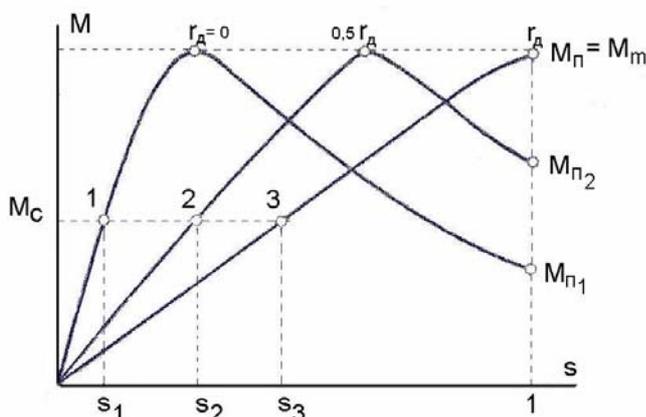


Рис.2.8. Механические характеристики АД при различных добавочных сопротивлениях  $r_d$  в цепи ротора

Это свойство широко используется на практике для АД с фазным ротором, где есть возможность ввода дополнительного сопротивления (пускового реостата) в цепь ротора. Величину пускового реостата рассчитывают так, чтобы получить при пуске максимально возможный момент  $M_n = M_m$ . При этом  $s_m = 1$  и согласно (2.24) сопротивление пускового реостата

$$r'_d = x_k - r'_2 . \quad (2.28)$$

### 2.7. Пуск асинхронных двигателей

Практическое применение находят следующие способы пуска при :

- непосредственном подключении к сети (прямой пуск);
- пониженном напряжении, подаваемом на обмотку статора;
- использовании особой конфигурации стержней ротора;
- подключением к обмотке ротора пускового реостата.

Прямой пуск путем непосредственного подключения обмотки статора к сети - самый распространенный способ пуска АД с короткозамкнутым ротором. Он отличается простотой, не требует применения специальных пусковых устройств. Однако двигатель при этом развивает относительно небольшой пусковой момент, что может иметь негативные последствия при наличии большого момента сопротивления на валу. Кроме того недостатком данного способа пуска является значительный бросок пускового тока  $I_n = 5...7,5 I_{1н}$ . Последнее обстоятельство часто ограничивает применение прямого пуска АД

большой мощности, особенно при недостаточно мощной электросети, когда пусковой ток АД может вызвать значительное уменьшение напряжения сети и автоматическое отключение потребителей.

Для уменьшения пускового тока АД с короткозамкнутым ротором пускают при пониженном напряжении. В соответствии с этим способом применяют [1]:

- реакторный пуск (рис.2.9,а);
- автотрансформаторный пуск (рис.2.9,б);
- пуск с изменением схемы соединения обмотки статора (рис.2.9,в).

Реакторный пуск предусматривает включение в цепь обмотки статора на период пуска добавочных реактивных (реакторов  $L$ ) сопротивлений. Вместо реакторов могут использоваться активные сопротивления.

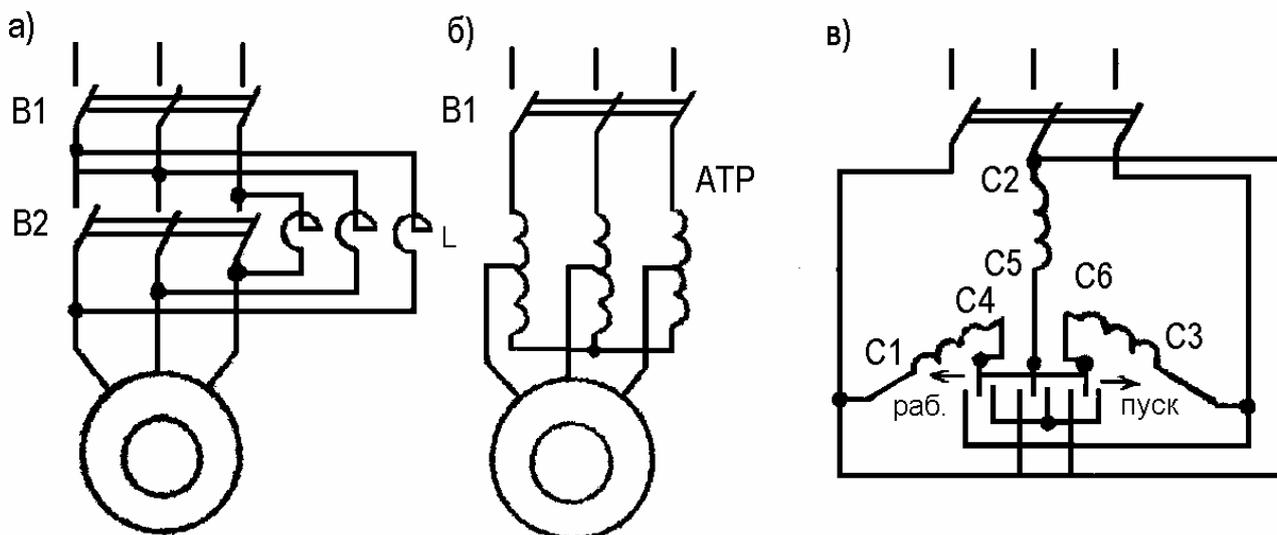


Рис. 2.9. Схема включения АД при пуске: реакторном (а), автотрансформаторном (б), переключением с  $Y$  на  $\Delta$  (в)

При замыкании выключателя В1 пусковой ток

$$I_{II} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{r_2'^2 + (x_k + x_L)^2}},$$

благодаря индуктивному сопротивлению реактора  $x_L$ , уменьшается до  $I_{II} = 3...4 I_{1H}$ . После достижения установившейся частоты вращения замыкают В2.

При автотрансформаторном пуске АД подключается к сети через понижающий автотрансформатор АТР. Последний может иметь несколько ступеней, которые в процессе пуска переключаются соответствующей аппаратурой.

Если рабочей схемой АД является  $\Delta$ , то на период пуска его фазные обмотки собирают по схеме  $Y$ . При этом напряжение, подаваемое на фазные обмотки уменьшается в  $\sqrt{3}$  раз, что обуславливает уменьшение фазных токов в  $\sqrt{3}$  раз, а линейных - в 3 раза. По окончании процесса пуска переключатель переводят в левое положение, переходя на

рабочее соединение обмоток в  $\Delta$ .

Общим недостатком способов пуска с понижением напряжения является значительное уменьшение пускового и максимального моментов АД, которые пропорциональны квадрату приложенного к обмотке статора напряжения. Поэтому их используют только при пуске с малой нагрузкой на валу.

Для повышения пускового момента АД применяют особую конфигурацию стержней короткозамкнутого ротора. Различают двухклеточные (рис.2.10) и глубокопазные двигатели. У первых ротор имеет две короткозамкнутые обмотки: пусковую и рабочую.



Рис. 2.10

Принцип действия такого двигателя основан на использовании эффекта вытеснения тока.

Индуктивные сопротивления рассеяния обеих обмоток определяются величиной потоков рассеяния, сцепленных с их стержнями. Так как пусковая обмотка расположена близко к воздушному зазору, то она обладает меньшим индуктивным сопротивлением рассеяния  $x_{2П}$ ,

чем рабочая ( $x_{2Р}$ ).

В начальный момент пуска ( $s = 1$ ) частота тока в роторе  $f_2$  максимальна и индуктивные сопротивления рассеяния обмоток во много раз превосходят их активные сопротивления. Поэтому можно записать приближенное соотношение  $\frac{I_{2П}}{I_{2Р}} \approx \frac{x_{2Р}}{x_{2П}}$ , т.е. ток ротора проходит в

основном через пусковую обмотку, у которой  $x_{2П} < x_{2Р}$ . Но так как эта обмотка обладает сравнительно большим активным сопротивлением (из-за меньшего сечения проводников), то она создает повышенный пусковой момент. Активное сопротивление пусковой обмотки выбирается из соотношения  $r_{2П} \approx x_k$ .

По мере нарастания  $n$  частота  $f_2$  снижается и ток постепенно проникает в рабочую обмотку. По окончании процесса разгона ток проходит в основном по рабочей обмотке, активное сопротивление которой  $r_{2Р} < r_{2П}$ .

Недостатком двухклеточных двигателей является сложность их изготовления. Более технологичные - глубокопазные АД. Принцип их работы состоит в вытеснении тока при пуске в верхнюю часть паза. При этом рабочее сечение проводника уменьшается, а следовательно, увеличиваются  $r_2$  и соответственно  $M_{П}$ .

Пуск при включении в обмотку ротора пускового реостата возможен только в АД с фазным ротором. На период пуска вводится такое сопротивление реостата, чтобы обеспечивалось условие  $r'_Д + r'_2 = x_k$  (2.28). При этом двигатель будет развивать максимальный пусковой момент

$M_{\Pi} = M_m$  (рис.2.8). Одновременно значительно уменьшается пусковой ток

$$I_{1\Pi} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{(r'_D + r'_2)^2 + x^2_K}}.$$

По мере нарастания частоты вращения  $n$  реостат постепенно выводят. По окончании пуска обмотка ротора замыкается накоротко и двигатель переходит на работу по естественной механической характеристике.

Недостатком данного способа пуска АД является его относительная сложность и необходимость применения более дорогих и требующих особого технического обслуживания двигателей с фазным ротором. Кроме того, эти АД имеют несколько худшие энергетические показатели (КПД и  $\cos\varphi$ ). Поэтому их применяют только при тяжелых условиях пуска, при маломощной электрической сети или невозможности плавного регулирования частоты вращения.

## 2.8. Регулирование частоты вращения

Частота вращения АД в соответствии с формулой  $n_1$  (2.1) имеет вид

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s).$$

Отсюда следует три основных способа регулирования - изменением  $f_1$ ,  $p$ , и  $s$ .

Частотное регулирование возможно только при питании АД от отдельного синхронного генератора с переменной частотой вращения либо от преобразователя частоты. При этом необходимо соблюдать закон регулирования (закон Костенко), который при постоянстве момента сопротивления на валу имеет вид [1]

$$\frac{U_1}{f_1} = const.$$

Несоблюдение этого закона может привести к нежелательным последствиям. Так, с уменьшением частоты индуктивные сопротивления, пропорциональные  $f_1$ , уменьшаются, а токи возрастут. В результате этого двигатель перегреется и может сгореть. С другой стороны, если с уменьшением частоты напряжение не понижать, то результирующий магнитный поток возрастет, так как

$$\Phi = \frac{U_1}{4,44 \cdot W_{1\varnothing\varphi} \cdot f_1}.$$

При этом произойдет сильное насыщение магнитопровода.

С увеличением частоты индуктивные сопротивления возрастут, а АД не разовьет требуемую мощность, если  $U_1$  оставить неизменным.

Частотное регулирование обычно применяют в тех случаях, когда требуется изменять частоту вращения в широких пределах, например, в тяговом электродвигателе.

Регулирование частоты вращения путем изменения числа пар полюсов широко применяется в АД с короткозамкнутым ротором [2]. Регулирование здесь осуществляется ступенчато. На рис.2.11 показана простейшая схема обмотки одной фазы, позволяющая изменять число полюсов в два раза. Таков принцип получения двухскоростного АД.

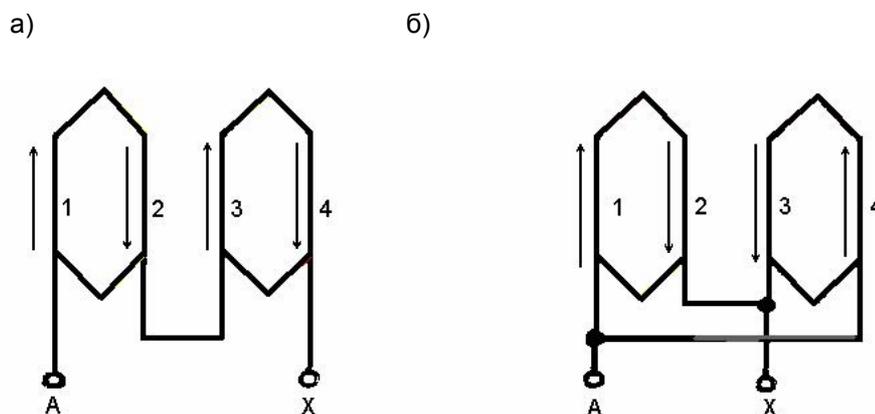


Рис. 2.11 . Схема переключения обмотки статора для изменения числа полюсов : а)  $2p = 4$ , б)  $2p = 2$

Если же нужно иметь три или четыре частоты вращения (трех- и четырехскоростной АД), то на статоре располагают еще одну обмотку, при переключении которой можно получить дополнительно еще два варианта полюсности двигателя, например,  $p = 3$  и  $p = 4$ .

Многоскоростные АД имеют большую массу и габариты, а следовательно, и большую стоимость по сравнению с двигателем нормального исполнения. Кроме того, они не обеспечивают плавности регулирования.

Регулирование частоты вращения изменением скольжения применяется как в АД с короткозамкнутым ротором, так и в АД с фазным ротором.

В АД с короткозамкнутым ротором этот способ реализуется за счет плавного снижения питающего напряжения. При этом максимальный момент  $M_m \cong U_1^2$  будет понижаться, а скольжение расти (рис.2.12).

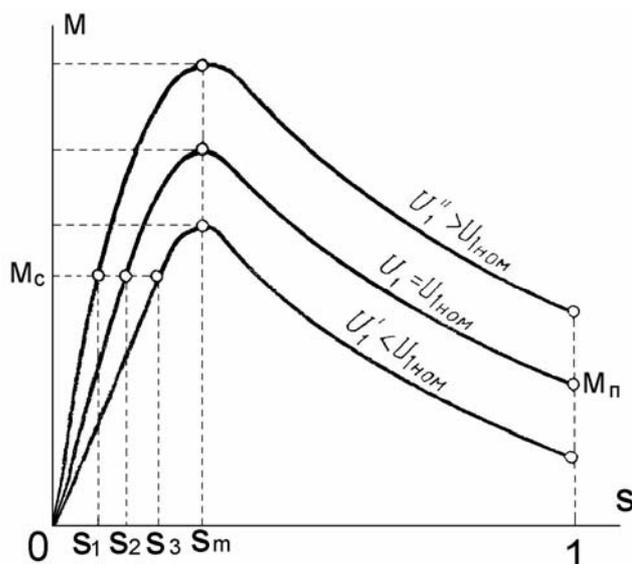


Рис.2.12. Механические характеристики АД при различных напряжениях  $U_1$

Момент, развиваемый двигателем, всегда равен моменту сопротивления (нагрузки) на его валу  $M = M_c$ . Поэтому уменьшение напряжения можно производить до тех пор, пока  $M_m \geq M_c$ . При скольжении  $s > s_m$  АД теряет устойчивость и опрокидывается. В соответствии с этим, регулирование возможно в узких пределах  $s_n \leq s \leq s_m$ . Реально для АД средней и большой мощностей, работающих с номинальной нагрузкой, удается снизить частоту вращения  $n$  на 3...5%. У малых АД, имеющих относительно большие активные сопротивления, частоту вращения можно уменьшить на 40...50%.

Следует иметь в виду, что увеличить  $r_2$  можно и у крупных АД на стадии их проектирования и изготовления. При этом механическая характеристика станет мягче и диапазон регулирования расширится. Однако при этом возрастут потери в обмотке ротора и понизится КПД (1% скольжения соответствует примерно 1% КПД). В крупных же электрических машинах, где борются за каждую десятую долю процента КПД из-за необходимости снижения эксплуатационных расходов, это недопустимо.

В АД с фазным ротором скольжение изменяют посредством включения в цепь добавочного активного сопротивления (рис.2.8). При этом скольжение может меняться в широких пределах  $s_n \leq s \leq 1$ , т.е. практически до полной остановки двигателя. Однако наряду с плавностью и широтой диапазона регулирования имеет место большие потери энергии в регулировочном реостате, что существенно снижает энергетические показатели электропривода.

Необходимо отметить, что имеется возможность регулировать частоту вращения АД с фазным ротором без потерь энергии в реостате. Для этого электрическую энергию, выделяющуюся в цепи ротора при

скольжении (энергия скольжения), посредством преобразовательной установки передают обратно в питающую сеть переменного тока или к вспомогательному двигателю. Последний сообщает дополнительную механическую энергию валу основного двигателя. Такие электромеханические системы называют асинхронными каскадами.

Существуют разнообразные каскадные схемы. Но все они имеют существенный недостаток, который сводится к возрастанию потерь в АД, а следовательно, к необходимости увеличения его габаритных размеров. Поэтому применение асинхронных каскадов можно считать рациональным только на переходном этапе, пока статические преобразователи частоты сравнительно дороги и имеют недостаточно высокую надежность.

## 2.9 . Электрическое торможение АД

Для выполнения ряда производственных процессов требуется быстрое и плавное торможение АД. Электрическое торможение, в отличие от механического, является более предпочтительным. Существует три основных способа электрического торможения: противовключение; генераторное; динамическое.

При торможении противовключением изменяют направление вращения поля путем переключения двух линейных проводов, питающих обмотку статора. Ротор при этом вращается навстречу полю со скольжением  $s = \frac{n_1 + n}{n_1}$ , развивая тормозной момент. Частота

вращения  $n$  уменьшается до нуля, и если АД не отключить, то он начнет вращаться в обратную сторону. Таким образом осуществляется реверс, т.е. изменение направления вращения двигателя.

В начальный момент торможения имеет место большой бросок тока, для ограничения которого в цепь фазного ротора вводят реостат.

При генераторном торможении частота вращения ротора  $n$  превосходит частоту вращения поля  $n_1$ . Переход в генераторный режим АД происходит в электроприводах при изменении направления нагрузочного момента. На практике его часто используют для подтормаживания, т.е. для ограничения скорости механизма. Типичный пример - спуск груза краном, когда АД вращается согласно с направлением спуска и скорость движения груза ограничивается, поскольку в этом режиме электромагнитный момент является тормозящим. При этом происходит рекуперация, т.е. энергия отдается в сеть. Этот режим широко применяется для АД с переключением числа полюсов. Так, например, если при  $p = 1$  ротор имел частоту вращения  $n = 3000$  об/мин, то при переключении на  $p = 2$  он будет тормозиться до  $n = 1500$  об/мин, возвращая энергию обратно в сеть.

При динамическом торможении обмотку статора АД отключают от сети, а затем подключают к источнику постоянного тока. В результате в ЭМ появляется постоянный магнитный поток, индуктирующий в обмотке вращающегося ротора переменную ЭДС. Создается тормозной электромагнитный момент, под действием которого ротор начинает тормозиться. При этом энергия торможения поглощается сопротивлением ротора. В этом режиме АД представляет собой обращенный синхронный генератор, в котором статор создает постоянное магнитное поле, а ротор представляет собой якорь генератора.

## 2.10. Однофазный АД

В электробытовых приборах и автоматических устройствах обычно применяют однофазные или двухфазные АД. Однофазная обмотка создает неподвижное в пространстве, пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить на прямо- ( $\Phi_{\text{ПР}}$ ) и обратновращающиеся ( $\Phi_{\text{ОБР}}$ ) поля. Каждое из этих полей создает свои ЭДС, токи и электромагнитные моменты, сдвинутые соответственно по фазе, причем моменты прямого и обратного полей имеют сдвиг на  $180^\circ$ , т.е. имеют противоположные знаки.

В начальный момент пуска АД ( $n = 0$ )  $M_{\text{ПР}} = M_{\text{ОБР}}$  и двигатель самостоятельно пускового момента не разовьет. Если каким-либо образом обеспечить неравенство  $\Phi_{\text{ПР}} > \Phi_{\text{ОБР}}$ , то АД начнет вращаться в направлении большего потока. При этом форма поля в воздушном зазоре ( годограф вектора результирующего потока  $\Phi = \Phi_{\text{ПР}} + \Phi_{\text{ОБР}}$ ) приобретает эллиптический характер и будет тем ближе к круговому чем меньше  $\Phi_{\text{ОБР}}$ . Поскольку однофазные АД не имеют начального пускового момента, то они снабжаются пусковой обмоткой, что превращает их на время пуска в двухфазные (рис. 2.13). Иногда пусковую обмотку не отключают и после пуска. В пусковую обмотку включается фазосдвигающий элемент  $Z_{\text{П}}$ , обеспечивающий временной сдвиг между токами рабочей  $I_{\text{Р}}$  и пусковой  $I_{\text{П}}$  обмоток. В качестве фазосдвигающих элементов обычно применяют резистор или конденсатор.

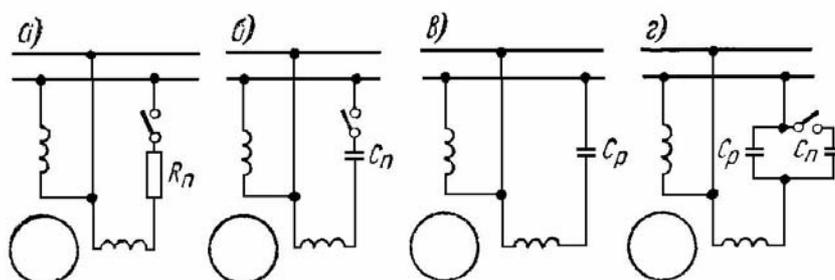


Рис.2.13 . Схемы включения однофазных АД с пусковой обмоткой (а,б) и конденсаторных (в,г)

Для получения кругового поля (наиболее благоприятного для работы) в случае двухфазной машины необходимо выполнить три условия:

- фазные обмотки должны иметь сдвиг в пространстве на 90 электрических градусов;
- токи этих обмоток должны иметь сдвиг по фазе на тот же угол;
- МДС обмоток должны быть равны ( $I_1 w_1 = I_2 w_2$ ).

Наличие кругового поля может обеспечить включение в пусковую обмотку конденсатора, причем величина емкости должна строго соответствовать параметрам двигателя. Так как эти параметры зависят от скольжения, то выбранная емкость обеспечит круговое поле только для одного режима работы.

Для двигателей малой мощности можно ориентировочно принять соотношение : 7 мкФ на 100 Вт мощности двигателя (но не электролитический конденсатор) [4].

Иногда используют трехфазный двигатель в качестве однофазного (рис.2.14), при этом мощность двигателя уменьшается [1].

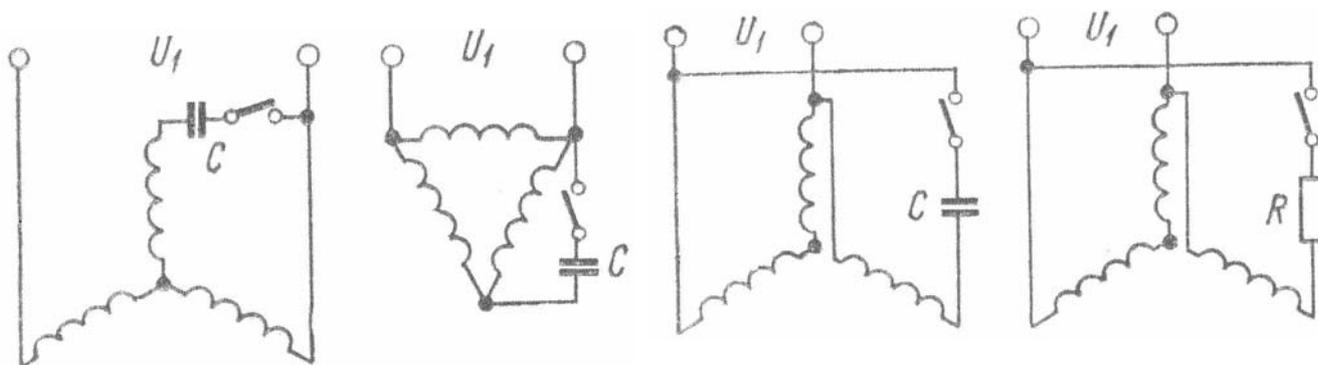


Рис. 2.14. Схемы включения трехфазных АД для работы от однофазной сети

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек А.И. Электрические машины. - Л.: Энергия, 1980.
2. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С., Электрические машины. - М.: Высш. шк., 1979.1987.
3. Копылов И.П. Электрические машины. -М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Кацман М.М. Электрические машины. -М.: Высш. шк., 1983.
5. Читечян В.И. Электрические машины: Сборник задач. -М.: Высш. шк., 1988.
6. Справочник по электрическим машинам: В 2 т./Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. -М: Энергоатомиздат, 1989.
7. Рябуха В.И. Электрические машины. Общие вопросы теории машин переменного тока. ( Сборник задач с ответами ) -СПб.: СЗПИ, 1994.
8. Рябуха В.И. Электрические машины. Трансформаторы. ( Сборник задач с ответами ) -СПб.:СЗПИ, 1994
9. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. ГОСТ 11677-85.
10. Двигатели асинхронные. Общие технические условия. ГОСТ 16264.1-85.
11. Двигатели синхронные. Общие технические условия. ГОСТ 16264.2-85.
12. Турбогенераторы, гидрогенераторы, синхронные компенсаторы и их системы возбуждения. Номенклатура показателей. ГОСТ 4.171-85

### 3. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

#### 3.1. Устройство и принцип работы

Статор синхронной машины (СМ) называется якорем. На статоре расположена трехфазная обмотка, равномерно распределенная по пазам (обмотка якоря). Число полюсов обмотки статора равно числу полюсов ротора [1].

Ротор СМ называется индуктором и имеет обмотку возбуждения (ОВ), питаемую постоянным током. Ток подвод осуществляется через два контактных кольца и щетки. Машины малой мощности могут иметь возбуждение от постоянных магнитов. По конструкции ротора различают явнополюсные и неявнополюсные СМ (рис.3.1).

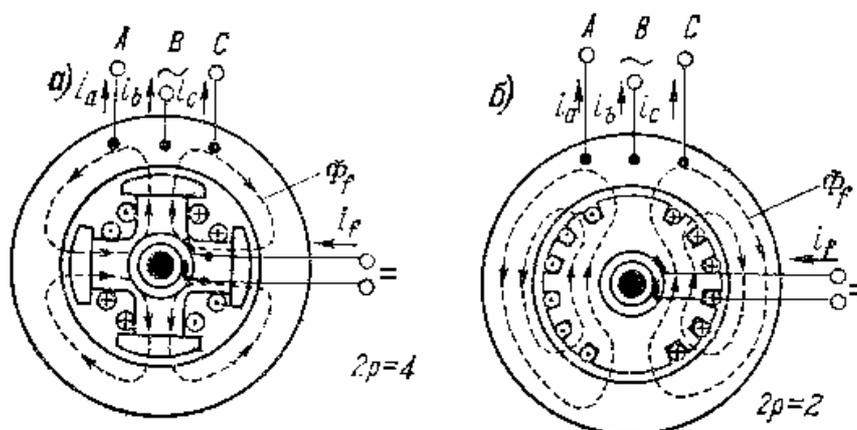


Рис.3.1. Принцип устройства явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) СМ

В неявнополюсной конструкции примерно одна треть полюсного деления ротора свободна от пазов и представляет собой, так называемый, большой зуб. Такая конструкция обеспечивает высокую механическую прочность ротора и используется в двухполюсных машинах, имеющих высокую частоту вращения ротора (турбогенераторы и мощные синхронные двигатели - турбомоторы).

В режиме генератора необходимо ротор привести во вращение со скоростью  $n$  и возбудить его, тогда поток возбуждения  $\Phi$  будет пересекать проводники обмотки якоря и индуцировать в них ЭДС с частотой

$$f = p n / 60, \quad (3.1)$$

где  $p$  - число пар полюсов.

Для получения  $f = 50$  Гц частота вращения  $n$  должна соответствовать  $p$ :

|              |      |      |      |     |     |     |
|--------------|------|------|------|-----|-----|-----|
| $p$          | 1    | 2    | 3    | 4   | 5   | 6   |
| $n$ , об/мин | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 500 |

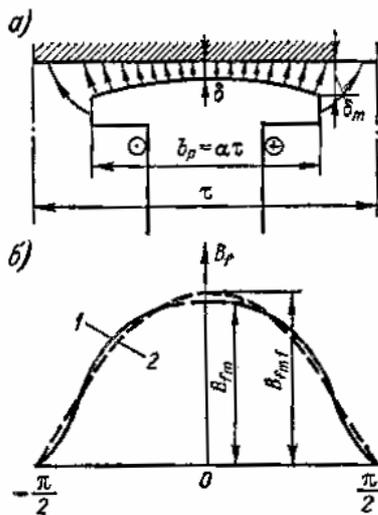
Таким образом, чем больше  $p$ , тем меньше частота вращения  $n$ .

Синхронная машина может работать и в качестве двигателя, если подвести к обмотке статора трехфазный ток. В этом случае в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора поле статора увлекает за собой ротор. При этом ротор вращается в ту же сторону и с той же скоростью, что и поле статора.

### 3.2. Магнитные поля и основные параметры

#### 3.2.1. Магнитное поле и параметры обмотки возбуждения

На рис. 3.2 показана картина магнитного поля обмотки возбуждения в воздушном зазоре явнополюсной СМ [1]. Распределение магнитной



индукции поля возбуждения  $B_f$  показано кривой 1, а основной гармонике  $B_{f1}$  - кривой 2. Отношение амплитуды  $B_{fm1}$  основной гармонике поля возбуждения к реальному максимальному значению этого поля  $B_{fm}$

$$k_f = \frac{B_{fm1}}{B_{fm}} \quad (3.2)$$

называется коэффициентом формы кривой поля возбуждения. Значения  $k_f$  зависят от отношений  $\frac{\delta_m}{\delta}$ ,  $\frac{\delta}{\tau}$  и  $\alpha = \frac{b_p}{\tau}$  даются в учебниках и справочниках.

Рис.3.2

Обычно  $\frac{\delta_m}{\delta} = 1 \dots 2,5$ ;  $\alpha = 0,65 \dots 0,75$ ;  $k_f = 0,95 \dots 1,15$ .

МДС обмотки возбуждения на один полюс

$$F_f = \frac{W_f \cdot i_f}{2p}, \quad (3.3)$$

где  $W_f$  - число витков и  $i_f$  - ток обмотки возбуждения.

Амплитуда основной гармонике поля возбуждения

$$B_{fm1} = k_f \cdot B_{fm} = \frac{\mu_0}{k_{\mu d} \cdot k_{\delta} \cdot \delta} \cdot F_f \cdot k_f = \frac{\mu_0}{k_{\mu d} \cdot k_d \cdot \delta} \cdot \frac{W_f \cdot i_f}{2p} \cdot k_f, \quad (3.4)$$

где  $k_{\mu d}$  - коэффициент насыщения магнитной цепи по продольной оси, т.е. по оси полюсов.

Коэффициент зазора  $k_{\delta}$  определяют для среднего расчетного зазора

$$\delta_p = \delta + \frac{1}{3}(\delta_m - \delta). \quad (3.5)$$

Поток основной гармонике поля возбуждения

$$\Phi_{f1} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{fm1} \cdot \tau \cdot l_{\delta} = \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{\pi \cdot k_{\mu\delta} \cdot \delta} \cdot \frac{W_f \cdot i_f}{p} \cdot k_f ,$$

где  $l_{\delta}$  - длина воздушного зазора,  $\tau = \frac{\pi D}{2p}$  - полюсное деление.

Потокосцепление основной гармоники поля возбуждения с фазой обмотки якоря, когда ось фазы совпадает с осью полюсов,

$$\Psi_{fad} = W \cdot k_{об} \cdot \Phi_{f1} = M_{fad} \cdot i_f .$$

При вращении ротора с электрической угловой скоростью

$$\omega_1 = 2\pi \cdot f \quad (3.6)$$

потокосцепление с фазой обмотки якоря изменяется по закону

$$\Psi_{fadt} = \Psi_{fad} \cdot \cos \omega t = M_{fad} \cdot i_f \cdot \cos \omega t .$$

При этом в якоре индуцируется ЭДС

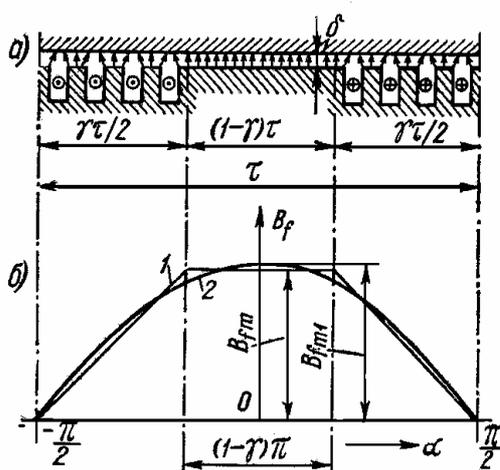
$$e = -\frac{d\Psi_{fadt}}{dt} = \omega_1 \cdot M_{fad} \cdot i_f \cdot \sin \omega t = x_{fad} \cdot i_f \cdot \sin \omega t , \quad (3.7)$$

где  $x_{fad} = \omega_1 \cdot M_{fad}$  -сопротивление взаимной индукции обмотки возбуждения с обмоткой якоря.

Амплитуду  $M_{fad}$  взаимной индуктивности обмоток возбуждения и якоря можно определить с помощью х.х.х.  $E = f(i_f)$  по формуле

$$M_{fad} = \frac{x_{fad}}{\omega_1} = \frac{\sqrt{2} \cdot E}{\omega_1 \cdot i_f} . \quad (3.8)$$

На рис.3.3 представлено магнитное поле в воздушном зазоре для



неявнополюсной машины [1]. Кривая распределения индукции поля возбуждения имеет вид трапеции (кривая 1). Величина  $\gamma$  представляет собой отношение обмотанной части ротора ко всей окружности ротора. Обмотку возбуждения неявнополюсной машины можно рассматривать как распределенную однофазную обмотку с полным шагом и коэффициентом

$$\text{распределения} \quad k_{оф} = \frac{\sin \frac{\gamma \cdot \pi}{2}}{\gamma \cdot \frac{\pi}{2}} .$$

Рис.3.3

Максимальная индукция поля возбуждения

$$B_{fm} = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot \frac{W_f \cdot i_f}{2p} . \quad (3.10)$$

Амплитуда основной гармоники МДС обмотки возбуждения может

быть найдена по формуле МДС однофазной обмотки, полагая

$$\sqrt{2} \cdot W \cdot \frac{I}{2} = W_f \cdot i_f,$$

Тогда

$$F_{fm1} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{W_f \cdot k_{оф}}{p} \cdot i_f \cdot B_{fm1} = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot F_{fm1} = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{W_f \cdot i_f}{2p} \cdot k_{оф} = \frac{4}{\pi} \cdot B_{fm} \cdot k_{оф}. \quad (3.11)$$

Отсюда найдем коэффициент формы поля

$$k_f = \frac{4}{\pi} \cdot k_{оф} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma \cdot \frac{\pi}{2}}{\gamma \cdot \frac{\pi}{2}} \dots \quad (3.12)$$

### 3.2.2. Магнитное поле и параметры обмотки якоря

При нагрузке обмотки якоря током она создает собственное магнитное поле, взаимодействие которого с полем возбуждения называется реакцией якоря. Реакция якоря оказывает весьма значительное влияние на характеристики СМ.

Индуктор (ротор) явнополюсной машины имеет магнитную несимметрию, так как магнитное сопротивление потоку, действующему по поперечной оси  $q$ , т.е. по оси междуполюсного пространства, значительно больше магнитного сопротивления потоку по продольной оси  $d$  (оси полюсов). Поэтому одинаковая по величине МДС якоря при её действии по продольной оси создает больший магнитный поток, чем по поперечной. Кроме того, ротор как явнополюсной, так и неявнополюсной машины имеет электрическую несимметрию, так обмотка возбуждения расположена по продольной оси  $d$ , т.е. создает поток, действующий по оси  $d$  и сцепляется только с потоком якоря, действующим по этой оси. Электрическая несимметрия ротора существенным образом проявляется при несимметричных и переходных режимах работы.

Ввиду несимметричного устройства индуктора действие реакции якоря рассматривают по продольной и поперечной осям в отдельности. Метод такого рассмотрения впервые был предложен французским электро-техником А.Блонделем в 1895 г. и называется методом или теорией двух реакций. Этот метод основан на принципе наложения в предположении, что магнитные потоки, действующие по двум осям не влияют друг на друга, хотя из-за насыщения магнитной цепи это не совсем так.

Рассмотрим действие реакции якоря СМ на примере трехфазного двухполюсного генератора (рис.3.4) [1]. Предположим, что угол сдвига фаз  $\phi$  между током якоря  $\dot{I}$  и ЭДС  $\dot{E}$ , индуктируемой в обмотке якоря полем возбуждения, равен нулю (рис.3.4,а), а величина ЭДС фазы А максимальна. Т.к.  $\phi=0$ , то ток фазы А тоже максимальный. Направления ЭДС и токов можно определить по правилу правой руки. При этом

магнитный поток  $\Phi_a$  обмотки якоря направлен поперек оси полюсов. Следовательно, при  $\phi = 0$  поле реакции якоря является чисто поперечным и вызывает искажение поля возбуждения. Кроме того, поле поперечной реакции якоря индуцирует ЭДС в обмотке якоря.

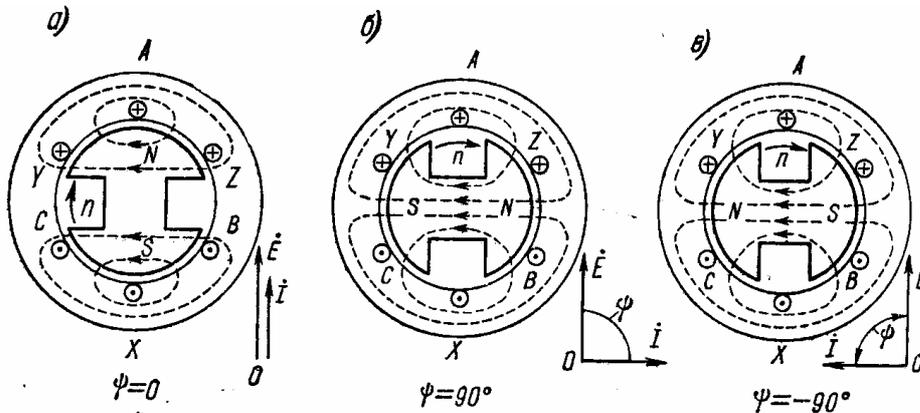
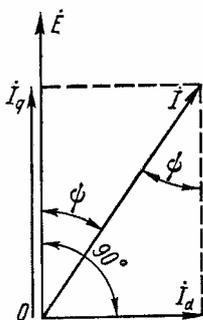


Рис. 3.4 Поперечная (а), продольная размагничивающая(б) и продольная намагничивающая (в) реакция якоря СМ

Если ток  $\dot{I}$  отстает от ЭДС  $\dot{E}$  на  $\phi = 90^\circ$ , то максимум тока отстает от ЭДС на четверть периода, когда ротор повернется на  $90^\circ$ . При этом реакция якоря действует по продольной оси и является по отношению к полю возбуждения чисто размагничивающей (продольная размагничивающая реакция якоря).

Если ток опережает ЭДС на  $\phi = -90^\circ$ , то максимум тока наступает на четверть периода раньше, чем максимум ЭДС. При опережающем токе поле якоря также действует по продольной оси, но является по отношению к полю возбуждения чисто намагничивающей, т.е. она увеличивает поток возбуждения (продольная намагничивающая реакция якоря).

В общем случае, когда  $0 < \phi < 90^\circ$ , ток  $\dot{I}$  можно разложить на две составляющие (рис.3.5):



$$I_d = I \cdot \sin \phi; \quad I_q = I \cdot \cos \phi, \quad (3.13)$$

первая из которых называется продольной составляющей тока якоря (продольным током) и создает продольную реакцию якоря, а вторая поперечной составляющей тока (поперечным током) и создает поперечную реакцию якоря. Угол  $\phi$  считается положительным, когда  $\dot{I}$  отстает от  $\dot{E}$ .

Рис. 3.5. Разложение тока  $I$  якоря на продольную  $I_d$  и поперечную  $I_q$  составляющие

Амплитуды основной гармоники продольной и поперечной МДС реакции

якоря [1]

$$F_{ad} = \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{об}}{p} \cdot I_d, \quad F_{aq} = \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{об}}{p} \cdot I_q. \quad (3.14)$$

можно рассматривать как составляющие полной МДС якоря по осям d и q

$$F_a = \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{об}}{p} \cdot I. \quad (3.15)$$

Тогда

$$F_{ad} = F_a \sin \phi; \quad F_{aq} = F_a \cos \phi. \quad (3.16)$$

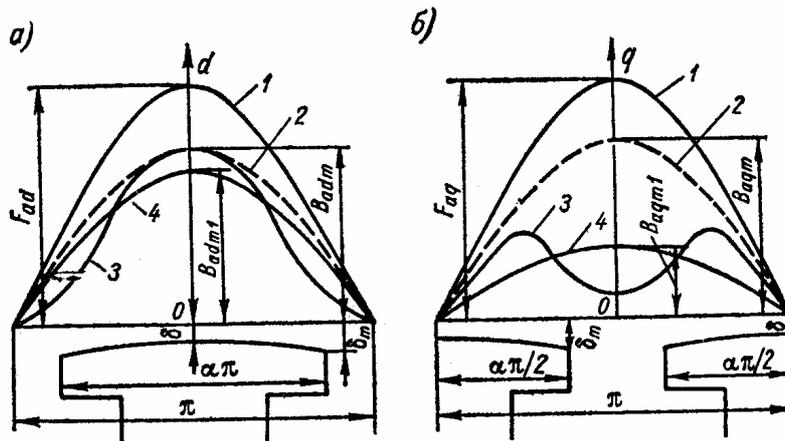
Максимумы волн МДС  $F_{ad}$  совпадают с продольной осью, а  $F_{aq}$  с поперечной (рис.3.6, кривые 1). Если бы величина зазора  $\delta$  была по всей окружности одинакова, то МДС  $F_{ad}$  и  $F_{aq}$  создали синусоидальные волны магнитного поля (рис.3.6, кривые2) с амплитудами

$$B_{adm} = \frac{\mu_0}{k_{\mu d} \cdot k_{\delta} \cdot \delta} \cdot F_{ad}; \quad B_{aqm} = \frac{\mu_0}{k_{\mu q} \cdot k_{\delta} \cdot \delta} \cdot F_{aq}. \quad (3.17)$$

Вследствие неравномерности воздушного зазора действительные кривые индукции 3 не будут синусоидальны. Кривая 4 показывает основные гармоники поля продольной и поперечной реакции якоря с амплитудами  $B_{adm1}$  и  $B_{aqm1}$ . Отношения

$$k_{ad} = \frac{B_{adm1}}{B_{adm}}; \quad k_{aq} = \frac{B_{aqm1}}{B_{aqm}} \quad (3.18)$$

меньше единицы, причем  $k_{aq} < k_{ad}$ . Величины  $k_{ad}$  и  $k_{aq}$  называются



коэффициентами формы поля продольной и поперечной реакции якоря.

Рис.3.6. Кривые поля реакции якоря явнополюсной синхронной машины по продольной (а) и поперечной (б) осям

Зависимости  $k_{ad}$ ,  $k_{aq}$  даются в учебниках. Для неявнополюсной машины вследствие равномерности зазора  $k_{ad} = k_{aq} = 1$ .

Основные гармоники полей продольной и поперечной реакции якоря создают потоки реакции якоря

$$\Phi_{ad} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{adm1} \cdot \tau \cdot l_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot k_{ad} \cdot B_{adm} \cdot \tau \cdot l_{\delta}; \quad \Phi_{aq} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{aqm1} \cdot \tau \cdot l_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot k_{aq} \cdot B_{aqm} \cdot \tau \cdot l_{\delta}.$$

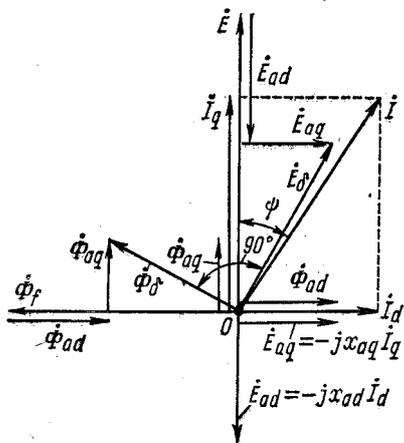
С учетом выше приведенных формул:

$$\Phi_{ad} = \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{k_{\mu d} \cdot k_{\delta} \cdot \delta} \cdot \frac{m \cdot 2\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot \frac{W \cdot k_{o\delta}}{p} \cdot I_d \cdot k_{ad}; \quad \Phi_{aq} = \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{k_{\mu q} \cdot k_{\delta} \cdot \delta} \cdot \frac{m \cdot 2\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot \frac{W \cdot k_{o\delta}}{p} \cdot I_q \cdot k_{aq};$$

Потоки  $\Phi_{ad}$  и  $\Phi_{aq}$  индуцируют в обмотке якоря ЭДС самоиндукции

$$E_{ad} = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot W \cdot k_{o\delta} \cdot \Phi_{ad}, \quad E_{aq} = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot W \cdot k_{o\delta} \cdot \Phi_{aq},$$

которые называются ЭДС продольной и поперечной реакции якоря



На рис. 3.7 [1] представлена векторная диаграмма токов, потоков и ЭДС реакции якоря синхронного генератора при смешанной активно-индуктивной нагрузке ( $0 < \phi < 90^\circ$ ). Здесь  $E$  — ЭДС индуцируемая в якоря потоком возбуждения. По общему правилу потоки совпадают по фазе с создающими их токами, а ЭДС отстают от потоков на  $90^\circ$ . Со стороны статора вращающийся поток возбуждения  $\Phi_f$  представляется изменяющейся во

Рис.3.7. Векторные диаграммы времени

синусоидальной величины, что

потоков и ЭДС реакции якоря позволяет представить его в виде комплексной величины.

Результирующий поток основной гармоники поля в воздушном зазоре

$$\dot{\Phi}_{\delta} = \dot{\Phi}_f + \dot{\Phi}_{ad} + \dot{\Phi}_{aq}.$$

(3.19)

Этот поток индуцирует в обмотке якоря результирующую ЭДС от основной гармоники результирующего поля в зазоре

$$\dot{E}_{\delta} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq}, \quad (3.20)$$

где

$$\dot{E}_{ad} = -jx_{ad} \cdot \dot{I}_d \quad \text{и} \quad \dot{E}_{aq} = -jx_{aq} \cdot \dot{I}_q. \quad (3.21)$$

### 3.2.3. Индуктивные сопротивления

Индуктивные сопротивления обмотки якоря  $x_{ad}$  и  $x_{aq}$  называются соответственно индуктивными сопротивлениями продольной и поперечной реакции якоря. С учетом ранее полученных формул, имеем

$$x_{ad} = 4mf_1 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta}{\pi \cdot k_{\mu d} \cdot k_\delta \cdot \delta} \cdot \frac{W^2 \cdot k_{\sigma\delta}^2}{p} \cdot k_{ad}, \quad x_{aq} = 4mf_1 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta}{\pi \cdot k_{\mu q} \cdot k_\delta \cdot \delta} \cdot \frac{W^2 \cdot k_{\sigma\delta}^2}{p} \cdot k_{aq} \quad (3.22)$$

В относительных единицах получим

$$x_{ad}^* = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta}{\pi \cdot k_{\mu d} \cdot k_\delta \cdot \delta} \cdot \frac{A_H}{B_{\delta H}} \cdot k_{ad}, \quad x_{aq}^* = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta}{\pi \cdot k_{\mu q} \cdot k_\delta \cdot \delta} \cdot \frac{A_H}{B_{\delta H}} \cdot k_{aq}. \quad (3.23)$$

Для неявнополюсной синхронной машины

$$x_{ad} = x_{aq}. \quad (3.24)$$

Из этих двух обозначений сохраним  $x_{ad}$ .

Чем меньше  $x_{ad}$  и  $x_{aq}$ , тем выше запас статической устойчивости СМ. Для ограничения влияния реакции якоря значения  $x_{ad}$  и  $x_{aq}$  не должны превосходить определенных пределов. Поэтому величину зазора  $\delta$  в СМ приходится увеличивать. Это требует усиления обмотки возбуждения, что увеличивает расход обмоточного провода и потери. Рост габаритов обмотки возбуждения может привести к увеличению габаритов всей машины. Поэтому уменьшение  $x_{ad}$  и  $x_{aq}$  ведет к удорожанию машины.

Стремление к увеличению мощности машин при заданных габаритах привело к применению более интенсивных способов охлаждения (внутреннее водородное и водяное охлаждение обмоток) и к увеличению линейных нагрузок  $A$  в несколько раз (от  $5 \dots 6,5 \cdot 10^4$  А/м в машинах с воздушным охлаждением до  $15 \dots 24 \cdot 10^4$  А/м). В таких машинах для ограничения величин  $x_{ad}$  и  $x_{aq}$  также необходимо увеличивать  $\delta$ .

МДС обмотки якоря, кроме основной гармоники, содержит также высшие гармоники. При равномерном зазоре поля высших гармоник индуктируют в обмотке якоря ЭДС основной частоты, которые учитываются в виде индуктивного сопротивления дифференциального рассеяния. Существует также пазовое и лобовое рассеяние якоря. Можно считать, что индуктивное рассеяние  $x_{\sigma a}$  одинаково для обеих осей. Обычно  $x_{\sigma a}^* = 0,05 \dots 0,20$  [11].

Активное сопротивление фазы обмотки якоря относительно мало (на порядок меньше, чем  $x_{\sigma a}^*$ ). Обычно  $r_a^* = 0,005 \dots 0,02$  [11].

Полную ЭДС рассеяния можно разложить на составляющие

$$E_{\sigma ad} = E_{\sigma a} \sin\phi = x_{\sigma a} I \sin\phi = x_{\sigma a} I_d;$$

$$E_{\sigma aq} = E_{\sigma a} \cos\phi = x_{\sigma a} I \cos\phi = x_{\sigma a} I_q.$$

Так как ЭДС  $E_{\sigma ad}$  и  $E_{ad}$  совпадают по фазе, то их можно сложить арифметически. Аналогично для ЭДС  $E_{\sigma aq}$  и  $E_{aq}$ :

$$E_d = E_{ad} + E_{\sigma ad} = x_{ad} I_d + x_{\sigma a} I_d = x_d I_d,$$

$$E_q = E_{aq} + E_{\sigma aq} = x_{aq} I_q + x_{\sigma a} I_q = x_q I_q, \quad (3.25)$$

где синхронные сопротивления по продольной оси и по поперечной оси

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma a}, \quad x_q = x_{aq} + x_{\sigma a} \quad (3.26)$$

### 3.2.4. Приведение электромагнитных величин обмоток

#### Относительные единицы

Иногда возникает необходимость определения потоков и ЭДС, создаваемых совместным действием обмоток (возбуждения и якоря).

Необходимо найти ток или МДС возбуждения, эквивалентные данному току или МДС якоря, иначе говоря, привести ток или МДС якоря к обмотке возбуждения. Величины якоря, приведенные к обмотке возбуждения, будем обозначать дополнительно штрихами. Приведенная к обмотке возбуждения продольная и поперечная МДС якоря

$$F'_{ad} = k_d \cdot F_{ad}, \quad F'_{aq} = k_q \cdot F_{aq}, \quad (3.27)$$

где коэффициенты реакции якоря

$$k_d = \frac{k_{ad}}{k_f} \quad \text{и} \quad k_q = \frac{k_{aq}}{k_f}.$$

(3.28)

Вместо приведенных МДС можно рассматривать также токи якоря:

$$I'_d = k_{id} \cdot I_d, \quad I'_q = k_{iq} \cdot I_q,$$

(3.29)

где коэффициенты приведения

$$k_{id} = \frac{m \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{o\delta}}{W_f} \cdot k_d, \quad k_{iq} = \frac{m \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{o\delta}}{W_f} \cdot k_q. \quad (3.30)$$

Для неявнополюсных машин

$$k_d = k_q = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\gamma \cdot \frac{\pi}{2}}{\sin \frac{\gamma \cdot \pi}{2}}. \quad (3.31)$$

$$F'_d = k_d \cdot F_d \quad I' = k_{id} \cdot I.$$

(3.32)

Иногда целесообразно привести обмотку возбуждения к обмотке якоря.

Реальная обмотка возбуждения с током  $i_f$  и приведенная обмотка с током  $i'_f$  должны создавать одинаковое поле основной гармоники в воздушном зазоре. Поэтому

$$\frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d}} \cdot \frac{w_f}{2p} i_f k_f = \frac{\mu_0}{k_0 k_{\mu d}} \cdot \frac{m\sqrt{2}}{n} \cdot \frac{wk_{o\delta}}{p} \cdot \frac{i'_f}{\sqrt{2}} \cdot k_{ad}$$

Откуда

$$i'_f = i_f / k_i,$$

где коэффициент приведения тока возбуждения отличается от  $k_{id}$  на  $\sqrt{2}$ .

$$k_i = \frac{2m}{\pi} \cdot \frac{w k_{об}}{w_f} k_d \quad (3.33)$$

В теории электрических машин широко пользуются относительными единицами. При этом за единицы, или базисные величины, принимают номинальные фазные значения:

$$U_H, I_H, z_H = \frac{U_H}{I_H}, L_H = \frac{z_H}{\omega_1} = \frac{z_1}{2\pi \cdot f}. \quad (3.34)$$

Относительные значения:

$$U_* = \frac{U}{U_H}, \quad I_* = \frac{I}{I_H},$$

$$r_* = \frac{r}{z_H}, \quad x_* = \frac{x}{z_H}, \quad z_* = \frac{z}{z_H}, \quad L_* = \frac{L}{L_H} = \frac{\omega_1 \cdot L}{z_H} = \frac{x}{z_H} \quad (3.35)$$

### 3.3. Работа синхронных генераторов при симметричной нагрузке

#### 3.3.1. Основные виды векторных диаграмм синхронных генераторов

Напряжение фазы обмотки равно сумме индуцируемых в ней ЭДС минус падение напряжения в активном сопротивлении фазы:

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - r_a \dot{I}. \quad (3.36)$$

ЭДС реакции якоря и рассеяния можно выразить через соответствующие токи и индуктивные сопротивления:

$$\dot{E}_{ad} = -jx_{ad} \dot{I}_d, \quad \dot{E}_{aq} = -jx_{aq} \dot{I}_q, \quad \dot{E}_{\sigma a} = -jx_{\sigma a} \dot{I}.$$

Тогда

$$\dot{U} = \dot{E} - jx_{ad} \dot{I}_d - jx_{aq} \dot{I}_q - jx_{\sigma a} \dot{I} - r_a \dot{I} = \dot{E}_\delta - jx_{\sigma a} \dot{I} - r_a \dot{I}. \quad (3.37)$$

Уравнению напряжения (3.37) соответствуют векторные диаграммы Blondеля при активно-индуктивной нагрузке (рис.3.8,а) и активно-емкостной (рис.3.8,б).

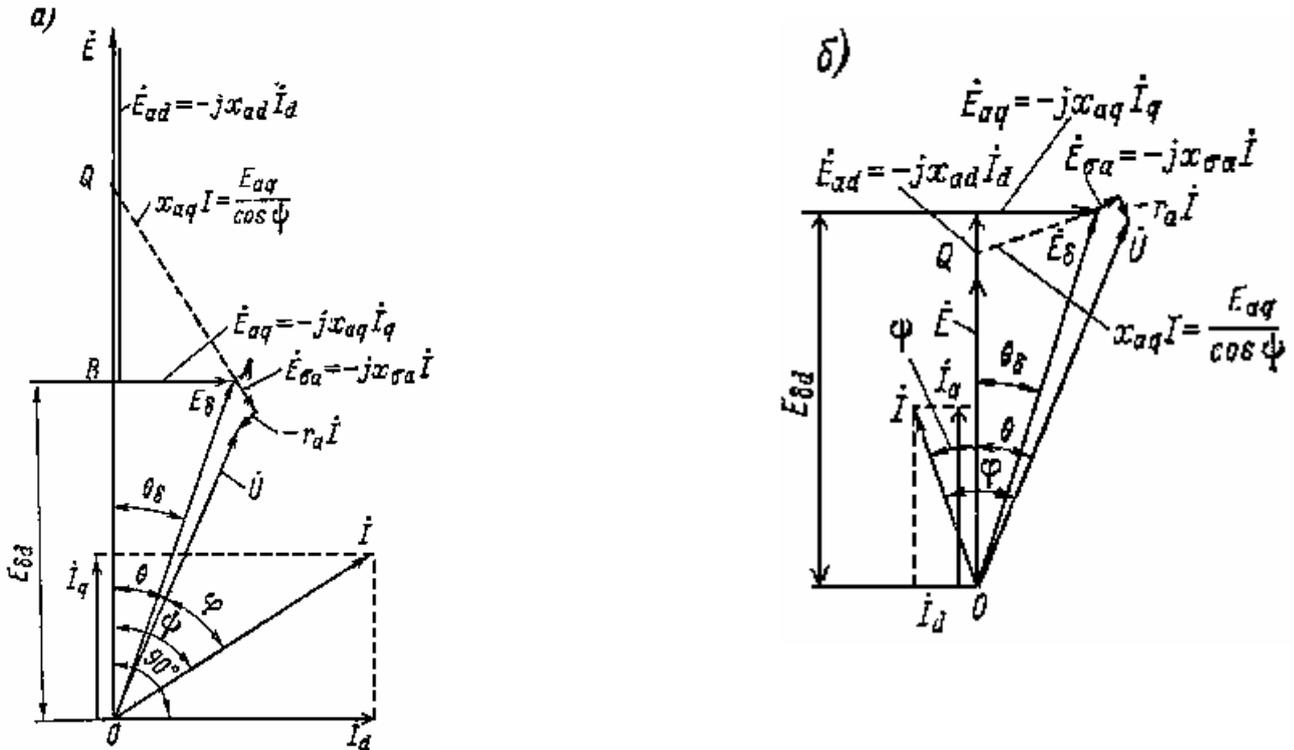


Рис.3.8. Первый вид векторных диаграмм напряжений явнополюсного синхронного генератора

При активно-емкостной нагрузке ЭДС  $E$  и ток возбуждения  $i_f$  меньше, чем при активно-индуктивной за счет намагничивающей реакции якоря.

Угол  $\Theta$  между векторами  $\dot{E}$  и  $\dot{U}$  называется углом нагрузки. В режиме генератора ЭДС  $\dot{E}$  опережает  $\dot{U}$  и угол  $\Theta$  считается положительным.

Кроме рассмотренных диаграмм Blondеля (рис.3.8), пользуются видоизмененными диаграммами (рис.3.9), исходя из соотношения (3.25) и (3.26). Тогда

$$\dot{U} = \dot{E} - jx_d \dot{I}_d - jx_q \dot{I}_q - r_a \dot{I} \quad (3.38)$$

или

$$\dot{E} = \dot{U} + r_a \dot{I} + jx_q \dot{I}_q + jx_d \dot{I}_d. \quad (3.39)$$

Проведем из точки А диаграммы (рис.3.8 и 3.9) отрезки перпендикулярно вектору  $\dot{I}$  до пересечения в точке Q с вектором  $\dot{E}$ . Из прямоугольного треугольника AQB определим длины этих отрезков, где угол QAB равен  $\Psi$ . Для рис.3.8

$$AQ = \frac{AB}{\cos \phi} = \frac{x_{aq} I_q}{\cos \phi} = \frac{x_{aq} I \cos \phi}{\cos \phi} = x_{aq} I, \quad (3.40)$$

для рис.3.9

$$AQ = \frac{AB}{\cos \phi} = \frac{x_q I_q}{\cos \phi} = x_q I. \quad (3.$$

41)

Иногда этими соотношениями удобно пользоваться, чтобы по величине отрезка AQ определить направление вектора  $\dot{E}$  и угол  $\Psi$ .

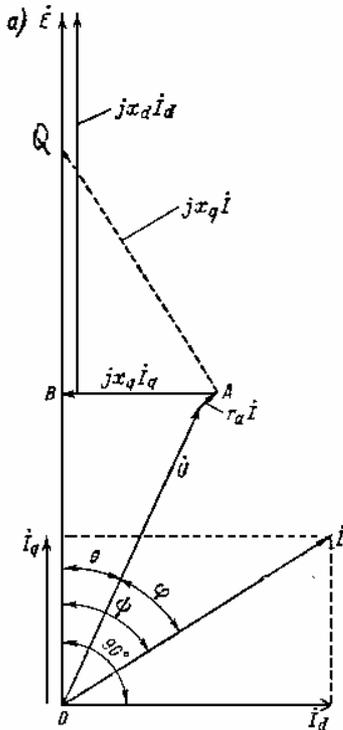


Рис. 3.9. Второй вид векторной диаграммы синхронного генератора

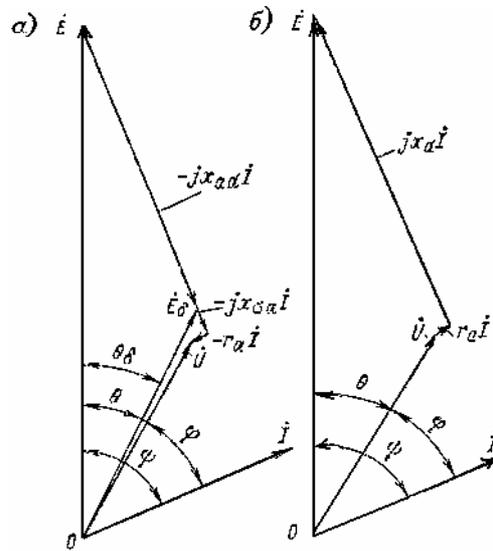


Рис. 3.10. Векторная диаграмма напряжений неявнополюсного синхронного генератора

Для неявнополюсной машины векторная диаграмма представлена на рис.3.10.

### 3.3.2. Характеристики синхронных машин

Особый интерес представляют зависимости между напряжением якоря  $U$ , током якоря  $I$  и током  $i_f$  при постоянной частоте сети  $f$  и частоте вращения  $n_n$ . Схема для снятия характеристик с помощью нагрузочных сопротивлений дана на рис.3.11.

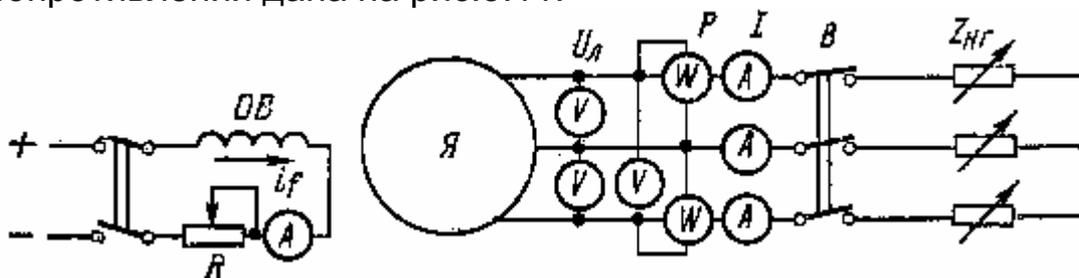


Рис. 3.11. Схема для опытного определения характеристик синхронного генератора

Характеристики явнополюсных и неявнополюсных генераторов в

основном одинаковы. Все характеристики целесообразно строить в относительных единицах.

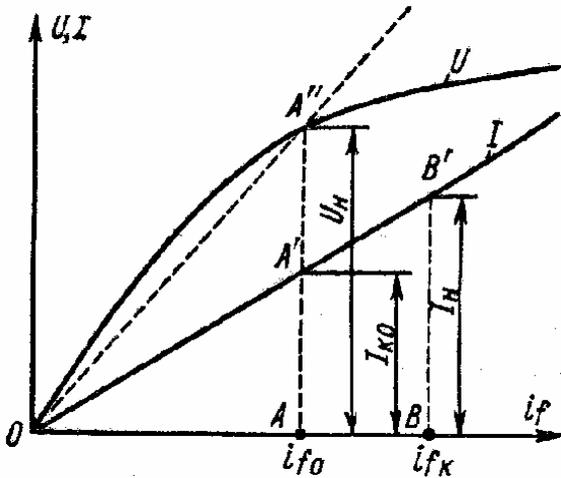


Рис. 3.12. Характеристики холостого хода и короткого замыкания

Касательная к х.х.х. будет соответствовать ненасыщенной магнитной цепи. Прямая  $OA''$ , проведенная через начало координат и рабочую точку, соответствует некоторому среднему насыщению магнитной цепи.

#### Характеристика короткого замыкания $I = f(i_f)$ при $U = 0$ .

Характеристика короткого замыкания (х.к.з.) снимается при замыкании всех фаз обмотки якоря накоротко (симметричное к.з.). Если пренебречь весьма незначительным активным сопротивлением  $r_a$  обмотки якоря, то сопротивление цепи якоря в режиме к.з. будет чисто индуктивным.

Поэтому  $I = I_d$ ,  $I_q = 0$ ,  $\Psi = 90^\circ$ ,  $\dot{E} = jx_d \dot{I}$ .

При к.з. реакция якоря является чисто размагничивающей.

ЭДС от результирующего потока  $\Phi_\delta$  воздушного зазора

$$E\delta = E - x_{ad} I = x_{\sigma d} I$$

весьма мала, вследствие чего поток  $\Phi_\delta$  мал. Поэтому при к.з. магнитная цепь не насыщена и х.к.з.  $I = f(i_f)$  прямолинейна (рис.3.12).

Опытное определение  $x_d$  Х.х.х. и х.к.з. позволяют определить

значение продольного синхронного сопротивления  $x_d = \frac{E}{I}$ . Особый

интерес представляет значение ненасыщенного сопротивления  $x_{d\infty}$ ,

которое определяется по спрямленной х.х.х. При этом  $x_d = \frac{x_{d\infty}}{k_{\mu d}}$

Значение  $k_{\mu d}$  меняется в зависимости от рабочего напряжения.

Отношение короткого замыкания Отношением короткого замыкания

#### Характеристика холостого хода

$$(x.x.x.) \quad U = f(i_f), I = 0.$$

Ниже дана нормальная характеристика холостого хода, которая может быть принята единой для всех синхронных генераторов:

|       |      |     |      |      |      |
|-------|------|-----|------|------|------|
| $E^*$ | 0,58 | 1,0 | 1,21 | 1,33 | 1,44 |
| $F_f$ | 0,50 | 1,0 | 1,50 | 2,00 | 2,50 |

Х.х.х.  $U = f(i_f)$  в относительных единицах представлена на рис. 3.12.

(о.к.з.)  $k_{о.к.з}$  называется отношение установившегося тока короткого замыкания  $I_{к0}$  при токе возбуждения, который при холостом ходе и  $n = n_H$  дает  $E = U_H$ , к номинальному току якоря  $I_H$  [ 11 ]

$$k_{окз} = \frac{I_{к0}}{I_H}. \quad (3.42)$$

В соответствии с рис. 3.12 и изложенным выше  $I_{к0} = \frac{U_H}{x_d}$ ,

где  $x_d$  - насыщенное значение продольного синхронного сопротивления, соответствующее  $E_\delta = U_H$ . На основании этих выражений

$$k_{окз} = \frac{U_H}{x_d I_H} = \frac{I}{x_{d*}} = \frac{k_{\mu d}}{x_{d\phi*}},$$

т.е. о.к.з. равно обратному значению  $x_{d*}$

У многих машин  $x_{d*} > 1$ , и тогда  $k_{окз} < 1$ , т.е. при этом установившийся ток короткого замыкания меньше номинального, что объясняется сильной размагничивающей реакцией якоря.

Если  $i_{f0}$  и  $i_{fк}$  - соответственно токи возбуждения на холостом ходу, когда  $U = U_H$ , и при установившемся коротком замыкании, когда  $I = I_H$ , то на основании подобия треугольников  $OAA'$  и  $OBV'$  (рис.3.12)

$$k_{окз} = \frac{f_{f0}}{i_{fк}}. \quad (3.43)$$

Величина о.к.з., как и величина  $x_d$ , определяет предельную величину нагрузки, которую способен нести генератор при установившемся режиме работы, причем, чем больше о.к.з., тем больше предельная нагрузка.

У гидрогенераторов обычно  $k_{окз} = 0,8...1,8$ , а турбогенераторов  $k_{окз} = 0,4...1,0$  [12]. Величина о.к.з тем больше, чем больше величина зазора  $\delta$  между статором и ротором. Поэтому машины с большим о.к.з. дороже.

Внешняя характеристика  $U = f(I)$  при  $i_f = const, \cos \varphi = const$ .

Внешняя характеристика показывает как изменяется напряжение  $U$  при изменении нагрузки и неизменном токе возбуждения.

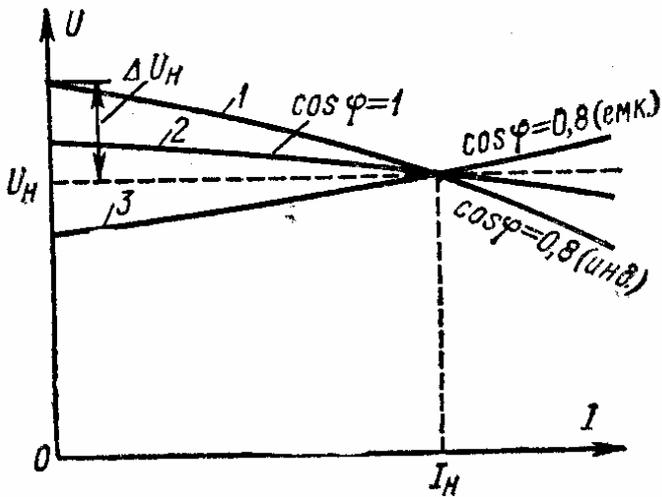


Рис.3.13. Внешние характеристики синхронного генератора

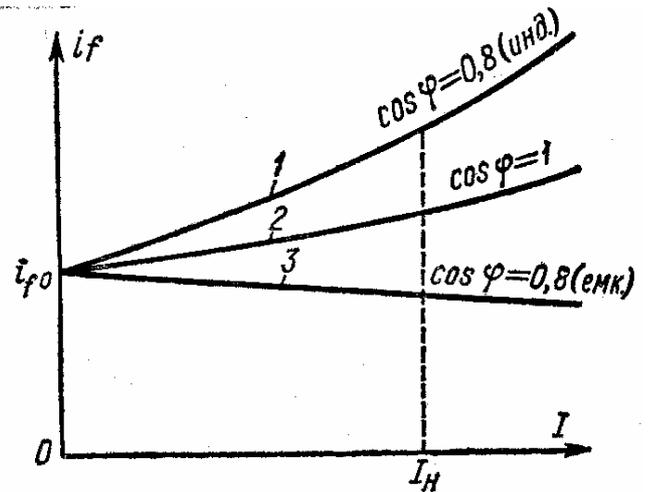


Рис. 3.14. Регулировочные характеристики синхронного генератора

Вид внешней характеристики (рис.3. 13) определяется характером нагрузки и действием реакции якоря. Следует отметить, что значение  $i_f$  для характеристик рис.3.13 различно, наибольшее  $i_f$  соответствует характеристике 1.

Величина  $i_f$  при номинальной нагрузке называется номинальным током возбуждения.

Номинальное изменение напряжения синхронного генератора  $\Delta U_H$  - это изменение напряжения на зажимах генератора при изменении нагрузки от номинального значения до нуля и при неизменном токе возбуждения. Синхронные генераторы обычно рассчитываются для работы с номинальной нагрузкой при отстающем токе и  $\cos \varphi = 0,8$  [12] при этом  $\Delta U_H = 25 \dots 35\%$ .

Регулировочная характеристика  $i_f = f(I)$  при  $U = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \text{const}$ .

Регулировочная характеристика показывает, как нужно регулировать ток возбуждения, чтобы при изменении нагрузки напряжение оставалось неизменным. Вид регулировочных характеристик (рис.3.14) зависит от влияния тока якоря, т. е. от характера нагрузки. При номинальной нагрузке и  $\cos = 0,8$  увеличение тока возбуждения по сравнению с режимом х.х. составляет 1.7...2.2 раза .

Нагрузочная характеристика Наибольший интерес представляет чисто индуктивная нагрузка (индукционная нагрузочная характеристика ) при номинальном токе (рис. 3.15). В данном случае существует чисто продольная размагничивающая реакция якоря. Поэтому индукционная характеристика (кривая 2) идет ниже х.х.х. (кривая 1). Точка А соответствует режиму к.з. ( $I = I_H$  и  $U = 0$ ).





При практическом пользовании диаграммой Потье её совмещают с х.х.х. При этом вектор  $\dot{U}$  направляют по оси ординат, величину  $\dot{E}_s$  сносят на эту же ось, затем на х.х.х., в результате чего находят ток  $i_{fe}$ .

К этому току под углом  $(90^\circ + \varphi + \delta)$  прибавляют  $\dot{I}' = k_{id}\dot{I}$ , в результате чего находят ток  $i_f$ . Если ток  $i_f$  снести на ось абсцисс, то по х.х.х. можно найти напряжение  $U_0$ , которое получится после сброса нагрузки при неизменной величине  $i_f$ , а также изменение напряжения  $\Delta U$ . Активным сопротивлением  $r_a$  обычно пренебрегают.

Диаграмма (рис.3.16) построена в относительных единицах для номинальной нагрузки  $U_* = 1$ ,  $I_* = 1$ ,  $\cos\varphi = 0,8$  (инд.), причем использована нормальная х.х.х. турбогенератора и принято, что  $r_a = 0$ .

В диаграмме Потье МДС реакции якоря не раскладывается на составляющие по осям  $d$  и  $q$ , и поэтому диаграмма Потье действительна только для неявнополюсных машин. Тем не менее ею пользуются также для явнополюсных машин, так как ошибка в определении тока  $i_f$  в случае  $\cos\varphi = 0,8$  обычно не превышает 5...10%.

Приведение полного тока  $I$  или МДС якоря  $F_a$  к обмотке возбуждения производится так же, как приведение продольного тока МДС якоря.

При построении диаграммы Потье обычно вместо  $x_{\sigma a}I$  откладывают  $x_p I$ , что дает более точные результаты, т.к. при этом учитывается повышенное насыщение магнитной цепи от потока рассеяния возбуждения.

### 3.4. Параллельная работа синхронных машин

#### 3.4.1.. Включение синхронных генераторов на параллельную работу

Условия синхронизации При включении генераторов на параллельную работу необходимо избегать чрезмерно большого броска тока и соответственно ударных электромагнитных моментов и сил. Поэтому предварительно необходимо выполнить ряд операций, называемых синхронизацией. Условия синхронизации заключаются в следующем :

- напряжение включаемого генератора  $U_G$  должно быть равно напряжению сети  $U_C$  или уже работающего генератора;
- частота генератора  $f_G$  должна равняться частоте сети  $f_C$ ;
- чередование фаз генератора и сети должно быть одинаково;
- напряжения  $U_G$  и  $U_C$  должны быть в фазе.

Равенство напряжений достигается путем регулирования тока возбуждения и контролируется вольтметром. Изменение частоты и фазы напряжения генератора достигается изменением частоты вращения генератора. Правильность чередования фаз проверяют только при

первом включении генератора после сборки схемы. Совпадение напряжений по фазе контролируется с помощью ламп, нулевых вольтметров или специальных синхроскопов. Неправильная синхронизация может вызвать серьезную аварию. Например, если напряжения генератора и сети будут в противофазе, то ток при включении будет равен двойному току к.з., а ударные электромагнитные силы возрастут в 4 раза.

Синхронизация с помощью лампового синхроскопа Такая синхронизация осуществляется по схеме включения лампового синхроскопа либо на одновременное погасание света ламп, либо на вращение света [1].

В схеме "на погасание огня" каждая из ламп включается между контактами сети и генератора одной и той же фазы. Напряжения на всех лампах одновременно равны нулю и перед включением генератора лампы не должны светиться. Достичь точного равенства частот практически невозможно, поэтому напряжения на лампах пульсируют с разностью частот ( $f_{Г} - f_{С}$ ). Регулированием частоты генератора необходимо добиться, чтобы частота загорания и погасания ламп была минимальной (период 3...5 с). Включение производят в момент, когда лампы не горят. Так как лампы погасают раньше, чем напряжение станет равным нулю, то трудно выбрать правильный момент включения. В этом отношении лучшей является схема "на вращение огня", в которой одна из ламп включается между контактами сети и генератора одной и той же фазы, а две лампы - на разные фазы. Отметим, что если при осуществлении схемы "на погасание огня" вместо одновременного погасания и загорания всех трех ламп получится вращение света, а при схеме "на вращение огня" - одновременное погасание и загорание ламп, то это будет указывать на неправильность чередования фаз генератора и сети. При этом необходимо поменять местами начала двух фаз обмотки статора генератора. Для более точного выбора момента включения параллельно одной из ламп включают вольтметр, имеющий растянутую шкалу в области нуля (нулевой вольтметр).

Другие методы синхронизации. Синхронизация с помощью ламп применяется только для генераторов малой мощности. Для мощных генераторов пользуются электромагнитным синхроскопом, к которому подаются напряжения генератора и сети. Этот прибор работает на принципе вращающегося магнитного поля, и при  $f_{Г} \neq f_{С}$  стрелка вращается с частотой ( $f_{Г} - f_{С}$ ) в ту или иную сторону в зависимости от того, какая частота больше. При правильном моменте включения стрелка синхроскопа обращена вертикально вверх.

Синхронизация генераторов является весьма ответственной операцией и требует от персонала большого внимания. В особенности

это важно в случае различных аварий, когда персонал работает в напряженной обстановке. В этих случаях применяется метод грубой синхронизации, или самосинхронизации. Генератор включается в сеть в невозбужденном состоянии ( $U_G = 0$ ) при скорости вращения, близкой к синхронной (допускается отклонение до 2%). При этом отпадает необходимость в точном выравнивании частот, величины и фазы напряжений, благодаря чему процесс синхронизации предельно упрощается и возможность ошибочных действий исключается. После включения генератора в сеть подается возбуждение.

Метод самосинхронизации можно применять в случаях, когда толчок тока не будет превышать  $3,5 I_H$ . В большинстве случаев это условие выполняется.

### 3.4.2. Синхронные режимы параллельной работы синхронных машин

Режим работы синхронной машины параллельно с сетью называется синхронным. Предположим, что сеть является бесконечно мощной, т.е. в ней  $U = \text{const}$  и  $f = \text{const}$ . Это означает, что изменение режима работы машины не влияет на напряжение и частоту сети.

Напряжение параллельно работающего генератора равно напряжению сети. Для простоты предположим, что включаемая машина является неявнополюсной и сопротивления якоря  $r_a = 0$ . Тогда, согласно диаграмме рис.3.10 ток якоря машины определяется зависимостью

$$\dot{I} = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{jx_d} = \frac{\Delta \dot{U}}{jx_d}. \quad (3.45)$$

#### Изменение реактивной мощности. Режим компенсатора

Предположим, что при включении на параллельную работу условия синхронизации генератора были соблюдены в точности, т.е.  $\dot{U}_G = \dot{U}_C$ .

Тогда  $\dot{I} = 0$ , т.е. машина не примет на себя никакой нагрузки.

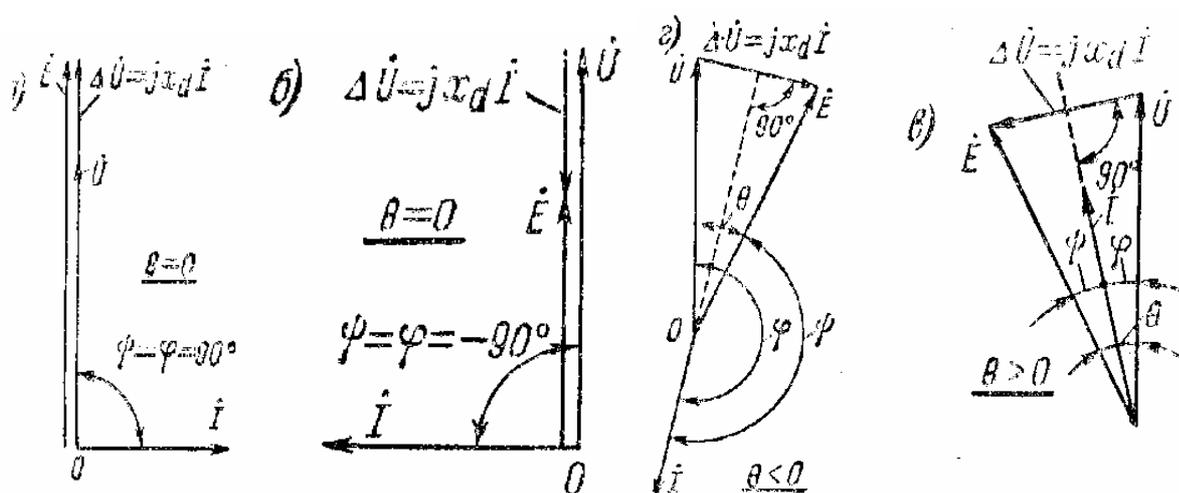


Рис. 3.17. Векторные диаграммы неявнополюсной синхронной машины при работе в режиме компенсатора (а,б) генератора (в) и двигателя (г)

Предположим, что ток возбуждения после синхронизации был увеличен и поэтому  $\dot{E} > \dot{U}$  (рис.3.17,а). Возникает ток  $\dot{I}$ , отстающий от  $\Delta\dot{U}$ , а также от  $\dot{E}$  и  $\dot{U}$  на  $90^\circ$ . Машина будет отдавать в сеть чисто индуктивный ток и реактивную мощность. Если ток возбуждения уменьшить, так что  $\dot{E} < \dot{U}$  (рис.3.17,б), то ток  $\dot{I}$  также будет отставать от  $\Delta\dot{U}$  на  $90^\circ$ , но будет опережать  $\dot{E}$  и  $\dot{U}$  на  $90^\circ$ , т.е. машина будет отдавать в сеть емкостной ток и потреблять из сети реактивную мощность.

Таким образом, изменение тока возбуждения синхронной машины вызывает изменение только реактивного тока и реактивной мощности. При  $E > U$  синхронная машина называется перевозбужденной, а при  $E < U$  - недовозбужденной. При равенстве активной мощности нулю перевозбужденная синхронная машина по отношению к сети эквивалентна емкости, а недовозбужденная- индуктивности.

Синхронная машина, не несущая активной нагрузки и загруженная реактивным током, называется синхронным компенсатором. Такие компенсаторы применяются для повышения коэффициента мощности и поддержания напряжения сети. Если, например, такой компенсатор установить в районе большой промышленной нагрузки и перевозбудить его, то он будет снабжать асинхронные двигатели промышленных предприятий реактивной мощностью, питающая сеть и генераторы электрических станций будут разгружены от этой мощности, коэффициент мощности генераторов и сети повысится, потери мощности и падения напряжения в них уменьшатся и напряжение сети у потребителей сохранится на нормальном уровне.

### Изменение активной мощности. Режимы генератора и двигателя

Изменение тока возбуждения не вызывает появления активной нагрузки или её изменения. Чтобы включенная на параллельную работу машина, приняла на себя активную нагрузку и работала в режиме генератора, необходимо увеличить механический вращающий момент на её валу, увеличив, например, поступление воды или пара в турбину.

Тогда равенство моментов на валу нарушится, ротор генератора, следовательно, и вектор ЭДС генератора  $\dot{E}$  забегают вперед на некоторый угол  $\Theta$ . При этом возникнет ток  $\dot{I}$ , отстающий, как и ранее, от  $\Delta\dot{U} = \dot{E} - \dot{U}$  на  $90^\circ$ . Но, как следует из рис.3.17,в в данном случае  $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$  и

$$P = mUI \cos \varphi > 0,$$

т.е. машина отдает в сеть активную мощность.

Если, наоборот, притормозить ротор машины, создав на его валу механическую нагрузку, то ЭДС  $\dot{E}$  отстанет от  $\dot{U}$  на некоторый угол  $\Theta$ ,

ток  $\dot{I}$  будет отставать от  $\dot{U}$  на угол  $90^\circ < \varphi < 270^\circ$  (рис.3.17, г). При этом мощность машины  $P = mUI \cos \varphi < 0$  и машина будет работать в режиме двигателя, потребляя мощность из сети.

Как следует из рис. 3.17, в,г, у генератора вектор  $\dot{U}$  отстает от вектора  $\dot{E}$ , а у двигателя - наоборот. Угол нагрузки  $\Theta$  в первом случае будем считать положительным, а во втором - отрицательным.

Параллельная работа синхронных генераторов на сеть ограниченной мощности В этих условиях изменение режима работы одного генератора оказывает заметное влияние на режим работы других генераторов.

Допустим, что параллельно на общую сеть работают два генератора одинаковой мощности. Если, например, увеличить одновременно токи возбуждения  $i_{f1}, i_{f2}$  этих генераторов, то напряжение  $U$  обоих генераторов и всей сети возрастет. Для перераспределения общей реактивной мощности между отдельными генераторами при  $U = \text{const}$  нужно токи возбуждения возбуждения одних генераторов увеличивать, а других - уменьшать.

Если увеличить частоту вращения первичных двигателей всех генераторов в системе ограниченной мощности, то частота сети будет возрастать. При этом повысится также мощность потребителей. Для сохранения  $f = \text{const}$  при увеличении мощности первичного двигателя одного генератора мощность первичного двигателя второго нужно уменьшить. При этом происходит перераспределение активных мощностей.

При недостатке генерируемой активной мощности в системе частота  $f$  будет падать, что нарушит нормальное энергоснабжение потребителей. При недостатке генерируемой реактивной мощности напряжение системы будет падать, при определенных условиях даже катастрофически (лавина напряжения). Поэтому сохранение баланса реактивных мощностей не менее важно, чем сохранение баланса активных мощностей.

### 3.5. Угловые характеристики мощности синхронных машин

Мощность СМ зависит от угла нагрузки  $\Theta$  между векторами ЭДС  $\dot{E}$  и напряжения  $\dot{U}$  машины. Зависимость  $P = f(\theta)$  при  $E = \text{const}$  и  $U = \text{const}$  называется угловой характеристикой активной мощности СМ. Принимаем  $r_a = 0$ . Спроектируем (рис.3.9) векторы ЭДС, напряжений и падений напряжения на направление вектора  $\dot{E}$  и на направление, перпендикулярное ему. Тогда получим

$$E = x_d I_d + U \cos \theta, \quad x_q I_q = U \sin \theta,$$

откуда

$$I_d = \frac{E - U \cos \theta}{x_d}, \quad I_q = \frac{U \sin \theta}{x_q}. \quad (3.44)$$

Учитывая, что  $\varphi = \phi - \theta$  (рис.3.9), для мощности генератора имеем

$$P = mUI \cos \varphi = mUI \cos(\phi - \theta) = mU(I \cos \phi \cdot \cos \theta + I \sin \phi \sin \theta) = \\ = mU(I_q \cos \theta + I_d \sin \theta).$$

Заменив здесь  $I_d$  и  $I_q$  по формулам (3.44), получим

$$P = \frac{mU^2}{x_q} \sin \theta \cdot \cos \theta + \frac{nEU}{x_d} \sin \theta - \frac{mU^2}{x_d} \sin \theta \cdot \cos \theta$$

или

$$P = \frac{mEU}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (3.45)$$

### Неявнополюсная машина. Понятие о статической устойчивости

Предполагаем, что машина работает на сеть бесконечной мощности:  $U = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и ток возбуждения не изменяется.

У неявнополюсной машины  $x_q = x_d$  и на основании (3.45)

$$P = \frac{mEU}{x_d} \sin \theta. \quad (3.46)$$

Таким образом, зависимость  $P = f(\theta)$  представляет собой синусоиду. Половина  $P > 0$  соответствуют генераторному режиму работу и половина  $P < 0$  - двигательному. Критический угол нагрузки  $\theta_{кр} = 90^\circ$  соответствует максимальной мощности.

$$P_m = \frac{mEU}{x_d} \quad (3.47)$$

Максимальная мощность обратно пропорциональна величине  $x_d$ . Для уменьшения  $x_d$  в СМ зазор выполняется больше, чем в асинхронных.

Режим работы называется статически устойчивым, если при наличии весьма небольших возмущений параметров (напряжения, тока возбуждения и т.д.) изменение режима работы также будут небольшими и при прекращении этих возмущений восстановится прежний режим работы.

Режим работы синхронной машины статически устойчив, если

$$dP/d\theta > 0. \quad (3.48)$$

Работа неявнополюсного генератора устойчива в области  $\theta < 90^\circ$ .

### Невозбужденная явнополюсная машина

Если  $i_f = 0$ , то и  $E = 0$ , так как ЭДС от остаточного магнитного потока пренебрежимо мала. В этом случае зависимость  $P = f(\theta)$  на основании (3.45) представляет собой синусоиду с удвоенной частотой

$$P = \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \quad (3.49)$$

Явнополюсная машина в состоянии развивать мощность без возбуждения. Устойчивая работа в режиме генератора происходит при  $0 < \theta < 45^\circ$ .

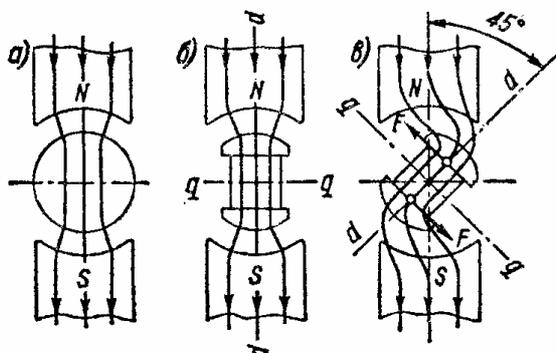


Рис.3.18. Магнитное поле невозбужденной СМ

Пределу устойчивой работы соответствует  $\theta_{кр} = \pm 45^\circ$  (вместо  $\theta_{кр} = \pm 90^\circ$  в предыдущем случае). В машине существует только поток реакции якоря. При цилиндрическом роторе (рис.3.18,а), когда  $x_d = x_q$ , положение ротора относительно вращающегося поля реакции якоря безразлично, поэтому машина не развивает мощности. В явнополюсной машине ротор стремится занять по отношению к вращающемуся полю положение, при котором

сопротивление магнитному потоку минимально. Если при этом приложенный к валу момент  $M_C = 0$ , то  $\theta = 0$  (рис.3.18, б) и  $P = 0$ . Если вал нагружен внешним моментом, то положение ротора относительно поля смещается,  $\theta \neq 0$  и в машине развиваются электромагнитный момент и активная мощность (рис.3.18, в).

У невозбужденной явнополюсной машины электромагнитный момент развивается исключительно вследствие действия поля реакция якоря при наличии неравномерности воздушного зазора ( $x_d \neq x_q$ ) и называется поэтому реактивным.

Реактивный режим работы может возникнуть в случае, когда явнополюсный генератор по какой-либо причине теряет возбуждение и был при этом слабо загружен. Последнее обстоятельство существенно потому, что предельная мощность, которую может развить генератор в этом режиме, невелика. Действительно, в относительных единицах

$$P_* = \frac{P}{S_H} = \frac{P}{mU_H I_H} = \frac{U_*^2}{2} \left( \frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \sin 2\theta$$

Если  $U_* = 1$ ,  $x_{d*} = 1,1$ ,  $x_{q*} = 0,75$ , то

$$P_* = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{0,75} - \frac{1}{1,1} \right) \sin 2\theta = 0,212 \sin 2\theta, \quad \text{т.е. } P_{m*} = 0,212.$$

Машина в этом режиме потребляет большой реактивный ток для создания магнитного поля. На холостом ходу ( $\theta = 0$ )

$$I = \frac{U}{x_d}$$

Например, при  $U_* = 1$  и  $x_{d*} = 1,1$  будет  $I_* = 0,91$ .

На практике применяются синхронные явнополюсные двигатели малой мощности без обмотки возбуждения (реактивные двигатели). Возбужденная явнополюсная машина. В этом случае машина развивает мощность как за счет электромагнитного момента, создаваемого потоком возбуждения, так и за счет реактивного электромагнитного момента. На рис. 3.19 изображены кривые 1 и 2 обеих составляющих мощности и кривая 3 суммарной мощности. Максимальная мощность и предел устойчивости работы в данном случае наступают при критическом угле  $\theta_{кр}$ , значение которого определяется равенством

$$\cos \theta_{кр} = \frac{\sqrt{A^2 + 8B^2} - A}{4B},$$

$$\text{где } A = \frac{mEU}{x_q}, \quad B = mU^2 \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right).$$

В относительных единицах

$$P_* = \frac{E_* U_*}{x_q} \sin \theta + \frac{U_*^2}{2} \left( \frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \sin 2\theta.$$

У генератора с  $x_{d*} = 1,1$ ,  $x_{q*} = 0,75$  и  $\cos \varphi_H = 0,8$  (инд.) при номинальной нагрузке ( $U_* = 1, I_* = 1$ ) ЭДС от потока возбуждения  $E_* = 1,87$  и  $\theta = 22^\circ 27'$ , что можно установить путем построения векторной диаграммы.

Таким образом,

$$P_{H*} = \frac{1,87 \cdot 1}{1,1} \sin 22^\circ 27' + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{0,75} - \frac{1}{1,1} \right) \sin 2 \cdot 22^\circ 27' = 1,7 \cdot 0,382 + 0,212 \cdot 0,706 = 0,65 + 0,15 = 0,8.$$

Вторая составляющая мощности сравнительно мала и составляет в данном случае 19% от всей мощности. У генератора с приведенными данными при  $E_* = 1,87$  и  $U_* = 1$  критический угол нагрузки  $\theta_{кр} = 77^\circ$  и предельная мощность  $P_{m*} = 1,75$ , т.е. примерно в два раза больше номинальной активной мощности ( $P_{m*} = 0,8$ ).

Наряду с рассматриваемыми характеристиками активной мощности представляют интерес также угловые характеристики реактивной мощности  $Q$ . Реактивная мощность

$$Q = mUI \sin \varphi = mUI \sin(\phi - \theta) = mU(I \sin \phi \cos \theta - I \cos \phi \sin \theta) = mU(I_d \cos \theta - I_q \sin \theta).$$

Подставив сюда  $I_d$  и  $I_q$  и заменив  $\cos^2 \theta$  и  $\sin^2 \theta$  функциями двойного

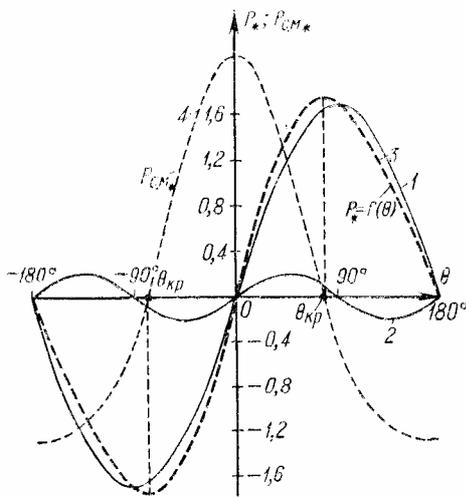


Рис.3.19. Угловая характеристика активной мощности возбужденного явнополюсного генератора при  $E_* = 1,87$ ,  $U_* = 1$ ,  $x_{d*} = 1,1$ ,  $x_{q*} = 0,75$

угла, получим

$$Q = \frac{mEU}{x_d} \cos \theta + \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta - \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right). \quad (3.50)$$

Так как косинус - функция четная, то при прочих равных условиях эта характеристика для режимов генератора и двигателя одинакова.

### 3.6. Синхронизирующая мощность и статическая перегружаемость

При изменении угла нагрузки  $\Theta$  в определенных пределах синхронная машина способна сохранять синхронный режим работы. Устойчивое состояние работы обеспечивает синхронизирующую мощность, представляющую собой разность между подводимой и отдаваемой ею мощностью, и соответствующий ей синхронизирующий момент

$$P_{CM} = \frac{\partial P}{\partial \Theta}, \quad M_{CM} = \frac{\partial M}{\partial \Theta}.$$

На основании (3.45) для явнополюсной машины

$$P_{CM} = \frac{mEU}{x_d} \cos \Theta + mU^2 \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta. \quad (3.51)$$

Для неявнополюсной машины  $x_q = x_d$  и выражение (3.51) упрощается.

Кривая синхронизирующей мощности  $P_{CM}$  показана на рис. 3.19 в виде пунктирной кривой. Режим работы синхронной машины устойчив, когда синхронизирующая мощность и момент положительны.

Синхронизирующая мощность и момент для перевозбужденной машины ( $E > U$ ), чем недовозбужденной ( $E < U$ ), поэтому перевозбужденная машина в большей степени способна сохранять устойчивый режим работы, чем недовозбужденная.

При увеличении механической мощности на валу синхронной машины свыше ее максимальной мощности  $P_m$  машина выйдет из синхронизма и ротор ее будет вращаться асинхронно с некоторым скольжением  $s$  относительно поля статора. Подобный режим недопустим, так как он опасен для машины и нарушает нормальную работу сети. Поэтому при эксплуатации синхронных машин необходимо обеспечить их устойчивую синхронную работу.

Статическая перегружаемость синхронной машины характеризуется отношением максимальной мощности  $P_m$  (3.47) при номинальных значениях напряжения и тока возбуждения к номинальной мощности [12]

$$k_{\Pi} = \frac{P_m}{P_H} = \frac{M_m}{M_H}. \quad (3.52)$$

Величина  $k_{\Pi}$  тем больше, чем меньше угол  $\theta_H$  при номинальной нагрузке. Обычно  $\theta_H = 20 \dots 35^\circ$  [1].

Номинальная мощность

$$P_H = mU_H I_H \cos \varphi_H = S_H \cos \varphi_H = \frac{mU_H^2}{z_H} \cos \varphi_H. \quad (3.53)$$

Для неявнополюсной машины

$$k_H = \frac{E_{H\bullet}}{x_{d\bullet}} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_H}, \quad (3.54)$$

где  $x_{d\bullet} = x_{d\bullet} I_{H\bullet} = E_{k\bullet}$ ,

ЭДС  $E_{k\bullet}$  индуцируется током возбуждения  $i_f = i_{fk}$  при установившемся трехфазном коротком замыкании, когда  $I = I_H$ .

Поскольку ЭДС  $E_H$  и  $E_k$  пропорциональны току возбуждения  $i_{fH}$  и  $i_{fK}$ , то

$$\frac{E_{H\bullet}}{x_{d\bullet}} = \frac{E_{H\bullet}}{E_{K\bullet}} = \frac{i_{fH}}{i_{fK}}.$$

Поэтому вместо (3.54) с учетом (3.43) можно написать [12]

$$k_H = \frac{i_{fH}}{i_{fK}} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_H} = k_{o.k.z.} \frac{1}{\cos \varphi_H}, \quad (3.55)$$

где  $i_{f0}$  - ток возбуждения холостого хода при  $U = U_H$ .

Статическая перегружаемость синхронных машин тем больше, чем больше их о.к.з., т.е. чем меньше относительное значение  $x_d$  или чем больше воздушный зазор.

Для неявнополюсной машины на основании равенств (3.46) и (3.47)

$$k_H = \frac{1}{\sin \theta_H}. \quad (3.56)$$

Статическая перегружаемость явнополюсных синхронных машин также выражается (3.54) ... (3.56) с введением добавочного множителя

$$\varepsilon = \frac{x_{d\bullet} - x_{q\bullet}}{E_{H\bullet} x_{q\bullet}}. \quad (3.57)$$

Величина статической перегружаемости стандартизирована [11, 12]: для турбогенераторов не менее 1,6 ... 1,7, гидрогенераторов - 1,7, двигателей - 1,65.

### 3.7. Работа синхронной машины при постоянной мощности и переменном возбуждении

Рассмотрим зависимость тока  $I$  от тока возбуждения  $i_f$  при постоянной активной мощности  $P = mUI \cos \varphi$  в случае параллельной работы машины с сетью бесконечной мощности ( $U = \text{const}$ ). Для простоты определим эту зависимость для неявнополюсной машины (рис.3.20). Полученные результаты будут характерны также для явнополюсной машины [1]. При этом будем рассматривать ток возбуждения, приведенный к обмотке якоря.



$$I = \frac{U}{x_d}.$$

Линия АВ представляет собой границу устойчивости, на которой  $\Theta = \Theta_{кр}$ . При дальнейшем увеличении тока возбуждения машина выпадает из синхронизма.

U - образные характеристики генератора и двигателя практически одинаковы.

## *В.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.*

По назначению электрические машины разделяются на генераторы, двигатели и преобразователи. Электрический генератор преобразует механическую энергию приводного двигателя в электрическую энергию. Электрический двигатель, наоборот, преобразует подводимую к нему электрическую энергию в механическую энергию вала. Электромашинный преобразователь преобразует электрическую энергию одного вида в электрическую энергию другого вида, изменяя род тока, величину напряжения, частоту, число фаз. Примером преобразователя может служить трансформатор.

По роду тока различают электрические машины постоянного, переменного тока и универсальные. Машины переменного тока по принципу работы разделяются на синхронные и асинхронные. Машины переменного тока по числу фаз могут быть одно-, двух- и трехфазные. Двигатели постоянного тока небольшой мощности могут использоваться и при работе на переменном токе, т.е. применяться как универсальные.

Машины постоянного тока относятся к коллекторным машинам, машины переменного тока - к бесколлекторным машинам, за исключением специального типа машин.

По мощности условно можно выделить следующие группы электрических машин:

- микромашины имеют мощность до 0,5 кВт;
- машины малой мощности - от 0,5 кВт до 10 кВт;
- машины средней мощности - от 10 кВт до 100 кВт;
- крупные машины имеют мощность свыше 100 кВт.

По применению различаются электромашинны общепромышленного и специального применения. Существуют и другие виды классификации электрических машин .

Каждая электрическая машина снабжается паспортом и обычно щитком, укрепленном на корпусе, где указаны тип машины и её эксплуатационные данные, относящиеся к номинальному режиму работы (режиму, для работы в котором изготовлена машина). Величины, относящиеся к номинальному режиму работы называются номинальными и обычно снабжаются индексом "н". Например, номинальные значения мощности  $P_n$ , напряжения  $U_n$  тока  $I_n$ , частоты вращения  $n_n$ , КПД  $\eta_n$  и т.д. На щитке могут быть указаны и другие данные (схема соединения обмоток и т.п.).

Электрические машины обладают принципом обратимости, т.е. машина может работать как в генераторном, так и в двигательном режиме.

### *В.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ*

По назначению, которые выполняют электрические машины в схемах автоматики, телемеханики и вычислительной техники, можно выделить следующие группы:

- силовые двигатели автоматики;
- исполнительные или управляемые двигатели;
- информационные электромашинные устройства (тахогенераторы, вращающиеся трансформаторы, сельсины в трансформаторном режиме);
- электромашинные преобразователи;
- электромашинные усилители;
- электромашинные устройства гироскопических систем и т.д.

Известно, что системы автоматики могут осуществляться как разомкнутыми, так и замкнутыми. Последние представляют собой наиболее распространенный вид систем. В них чаще всего используется принцип работы по отклонению, заключающийся в том, что регулируемая величина (например, частота вращения двигателя) сравнивается измерительным устройством с заданным значением и при отклонении от него система вырабатывает сигнал управления, который, после усиления поступает к исполнительному устройству (в данном случае -двигателю), возвращая регулируемую величину к заданному значению. Примером использования электромашинных элементов в разомкнутых системах могут служить шаговые двигатели, угол поворота которых строго пропорционален числу управляющих импульсов поданных в его обмотки.

В замкнутых системах электромашинные элементы находят применение в качестве любого из трех составляющих систему устройств: измерительного (тахогенераторы, сельсины, вращающиеся трансформаторы), усилительного (электромашинные усилители различных типов) и исполнительного (генераторы в источниках электроэнергии, двигатели различных типов в системах регулирования частоты вращения или угла поворота).

## 4. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## 4. 1. Общие сведения

### 4.1.1. Устройство

На рис. 4.1 показано устройство машины постоянного тока (М П Т) средней мощности [ 2 ]. Неподвижная часть электрической машины называется статором, вращающаяся часть- ротором. Эти части разделены воздушным зазором.

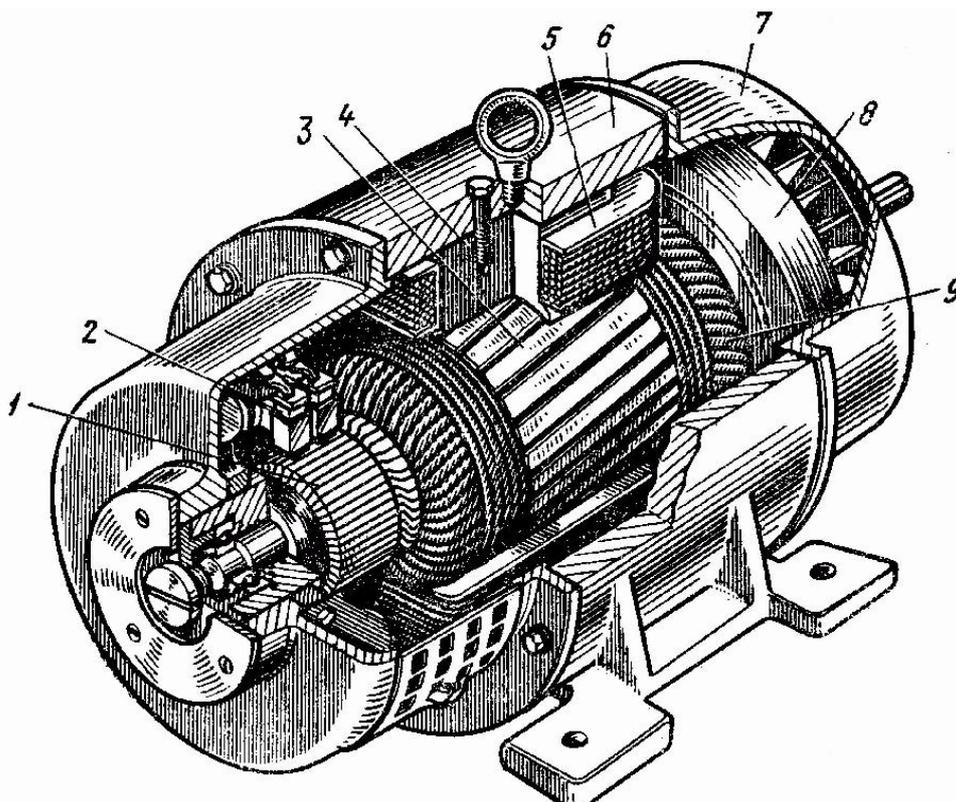


Рис. 4.1.

Статор состоит из станины 6, на внутренней поверхности которой расположены главные полюса 4, прикрепленные к станине болтами. Станина, помимо механической нагрузки, выполняет роль элемента магнитной цепи и служит для замыкания магнитного потока. Станина изготавливается из стали или чугуна - материалов, в которых сочетается высокая механическая прочность с большой магнитной проницаемостью.

Главные полюса машины состоят из сердечника полюса, полюсного наконечника и катушки возбуждения 5. Сердечник полюса может быть литым, но чаще его набирают из штампованных листов электротехнической стали, стягивая их шпильками. Полюсный наконечник обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Катушка полюса изготавливается из медного изолированного провода. Катушки всех главных полюсов

электрически соединяются, образуя обмотку возбуждения, питаемую постоянным током. В машинах малой мощности главные полюса могут выполняться в виде постоянных магнитов. Полярность полюсов чередуется. Число полюсов  $2p$  всегда четное. В теории обычно рассматриваются двухполюсные машины, так как процессы под каждой парой полюсов идентичны, хотя в реальных машинах число полюсов может быть больше двух. В машинах мощностью свыше 1 кВт между главными полюсами устанавливают дополнительные полюса для уменьшения искрения под щетками.

Ротор М П Т называется якорем. Сердечник якоря  $\mathcal{Z}$  (рис. 4.1) представляет собой цилиндр, набранный из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Листы стали оксидируются или покрываются изолирующим лаком для уменьшения потерь на вихревые токи, которые возникают в результате вращения якоря в магнитном поле. Листы стали имеют пазы для укладки обмотки. Часто пазы якоря делают со скосом (рис.4.1), что ослабляет пульсацию магнитной индукции в воздушном зазоре и способствует уменьшению вибраций и шума в процессе работы.

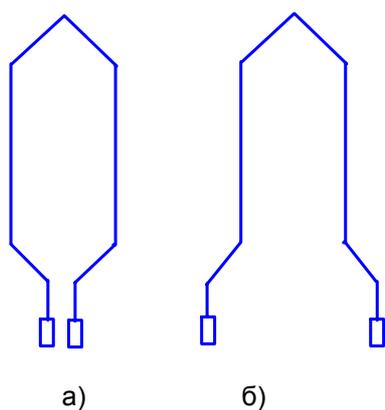


Рис. 4.2

Обмотка якоря  $\mathcal{Z}$  состоит из секций (катушек), выполненных из медного изолированного провода (рис.4.2). В серийных МПТ средней мощности обмотка якоря обычно выполняется простой волновой (рис.4.2, б) или простой петлевой (рис.4.2, а). Волновая обмотка более экономична. Число параллельных ветвей для нее  $2a = 2$ . Однако применение этой обмотки ограничено величиной тока якоря (до 600 А).

Простая петлевая обмотка имеет число параллельных ветвей  $2a = 2p$ . При больших токах якоря применяют сложные обмотки. Расстояние между сторонами одной секции обмотки примерно равно полюсному делению  $\tau$  (расстоянию между осями соседних полюсов). Обмотка укладывается в пазы якоря и закрепляется проволочным бандажом или клиньями. Лобовые части обмотки  $\mathcal{Z}$  (рис.4.1) закреплены бандажом.

Концы обмотки якоря присоединяются к коллектору 1, укрепленному на валу. Коллектор представляет собой набор медных пластин, изолированных друг от друга и от вала. В машинах малой и средней мощности пластины коллектора часто запрессовывают в пластмассу. На коллектор налегают щетки 2. Щетки располагаются в щеткодержателях и прижимаются к коллектору пружинами. Щетки соединены с коробкой выводов клеммной платой.

В машинах специального назначения полюсные наконечники могут

иметь пазы, в которых располагается компенсационная обмотка, питаемая от обмотки якоря.

Помимо указанных частей машина имеет подшипниковые щиты: передний (со стороны коллектора) и задний 7 (с противоположной стороны). Подшипники обычно применяются шариковые и роликовые (со стороны привода). Для охлаждения машины служит встроенный вентилятор 8.

#### 4.1.2. Режим генератора

Рассмотрим простейший генератор, представляющий собой рамку в виде двух проводников длиной  $l$ , соединенных в виток (рис.4. 3).

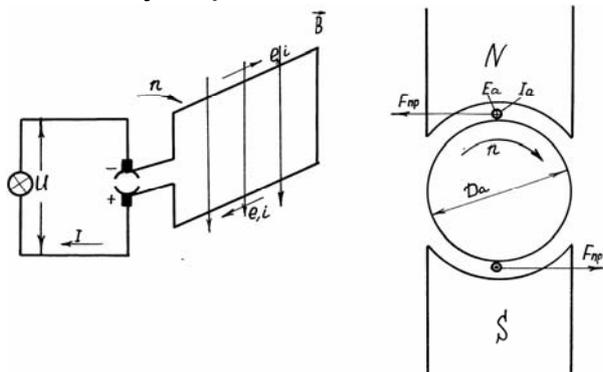


Рис. 4.3

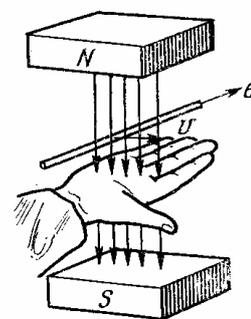


Рис. 4.4

Поместим рамку в магнитное поле с индукцией  $B$ . Предположим, что якорь машины приводится во вращение по часовой стрелке и линейная скорость проводников равна  $v$ . Тогда в проводниках обмотки якоря индуцируется ЭДС вращения, величина которой определяется по закону Фарадея

$$e_{\text{пр}} = B l v. \quad (4.1)$$

Направление ЭДС проводника показано на рис. 4.3 и может быть определено по мнемоническому правилу правой руки: силовые линии входят в ладонь, большой палец показывает направление движения проводника, четыре пальца - направление ЭДС (рис.4. 4).

Как видно из рис. 4.3, ЭДС двух проводников по контуру витка складываются и полная ЭДС данного витка:  $e_{\text{в}} = 2 e_{\text{пр}}$ .

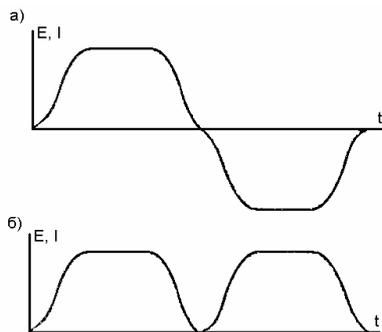


Рис. 4.5

ЭДС обмотки якоря является переменной во времени, так как проводники обмотки якоря проходят попеременно под северным и южным полюсами, в результате чего направление ЭДС в проводниках меняется. По форме кривая ЭДС проводника повторяет кривую распределения индукции вдоль воздушного зазора (рис. 4.5, а).

Частота ЭДС

$$f = p n / 60, \quad (4.2)$$

где  $p$  - число пар полюсов;  $n$  - частота вращения (об/мин).

Если обмотка якоря с помощью щеток замкнута на внешнюю цепь, то возникает ток. В обмотке якоря этот ток будет переменным и кривая его по форме аналогична кривой ЭДС. Однако во внешней цепи направление ЭДС и тока (рис.4.5, б) будет постоянным, что объясняется действием коллектора. Действительно, при повороте якоря и коллектора на  $180^\circ$  и изменении направления ЭДС и тока в проводниках одновременно происходит смена коллекторных пластин под щетками. Вследствие этого под верхней щеткой всегда будет находиться пластина, соединенная с проводником, расположенным под северным полюсом, а под нижней щеткой - пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом. В результате этого полярность щеток и направление тока во внешней цепи остаются неизменными. Таким образом, в генераторе коллектор является механическим выпрямителем, который преобразует переменный ток обмотки якоря в постоянный ток внешней цепи. Для получения тока и напряжения, практически свободных от пульсаций, применяют обмотку якоря с большим числом проводников и коллекторных пластин.

Величина ЭДС обмотки якоря определяется общим числом проводников  $N$  обмотки, их соединением в параллельные ветви  $2a$ , числом полюсов  $2p$  машины, магнитным потоком полюса в воздушном зазоре  $\Phi$ , частотой вращения  $n$  [ 1 ]

$$E = C_E \Phi n, \quad (4.3)$$

где конструктивная постоянная машины

$$C_E = \frac{pN}{60a}. \quad (4.4)$$

ЭДС обмотки якоря можно также выразить формулой

$$E = C_M \Phi \omega, \quad (4.5)$$

где угловая частота вращения

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad (4.6)$$

конструктивная постоянная

$$C_M = \frac{pN}{2\pi a} \quad (4.7)$$

Выходное напряжение (напряжение нагрузки) будет меньше, чем величина ЭДС

$$U = E - I R_{я} - 2\Delta U_{щ}, \quad (4.8)$$

где падение напряжения в якорной цепи

$$\Delta U_{я} = I R_{я} + 2\Delta U_{щ}, \quad (4.9)$$

$R_{я}$  - сопротивление цепи якоря;  $2\Delta U_{щ}$  - падение напряжения в щеточном контакте. Обычно применяются угольно-графитные щетки, для которых принимается  $2\Delta U_{щ} = 2В$ .

Объединяя два последних члена, можно записать:

$$U = E - I_{я} R, \quad (4.10)$$

где  $R$  - суммарное сопротивление якорной цепи с учетом сопротивления щеточного контакта.

При протекании тока по проводникам якоря, находящимся в магнитном поле, на них будут действовать электромагнитная сила Ампера (рис. 4.3)

$$F_{пр} = B l i_{пр}. \quad (4.11)$$

Направление силы определяется по правилу левой руки (рис.4.6): силовые линии входят в ладонь, четыре пальца

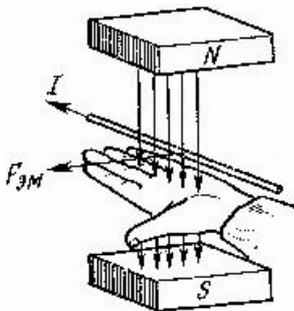


Рис.4.6.

показывают направление тока, большой палец покажет направление силы. Эти электромагнитные силы, действующие на проводники с током, помещенные в магнитное поле, создают электромагнитный момент. В режиме генератора электромагнитный момент является тормозным, так как он действует против направления вращения якоря.

Величина момента определяется формулой [ 1 ]

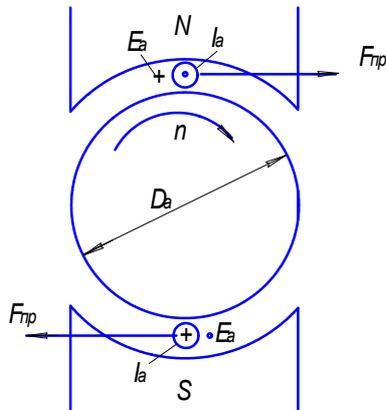
$$M = c_m \Phi I_{я}. \quad (4.12)$$

Полезная мощность генератора

$$P_2 = U I.$$

#### 4.1.3. Режим двигателя

Электрическая машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя (принцип обратимости). В режиме двигателя (рис.4.7) необходимо к обмотке якоря подвести постоянный ток от внешнего источника. При этом коллектор превращает потребляемый из внешней цепи постоянный ток в переменный ток обмотки якоря и работает в качестве механического инвертора тока.



На проводники с током обмотки якоря действуют электромагнитные силы (4.11) и возникает электромагнитный момент (4.12)

$$M = c_M \Phi I_{я}.$$

Момент двигателя является движущим и

Рис.4.7. приводит якорь во

вращение. Если мы желаем,

чтобы при той же полярности полюсов направления вращения генератора (рис.4.3) и двигателя (рис.4.7) были одинаковы, то направление тока двигателя должно быть обратным по сравнению с генератором.

После того, как ротор якоря придет во вращение, в проводниках обмотки якоря будет индуцироваться ЭДС (4.3), (4.5)

$$E = C_E \Phi n, \quad E = C_M \Phi \omega.$$

В режиме двигателя направление ЭДС  $E$  и направление тока якоря  $I_{я}$  противоположны, поэтому ЭДС якоря двигателя называют противо-ЭДС. В режиме генератора направление ЭДС  $E$  и тока  $I_{я}$  якоря совпадают.

Приложенное к якорю двигателя напряжение уравнивается ЭДС  $E$  и падением напряжения в обмотке якоря:

$$U = E + IR_{я} + 2\Delta U_{щ} \quad (4.13)$$

или

$$U = E + IR. \quad (4.14)$$

Из сравнения формул напряжения генератора и двигателя видно, что в генераторе  $U < E$ , а в двигателе  $U > E$ .

Полезная мощность двигателя

$$P_2 = \omega M_2, \quad (4.15)$$

где  $M_2$  - полезный момент на валу, угловая частота вращения (4.6).

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

#### 4.1.4. Потери мощности

Преобразование энергии в электрических машинах связано с потерями. Полезная мощность  $P_2$ , отдаваемая машиной, всегда меньше потребляемой мощности  $P_1$ , подводимой к машине, на величину потерь  $\Delta P = P_1 - P_2$ . Потери мощности снижают КПД, вызывают нагрев, ухудшают её эксплуатационные свойства. Основные потери мощности подразделяют на механические, магнитные и электрические.

Механические потери складываются из потерь на трение в подшипниках, щеток о коллектор, вращающихся частей машины о воздух, а также из потерь на вентиляцию машины. Механические потери возрастают с увеличением частоты вращения (часть потерь в квадрате, часть - в кубе).

Магнитные (потери в стали) и электрические (потери в обмотках) составляют электромагнитные потери.

Потери в стали подразделяются на два вида: на гистерезис (перемагничивание) и вихревые токи. Можно принять, что потери в стали пропорциональны квадрату индукции (квадрату подводимого напряжения). Потери на гистерезис пропорциональны частоте  $f$  (4.2) пульсаций потока в первой степени, а потери на вихревые токи пропорциональны квадрату частоты.

Механические и магнитные потери не зависят от величины тока якоря и называются постоянными.

Электрические потери - потери в обмотках пропорциональны квадрату тока, протекающего по обмотке, и ее сопротивлению ( $I^2 r$ ). Эти потери называются переменными, так как они зависят от величины нагрузки машины.

Кроме основных потерь, в машине существуют добавочные потери, например в полюсных наконечниках; в сердечнике якоря, вызванные искажением поля; в обмотке якоря от вихревых токов и т.п. Величина этих потерь принимается равной 0,5 - 1% от полезной мощности (меньшая цифра относится к машинам, снабженным компенсационной обмоткой).

Коэффициент полезного действия (КПД) представляет собой отношение полезной мощности к подведенной

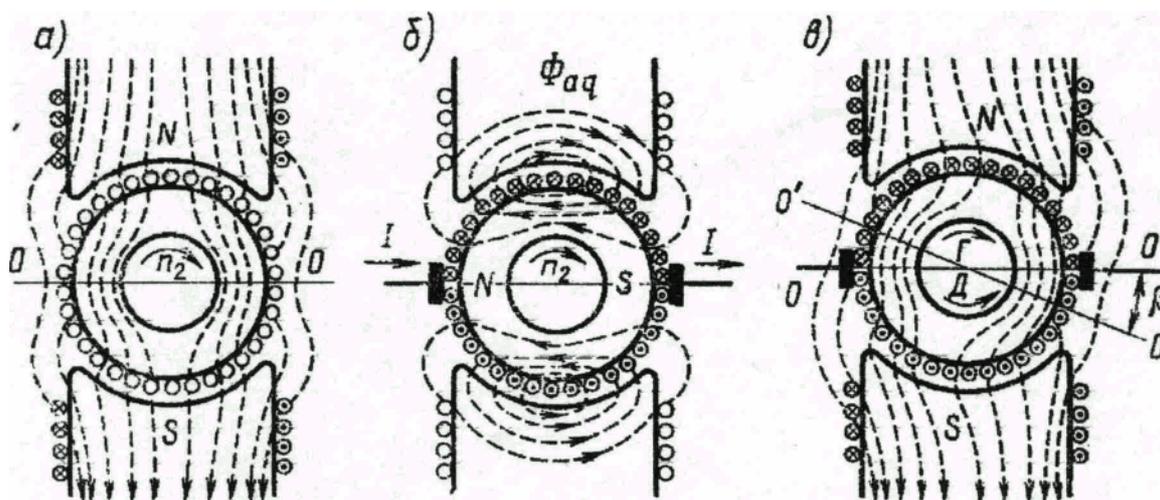
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} . \quad (4.16)$$

Так как величина электрических потерь зависит от нагрузки машины, то с ее изменением меняется величина КПД. Максимум КПД соответствует равенству постоянных и переменных потерь.

#### 4.1.5. Реакция якоря

##### 4.1.5.1. Поперечная реакция якоря

В режиме холостого хода машины имеется только магнитное поле, создаваемое обмоткой возбуждения. Картина этого поля изображена на рис. 4.8,а. Ось поля возбуждения и его МДС  $F_v$  направлена вдоль оси полюсов, называемой продольной осью машины  $d-d$ . При нагрузке машины в обмотке якоря протекает ток  $I_{я}$ , который создает собственное



Фрез

Рис. 4.8

магнитное поле якоря. Под действием поля якоря результирующее поле машины искажается. Это явление называется реакцией якоря.

Рассмотрим реакцию якоря при установке щеток на геометрической нейтрали  $0-0$ , являющейся поперечной осью  $q-q$ . На рис. 4.8, б показано поле обмотки якоря. Ось поля и его МДС  $F_{я}$  направлены всегда по линии щеток и в данном случае совпадают с поперечной осью  $q-q$ . Направление силовых линий магнитного поля можно определить по мнемоническому правилу "буравчика". При установке щеток на геометрической нейтрали поле якоря направлено поперек поля возбуждения и в этом случае реакция якоря называется поперечной, а МДС якоря обозначается  $F_{яq}$ . Развиваемый в машине электромагнитный момент можно рассматривать как результат взаимодействия полюсов поля якоря и полюсов поля возбуждения.

Результирующее магнитное поле определяется наложением полей возбуждения и якоря (рис.4.8,в). Поле соответствует случаю, когда в режиме генератора якорь вращается по часовой стрелке, а в режиме



#### 4.1.5.2. Общий случай реакции якоря

Рассмотрим случай, когда щетки сдвинуты с геометрической нейтрали на некоторый угол (рис.4.10). В этом случае поле обмотки якоря повернется вслед за поворотом щеток. Ось поля якоря всегда направлена по оси расположения щеток. МДС якоря  $F_{я}$  можно разложить на две составляющие: продольную  $F_{яq}$  и поперечную  $F_{яd}$ . Влияние поперечной реакции  $F_{яd}$  было рассмотрено выше.

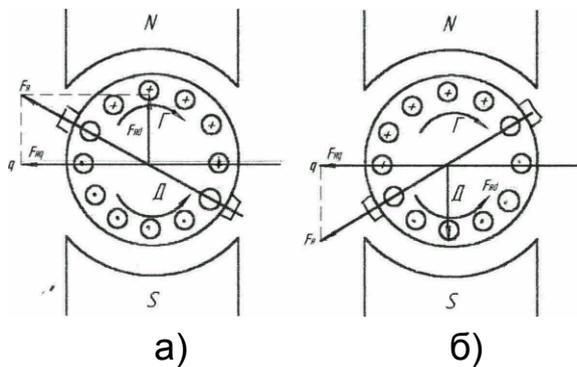


рис.4.10

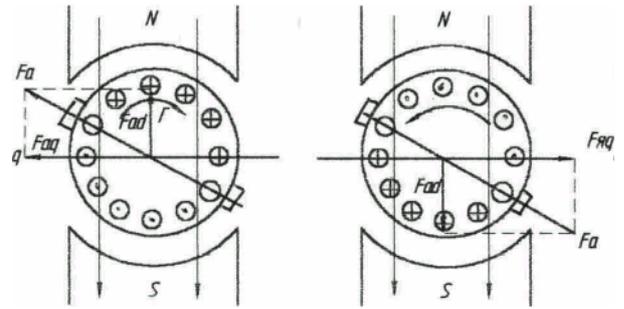


рис.4.11

Действие продольной реакции якоря  $F_{яd}$  может быть двояким и зависит от направления сдвига щеток. При работе в режиме генератора сдвиг щеток по направлению вращения якоря приводит к появлению размагничивающей продольной реакции якоря, действующей встречно потоку возбуждения (рис.4.10,а), а сдвиг щеток против направления вращения - к появлению намагничивающей продольной реакции якоря (рис.4.10,б). Для режима двигателя справедливо обратное.

Неточная установка щеток на геометрической нейтрали является причиной погрешности асимметрии вращения прецизионных электрических машин, когда величина выходного сигнала изменяется при изменении направления вращения. Для примера рассмотрим работу тахогенератора при сдвиге щеток с геометрической нейтрали (рис.4.11).

Для данного угла сдвига щеток при правом вращении машины (по часовой стрелке) продольная реакция якоря  $F_{яd}$  является размагничивающей и уменьшает магнитный поток возбуждения и, следовательно, величину ЭДС и выходного напряжения. При левом вращении машины (против часовой стрелки) продольная реакция якоря является намагничивающей и увеличивает магнитный поток и выходное напряжение. Таким образом, при сдвиге щеток с нейтрали выходное напряжение тахогенератора изменяется при изменении направления вращения. Погрешность асимметрии вращения не должна превышать 1 ... 3 %.

Аналогичная погрешность характерна и для исполнительных двигателей. Оценим приближенно величину частоты вращения из формулы ЭДС (4.3) в виде

$$n = E/c_e \Phi \quad (4.17)$$

#### 4.1.7. Классификация машин постоянного тока

##### по способу возбуждения

На рис. 4.13. показаны электрические схемы МПТ. В зависимости от способа включения обмоток возбуждения различают МПТ с независимым возбуждением (рис. 4.13, а, б) и с самовозбуждением: параллельным (рис. 4.13, в), последовательным (рис. 4.13, г) и смешанным (рис. 4.13, д).

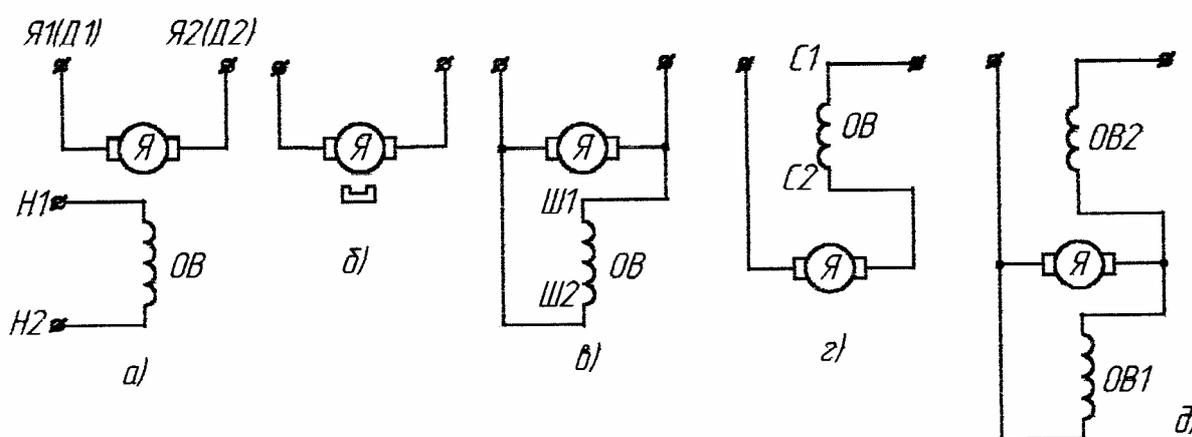


Рис. 4.13

В машинах смешанного возбуждения имеется параллельная и последовательная обмотки возбуждения, в общем случае эти обмотки могут иметь согласное и встречное включение. При согласном включении магнитные потоки обмоток складываются, при встречном включении - вычитаются.

С возбуждением от постоянных магнитов (рис. 4.13, б) обычно изготавливают машины небольшой мощности.

ГОСТ 26772 - 85 устанавливает две различные системы обозначений выводов обмоток машин постоянного тока: для машин, разработанных после введения этого ГОСТ и для ранее разработанных машин, для которых сохраняется ранее принятая система обозначений (ГОСТ 183-74).

Согласно ГОСТ 183-74 система обозначений состоит из букв русского алфавита и цифр, причем начало обмотки снабжается индексом 1, конец

- индексом 2: обмотка якоря Я1, Я2; компенсационная обмотка К1, К2;

последовательная обмотка возбуждения С1, С2; параллельная обмотка

возбуждения Ш1,Ш2; независимая обмотка возбуждения Н1,Н2, пусковая обмотка П1,П2; уравнильный провод и уравнильная обмотка У1,У2; обмотка особого назначения О1, О2.

Обмотка добавочных полюсов обычно подразделяется внутри машины на две секции и между ними включается обмотка якоря. Начало и конец этой общей якорной цепи имеют обозначение Д1, Д2. При отсутствии добавочных полюсов стоят обозначения Я1, Я2.

Обмотка параллельного возбуждения Ш1, Ш2 может быть использована в качестве обмотки независимого возбуждения. В этом случае она включается на источник постоянного тока с напряжением примерно равным номинальному напряжению машины.

Обычно на корпусе машины стрелкой указывается направление вращения якоря. Если такая стрелка отсутствует, то машина должна иметь "правое" направление вращения, т.е. по часовой стрелке если смотреть на машину со стороны присоединения её к рабочему механизму или первичному двигателю.

Обозначение выводов обмоток МПТ выполняют так, чтобы при правом направлении вращения в режиме двигателя ток во всех обмотках (за исключением размагничивающих обмоток на главных полюсах) протекал в направлении от начала 1 к концу 2.

Для вновь разрабатываемых машин установлены обозначения, состоящие из букв латинского алфавита и цифр, обмотка якоря А1,А2; обмотка добавочных полюсов В1,В2; компенсационная обмотка С1,С2; последовательная обмотка возбуждения D1,D2; параллельная обмотка возбуждения Е1, Е2; независимая обмотка возбуждения F1, F2; вспомогательная обмотка по продольной оси Н1, Н2; вспомогательная обмотка по поперечной оси J1; J2.

Для обозначения выводов обмоток машин малой мощности при диаметре корпуса не более 40 мм и при отсутствии места для буквенно-цифровых обозначений допускается цветное обозначение. Цветовое обозначение имеет вид: обмотка якоря (начало и конец соответственно) белый и белый с черным; последовательная обмотка возбуждения – красный и красный с черным, дополнительный вывод красный с желтым, вторая группа катушек последовательной обмотки возбуждения синий с черным; дополнительная обмотка синий с желтым; параллельная обмотка возбуждения зеленый и зеленый с черным; вторая группа катушек параллельной обмотки желтый и желтый с черным.

последовательная обмотка возбуждения С1,С2 ; параллельная обмотка возбуждения Ш1,Ш2; независимая обмотка возбуждения Н1,Н2; пусковая обмотка П1,П2; уравнильный провод и уравнильная обмотка У1,У2; обмотка особого назначения 01,02.

Обмотка добавочных полюсов обычно подразделяется внутри машины на две секции и между ними включается обмотка якоря. Начало и конец этой общей якорной цепи имеют обозначение Д1,Д2. При отсутствии добавочных полюсов стоят обозначения Я1,Я2.

Обмотка параллельного возбуждения Ш1,Ш2 может быть использована в качестве обмотки независимого возбуждения. В этом случае она включается на источник постоянного тока с напряжением, примерно равным номинальному напряжению машины.

Обычно на корпусе машины стрелкой указывается направление вращения якоря. Если такая стрелка отсутствует, то машина должна иметь "правое" направление вращения, т.е. по часовой стрелке, если смотреть на машину со стороны присоединения ее к рабочему механизму или первичному двигателю.

Обозначения выводов обмоток МПТ выполняют так, чтобы при правом направлении вращения в режиме двигателя ток во всех обмотках (за исключением размагничивающих обмоток на главных полюсах) протекал в направлении от начала 1 к концу 2.

Для вновь разрабатываемых машин установлены обозначения, состоящие из букв латинского алфавита и цифр: обмотка якоря А1, А2; обмотка добавочных полюсов В1,В2; компенсационная обмотка С1, С2; последовательная обмотка возбуждения D1,D2; параллельная обмотка возбуждения Е1,Е2; независимая обмотка возбуждения F1,F2; вспомогательная обмотка по продольной оси Н1.Н2; вспомогательная обмотка по поперечной оси J1, J2 .

Для обозначения выводов обмоток машин малой мощности при диаметре корпуса не более 40 мм и при отсутствии места для буквенно-цифровых обозначений допускается цветное обозначение. Цветовое обозначение имеет вид: обмотка якоря (начало и конец соответственно) белый и белый с черным; последовательная обмотка возбуждения красный и красный с черным; дополнительный вывод красный с желтым; вторая группа катушек последовательной обмотки возбуждения синий и синий с черным; дополнительная обмотка синий с желтым; параллельная обмотка возбуждения зеленый и зеленый с черным; вторая группа катушек параллельной обмотки желтый и желтый с черным.

## 4. 2. Генераторы постоянного тока

### 4.2.1. Основные уравнения

Генераторы постоянного тока (Г П Т) могут иметь следующие способы возбуждения: независимое, параллельное, последовательное или смешанное, электрические схемы которых представлены на рис. 4.13.

Генераторы последовательного возбуждения имеют специфические характеристики, отличные от других типов генераторов, и применяются только в специальных установках; в связи с ограничением области применения эти генераторы в дальнейшем не рассматриваются.

Основные формулы Г П Т были рассмотрены в п. 4.1.2.

Уравнение напряжения на зажимах генератора согласно (4.10)

$$U = E - I_{\text{я}} R.$$

ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, согласно (4.3)

$$E = C_E \Phi n$$

Связь между результирующим магнитным потоком  $\Phi$  и результирующей МДС  $F$

$$\Phi = F / R_M \quad (4.19)$$

представляет собой магнитную характеристику машины. Магнитное сопротивление  $R_M$  магнитопровода зависит от степени насыщения. При наличии насыщения магнитная характеристика является нелинейной.

Результирующая МДС  $F$  в общем случае обусловлена совместным действием МДС обмоток параллельного (независимого)  $F_{\text{ш}}$  и последовательного  $F_{\text{с}}$  возбуждения, продольной реакции якоря  $F_{\text{д}}$  и размагничивающим действием поперечной реакции якоря  $\Delta F_{\text{q}}$ . При согласном действии МДС обмоток параллельного и последовательного возбуждения можно записать

$$F = F_{\text{ш}} + F_{\text{с}} \pm F_{\text{д}} - \Delta F_{\text{q}}. \quad (4.20)$$

Знак МДС продольной реакции якоря  $F_{\text{д}}$  определяется направлением сдвига щеток с геометрической нейтрали и режимом работы машины. В большинстве случаев щетки в машине устанавливаются на геометрической нейтрали и тогда продольная реакция якоря отсутствует.

Размагничивающее действие поперечной реакции якоря  $\Delta F_{\text{q}}$  имеет место в машинах с насыщенной магнитной системой. Можно принять, что величина этой МДС пропорциональна току якоря. В микромашинах, где насыщение магнитопровода незначительно, размагничивающим действием поперечной реакции якоря  $\Delta F_{\text{q}}$  можно пренебречь.

Работа генератора характеризуется следующими основными величинами: напряжением на зажимах генератора  $U$ , током нагрузки  $I$ , током в обмотке возбуждения  $I_{\text{в}}$  и частотой вращения  $n$ . Г П Т обычно

работают при практически постоянной частоте вращения, поэтому характеристики генераторов будем рассматривать при номинальной частоте вращения  $n_H$ . В этом случае соотношение величин  $U$ ,  $I$  и  $i_B$  образуют три семейства характеристик (ГОСТ 17154-71), которые рассмотрены ниже.

#### 4.2.2. Характеристики генераторов постоянного тока

##### 4.2.2.1. Нагрузочные характеристики

Нагрузочные характеристики - это зависимость напряжения генератора  $U$  от тока возбуждения  $i_B$ :  $U = f(i_B)$  при неизменном токе нагрузки  $I = \text{const}$ . Наибольший практический интерес представляют нагрузочные характеристики при  $I = 0$  (характеристика холостого хода) и при номинальной нагрузке  $I = I_H$ .

а) характеристика холостого хода

$$E = f(i_e) \text{ при } I = 0, n = n_B.$$

Характеристика холостого хода (х.х.х.) снимается, как правило, при независимом возбуждении генератора. Она представляет собой зависимость ЭДС  $E$  на зажимах генератора от тока возбуждения  $i_B$  при отсутствии тока якоря ( $I = 0$ ) (рис. 4.14, кривая 1).

Аналитическое выражение характеристик холостого хода с учетом уравнений (4.3), (4.19) имеет вид

$$E = C_E \Phi_H n = C_E \frac{F_B}{R_\mu} n = C_E \frac{i_B W_B}{R_\mu} \quad (4.21)$$

где  $i_B$  и  $W_B$  - ток и число витков обмотки возбуждения.

С ростом тока возбуждения растет насыщение магнитной цепи и величина  $R_\mu$ , а рост ЭДС соответственно замедляется.

Микромашины обычно работают на ненасыщенном участке характеристики холостого хода.

Снятие характеристики холостого хода опытным путем проводят при монотонном уменьшении тока возбуждения от максимального значения, соответствующего  $E \approx 1,3 U_H$ , до нуля ( $i_e = 0$ ). Остаточная ЭДС  $E_{ост}$  при  $i_B = 0$  наводится потоком остаточного намагничивания из-за явления гистерезиса (остаточного магнетизма) в материале полюсов и ярма. Обычно  $E_{ост} = 2 \dots 5\% U_H$ .

Приведенную характеристику холостого хода (кривая 2) получают путем смещения оси координат на величину  $\Delta$ . Для машин мощностью менее 1 кВт, сняв одну ветвь х.х.х., меняют полярность обмотки возбуждения на обратную и монотонно увеличивая ток до  $i_{R_{max}}$ .

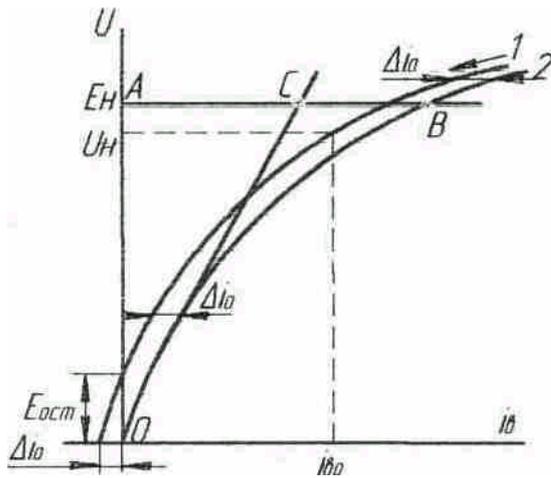


РИС. 4.14

$$K_{\mu} = \frac{AB}{AC} \text{ (рис.4.14), характеризующий}$$

степень отклонения х.х.х. от линейной зависимости. Коэффициент  $K_{\mu}$  обычно определяется для номинальной ЭДС  $E_H = U_H + I_H R_a + 2\Delta U_{щ}$ . Для большинства генераторов нормального исполнения  $R = 1,2 \dots 1,35$ .

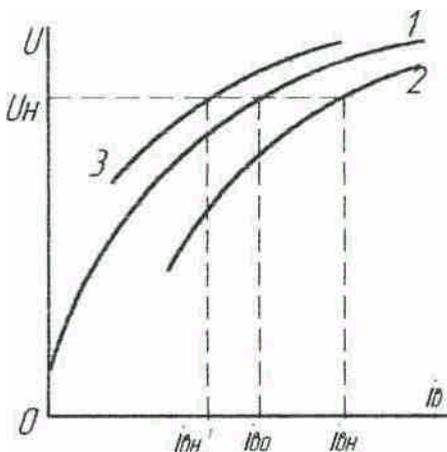
Аналогично снимают восходящую ветвь характеристики, получив полную петлю. На практике пользуются средней кривой.

По характеристике холостого хода определяется ток возбуждения  $i_B$ , соответствующий номинальному напряжению  $U_H$ .

Характеристика холостого хода позволяет определить коэффициент насыщения магнитной системы

#### б) Нагрузочные характеристики при номинальном токе

$$U = f(i_B) \text{ при } I = I_H, n = n_H$$



Нагрузочные характеристики генератора должны сниматься, как и х.х.х., при монотонном изменении тока возбуждения от большего значения к меньшему. Эти характеристики обычно снимаются при независимом и смешанном возбуждении (согласное включение обмоток). Нагрузочная характеристика генератора при параллельном возбуждении практически не

рис.4.15 отличается от аналогичной

характеристики при

независимом возбуждении. На рис. 4.15 представлены нагрузочные характеристики генератора при независимом (кривая 2) и смешанном возбуждении (кривая 3), здесь же приведена х.х.х. (кривая 1). Нагрузочная характеристика генератора независимого возбуждения смещается по отношению к характеристике холостого хода вниз на величину падения напряжения в якорной цепи  $\Delta U_{я}$  (4.9) и вправо на величину тока возбуждения, необходимого для компенсации размагничивающего действия поперечной реакции якоря  $\Delta F_{яq}$ . При

смешанном возбуждении характеристика смещается влево на величину МДС последовательной обмотки  $F_c$ . При достаточно большой величине  $F_c$  нагрузочная характеристика может располагаться левее и выше характеристики холостого хода. По нагрузочным характеристикам при  $U = U_H$  можно определить номинальные значения тока возбуждения при независимом и смешанном возбуждении генератора.

#### 4.2.2.2. Внешние характеристики

$$U = f(I) \text{ при } R_{\text{цв}} = R_{\text{вн}} \text{ и } n = n_H$$

Внешние характеристики - это зависимости напряжения генератора  $U$  от тока нагрузки  $I : U = f(I)$  при нерегулируемом токе возбуждения, т.е. при постоянном сопротивлении цепи обмотки возбуждения  $R_{\text{цв}} = \text{const}$ . Наибольший практический интерес представляет внешняя характеристика при таком  $R_{\text{цв}}$ , которое обеспечивает номинальное напряжение при номинальном токе нагрузки, т.е. при  $R_{\text{цв}} = R_{\text{вн}}$ .

Внешние характеристик генератора снимаются при независимом, параллельном и смешанном способах возбуждения. Эти характеристики должны сниматься при уменьшении тока нагрузки. Вид внешних характеристик показан на рис. 4.16.

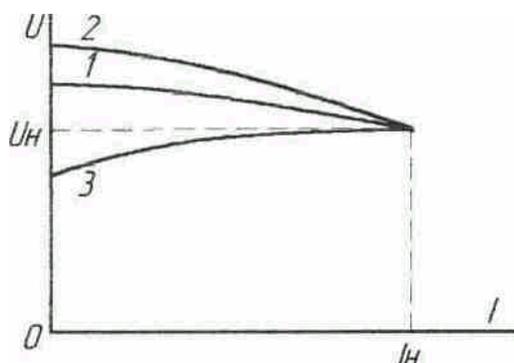


рис.4.16

При испытании генератора независимого возбуждения (кривая 1) условие  $R_{\text{цв}} = \text{const}$  приводит к условию  $i_B = i_{B_H} = \text{const}$  и с изменением тока нагрузки напряжение  $U$  изменяется из-за действия двух факторов: падения напряжения в якорной цепи  $\Delta U_{\text{я}}$  (4.9) и размагничивающего действия реакции якоря  $\Delta F_{\text{яq}}$ .

. При параллельном возбуждении ток возбуждения определяется величиной напряжения генератора и не остается постоянным. С изменением тока возбуждения изменяется величина магнитного потока, индуцируемая им ЭДС якоря и напряжение на зажимах  $U$ . Таким образом, при параллельном возбуждении действует, кроме вышеназванных факторов  $\Delta U_{\text{я}}$  и  $\Delta F_{\text{яq}}$ , третий фактор - изменение тока возбуждения  $i_B$ . Поэтому действие тока якоря на величину выходного напряжения проявляется в большей степени.

При смешанном возбуждении генератора последовательная обмотка

компенсирует перечисленные факторы. При достаточно большой МДС последовательной обмотки внешняя характеристика может иметь вид кривой 3, рис.4.16.

По внешним характеристикам можно определить изменение напряжения  $\Delta U$  при изменении нагрузки от номинальной до холостого

хода: 
$$\Delta U = \frac{U_0 - U_H}{U_H} 100\%$$

где  $U_0$  - напряжение генератора при холостом ходе.

#### 4.2.2.3. Регулировочные характеристики

$$i_B f(I) \text{ при } U = U_H \text{ и } n = n_H$$

Регулировочные характеристики - это зависимости тока возбуждения  $i_B$  от тока нагрузки  $I$ :  $i_B f(I)$  при постоянном напряжении  $U$  генератора. Наибольший интерес представляет характеристика, снятая при номинальном напряжении генератора  $U = U_H$ . Регулировочные характеристики обычно снимаются при независимом и смешанном возбуждении. При параллельном возбуждении регулировочная характеристика аналогична характеристике при независимом возбуждении. Регулировочные характеристики также, как и внешние, снимаются при уменьшении тока нагрузки от номинального до нуля. В процессе снятия характеристики ток возбуждения изменяют так, чтобы напряжение оставалось номинальным.

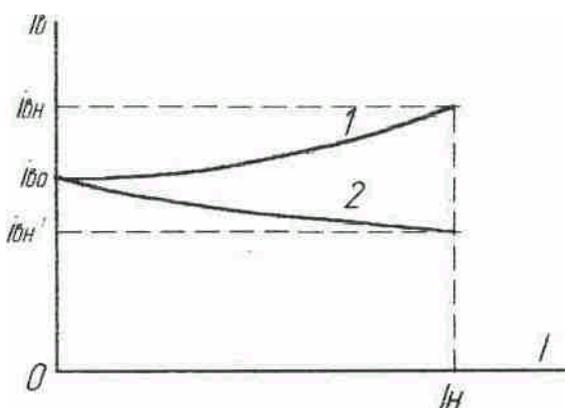


рис.4.17

Вид характеристик показан на рис.4.17. При независимом возбуждении на характеристику (кривая 1) влияют падение напряжения в якорной цепи  $\Delta U_{я}$  и размагничивающее действие поперечной реакции якоря  $\Delta F_{яq}$ .

Нелинейность характеристики зависит от степени насыщения магнитной системы генератора.

При смешанном возбуждении генератора вид характеристики (кривая 2)

зависит от величины МДС последовательной обмотки возбуждения  $F_C$ . При значительной МДС  $F_C$  ток возбуждения  $i_B$  при нагрузке может быть меньше, чем при холостом ходе.

По регулировочным характеристикам для каждого способа возбуждения определяется изменение тока возбуждения при изменении нагрузки от номинальной до нуля

$$\Delta i_B = \frac{i_{BH} - i_{B0}}{i_{B0}} 100\%$$

#### 4.2.3. Особенности генератора параллельного возбуждения

Преимущество генератора параллельного возбуждения состоит в том, что он не требует постороннего источника постоянного тока - возбудителя, так как обмотка возбуждения питается непосредственно с напряжения якоря. Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения возможно не всегда и происходит при соблюдении определенных условий:

- а) наличия остаточного магнитного потока полюсов  $\Phi_{ост} = 2 - 5\% \Phi_{я}$ ;
- б) правильного подключения концов обмотки возбуждения (правильной полярности) или правильного направления вращения, так чтобы дальнейшее увеличение тока возбуждения совпадало по направлению с первоначальным;
- в) сопротивление цепи возбуждения  $R_{цв}$  при данной частоте вращения должно быть ниже некоторого критического значения или частота вращения при данном  $R_{цв}$  должна быть выше некоторой критической величины.

Процесс самовозбуждения протекает следующим образом. Небольшая ЭДС, индуктируемая в якоре остаточным магнитным потоком  $\Phi_{ост}$ , вызывает в обмотке возбуждения малый ток  $i_B$ . При правильной полярности включения обмотки возбуждения этот ток вызывает увеличение потока полюсов и, следовательно, увеличение ЭДС, которая в свою очередь обуславливает дальнейшее увеличение  $i_B$  и т.д.

Напряжение на обмотке возбуждения

$$U_B = i_B R_B + L_B \frac{di_B}{dt}, \quad (4.22)$$

где  $L_B \frac{di_B}{dt}$  - ЭДС самоиндукции;

$L_B$  и  $R_B$  - индуктивность и сопротивление цепи возбуждения.

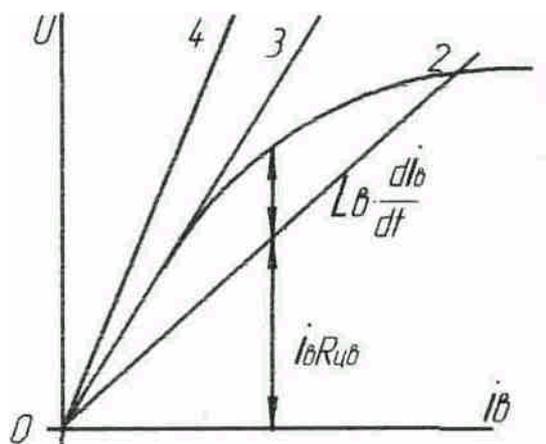


Рис.4.18

На рис. 4.18 показаны х.х.х.  $E = f(i_B)$  (кривая 1) и вольтамперная характеристика  $i_B R_{цв}$  цепи возбуждения (кривая 2). Разность их ординат составляет  $L_B \frac{di_B}{dt}$ . Если прямая 2 проходит ниже х.х.х 1, то  $L_B \frac{di_B}{dt} > 0$ , что вызывает рост тока  $i_B$ .

Процесс самовозбуждения продолжается до тех пор пока не пересекутся кривые 1 и 2,

при этом  $L_B \frac{di_B}{dt} = 0$ . Чем больше величина  $R_{цв}$ , тем больший угол наклона имеет характеристика  $i_B R_{цв}$ . При критическом значении  $R_{цв КР}$  кривая 3 имеет вид касательной к х.х.х. и процесс самовозбуждения неустойчив. При  $R_{цв} > R_{цв КР}$  получим кривую 4, которая не пересекается с х.х.х. и процесс самовозбуждения невозможен. Однако, увеличив частоту вращения и тем самым увеличив ЭДС, можно добиться самовозбуждения генератора.

#### 4.2.4. Передаточная функция

Передаточная функция представляет собой отношение выходной величины  $Y$  к входной  $X$  в их операторных изображениях по Лапласу

$$W(p) = Y(p)/X(p).$$

Рассмотрим работу ГПТ независимого возбуждения в режиме холостого хода при постоянной частоте вращения  $n$ . В этом случае выходной величиной является ЭДС  $E$ . Входной величиной является напряжение управления  $U_y$ , подаваемое на обмотку возбуждения, которая в данном случае служит обмоткой управления. Связь между ЭДС  $E$  и током управления  $i_y$  устанавливается через магнитный поток  $\Phi$  согласно (4.21).

Пренебрегая насыщением магнитной цепи и размагничивающим действием Поперечной реакции якоря, считаем, что величина магнитного потока  $\Phi$  прямо пропорциональна току управления  $i_y$ . Тогда

$$E = k_1 i_y, \quad (4.23)$$

где  $k_1$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты вращения  $n$ .

В операторной форме записи

$$E(p) = k_1 i_y(p).$$

Уравнение напряжения на зажимах обмотки управления в переходных режимах при изменении тока управления согласно (4.22)

$$U_y = i_y R_y + L_y \frac{di_y}{dt}$$

В изображении по Лапласу производная  $\frac{d}{dt}$  записывается в виде " p ".

Тогда

$$U_y(p) = i_y(p) R_y + p L_y i_y(p)$$

Передаточная функция с учетом вышеприведенных соотношений

$$K(p) = \frac{\Delta E(p)}{\Delta U(p)} = \frac{k_1}{R_y + L_y p} = \frac{k_1}{1 + T_y p} \quad (4.24)$$

Таким образом, Г П Т представляет собой усилительное инерционное звено первого порядка. Статический коэффициент усиления генератора

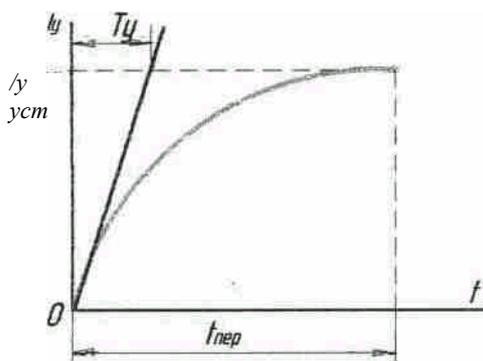
$$k_r = \frac{k_1}{R_y} \quad (4.25)$$

пропорционален частоте вращения n.

Электромагнитная постоянная времени обмотки управления  $T_y$  равна отношению индуктивности  $L_y$  к активному сопротивлению  $R_y$

$$T_y = \frac{L_y}{R_y} \quad (4.26)$$

и определяет скорость нарастания тока в обмотке,



Кривая нарастания тока  $i_y = f(t)$  (рис. 4.19) представляет собой экспоненту. Постоянная времени  $T_y$  равна отрезку, который отсекается касательной к экспоненте от линии установившегося значения тока. Время переходного процесса составляет  $t_{пер} = (3...4)T_y$  в зависимости от точности (1...5%)

рис. 4.19

достижения

установившегося

значения тока  $i_{y\text{уст}}$ .

### 4.3. Электромашинные усилители

#### 4.3.1. Общие сведения

Электромашинный усилитель (ЭМУ) представляет собой специальный генератор (обычно постоянного тока), выходная мощность  $P_{вых}$  которого во много раз превосходит входную  $P_{у}$ . Важнейшим параметром ЭМУ является коэффициент усиления по мощности

$$K_p = P_{вых} / P_{у} ,$$

равный произведению коэффициентов усиления по току и напряжению

$$K_I = I / I_{у} , \quad K_U = U_{ВЫХ} / U_{у} .$$

Усиление электрической мощности происходит за счет механической мощности приводного двигателя.

ЭМУ предназначен для работы в переходных режимах. В связи с этим предъявляются особые требования к быстродействию и перегрузочной способности ЭМУ. Перегрузочная способность характеризуется степенью возможной форсировки по току и напряжению. Степенью форсировки (коэффициентом перегрузки) называется отношение соответствующих максимальных величин к номинальным. Форсировка по току ограничена условиями коммутации (искрением на коллекторе). Для улучшения коммутации ЭМУ снабжаются добавочными полюсами и компенсационной обмоткой. Форсировка по напряжению ограничена насыщением магнитной цепи. Для повышения перегрузочной способности и коэффициента усиления ЭМУ рассчитываются на низкие электромагнитные нагрузки (магнитную индукцию и плотность тока).

На быстродействие ЭМУ большое влияние оказывает электромагнитная постоянная времени обмотки  $T$ . Обычно ЭМУ имеют несколько обмоток управления для суммирования сигналов. При этом можно осуществлять управление в зависимости от нескольких величин (например, от частоты вращения и тока якоря двигателя прокатного стана и т.п.).

Качество ЭМУ характеризуется добротностью

$$K_d = \frac{K_p}{T} .$$

В современных ЭМУ постоянная времени  $T$  обмоток составляют сотые доли секунды для маломощных ЭМУ (до 1 кВт) и десятые доли секунды для ЭМУ мощностью свыше 10 кВт, а коэффициент усиления  $K_p$  может достигать сотни тысяч.

### 4.3.2. Одноступенчатые и двухступенчатые ЭМУ

Простейшим ЭМУ является обычный генератор постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 4.13, а) с одной ступенью усиления мощности - от обмотки возбуждения (управления) к обмотке якоря. Входная электрическая мощность возбуждения (управления) значительно меньше, чем выходная мощность якорной цепи. Коэффициент усиления по мощности составляет  $K_p = 10 \dots 50$ .

Рассмотрим, каким образом можно повысить коэффициент усиления  $K_p$  такого ЭМУ. Входная мощность управления  $P_y = i_y^2 R_y$ .

Выходная мощность обмотки якоря

$$P = I^2 R_{HT} = \frac{E^2}{(R + R_{HT})^2} R_{HT} = C_E^2 \Phi^2 n^2 \frac{R_{HT}}{(R + R_{HT})^2}.$$

При согласованной нагрузке сопротивление нагрузки  $R_{HT}$  выбирается равным сопротивлению якорной цепи  $R$ :  $R_{HT} = R$ .

Магнитный поток и ток возбуждения связаны соотношением

$$\Phi = \lambda i_y,$$

где  $\lambda$  - магнитная проводимость магнитной цепи .

Тогда

$$K_p = \frac{P}{P_y} = \frac{C_E^2 \lambda^2 n^2}{R_y} \cdot \frac{1}{4R}. \quad (4.27)$$

Таким образом, для повышения  $K_p$  следует повысить частоту вращения генератора  $n$  и увеличить магнитную проводимость  $\lambda$ . Для достижения последнего машину изготавливают с равномерным воздушным зазором малой величины и ненасыщенной магнитной системой.

Уменьшение сопротивлений  $R_y$  и  $R$  также ведет к росту  $K_p$ , но при этом увеличивается постоянная времени цепи  $T = L / R$ , уменьшается быстродействие и добротность ЭМУ.

В целях повышения  $K_p$  до 50...100 применяют специальные генераторы с шихтованной магнитной системой (не только якорь, но и полюса, станина), что уменьшает влияние вихревых токов в переходных режимах работы. Для улучшения коммутации ЭМУ снабжается дополнительными полюсами, увеличенным числом пазов якоря и коллекторных пластин.

Положительные свойства одноступенчатого ЭМУ независимого возбуждения - простота конструкции, надежность в работе, невысокая стоимость. Недостатки - невысокий коэффициент усиления и сравнительно-но большая постоянная времени  $T$ .

Для увеличения  $K_p$  применяют каскадные ЭМУ, обычно двухступенчатые ЭМУ.

Двухступенчатые (двухкаскадные) усилители представляют собой каскадное соединение двух генераторов. Обмоткой управления является обмотка возбуждения первого генератора 1. Якорь генератора 1 питает обмотку возбуждения второго генератора 2, цепь якоря которого является выходной цепью, подключаемой к управляемому объекту. Обе машины располагаются в общем корпусе. Общий коэффициент усиления при этом равен произведению коэффициентов усиления отдельных ступеней и может достигать значения  $K_p = 10000$ .

#### 4.3.3. ЭМУ поперечного поля

ЭМУ поперечного поля получили широкое распространение в системах управления не только как усилители мощности, но также в качестве управляемых генераторов, возбуждателей и подвозбудителей крупных электрических машин.

Конструктивно ЭМУ поперечного поля выполняется в виде

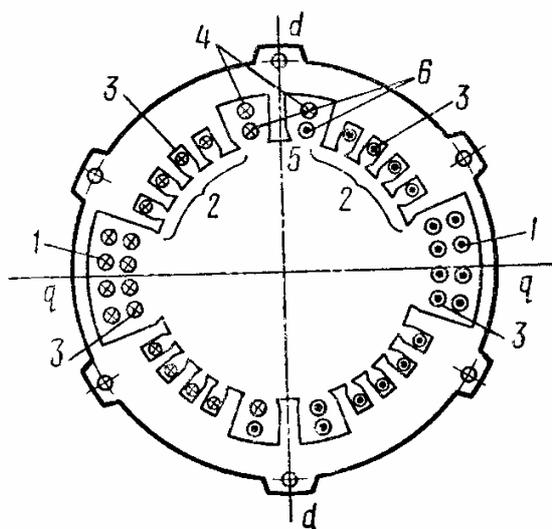


Рис. 4. 20

неявнополюсной машины с двумя полюсами (рис. 4.20) [2].

Неявнополюсной такая конструкция называется потому, что в конструктивном отношении полюса 2 на статоре выражены нечетко. Обмотки управления 1 уложены в большие пазы и создают магнитный поток, действующий по продольной оси. Для улучшения коммутации в зоне рабочих щеток по продольной оси выполняют два больших зуба, которые играют роль добавочных полюсов. В прилегающих к ним увеличенных пазах расположена обмотка добавочных полюсов 6 и поперечная подмагничивающая обмотка 4. Компенсационная обмотка 3 служит для компенсации поля якоря.

В отличие от обычного генератора эта конструкция имеет два комплекта щеток: кроме обычных поперечных щеток, имеются также продольные щетки, причем поперечные щетки замкнуты накоротко или через сопротивление небольшой величины. Приводной двигатель и ЭМУ находятся чаще всего в одном корпусе (при мощностях до 1,5 кВт).

Электрическая схема ЭМУ и диаграмма магнитных потоков показаны на рис. 4.21.

Электрическая схема ЭМУ и диаграмма магнитных потоков показаны на рис. 4.21.

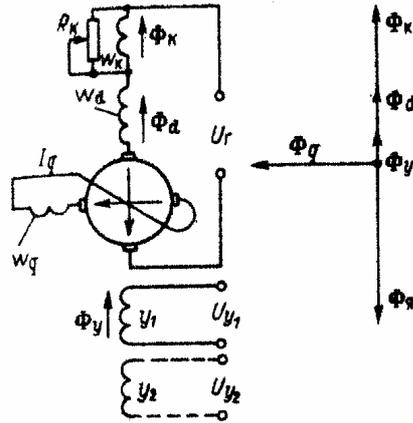


Рис. 4.21

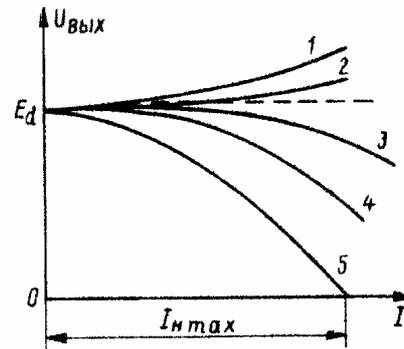


Рис.4.22

Управляющий сигнал  $I_y$ , поступая в цепь управления, создает магнитный поток  $\Phi_y$ , направленный по продольной оси генератора. При вращении якоря магнитный поток  $\Phi_y$  наводит в проводниках якоря ЭДС  $E_q$ , приложенную к поперечным щеткам. Полярность ЭДС  $E_q$  зависит от полярности управляющего сигнала и направления вращения якоря. Под действием ЭДС  $E_q$  в проводниках якоря, коммутируемых поперечными щетками, образуется весьма большой ток  $I_q$ , так как внутреннее сопротивление короткозамкнутой поперечной цепи мало. Этот ток создает магнитный поток  $\Phi_q$ , направленный вдоль поперечной оси ЭМУ. В обычных машинах поток, создаваемый полем якоря невелик, так как магнитная проводимость вдоль поперечной оси в межполюсном промежутке мала. В рассматриваемой неявнополюсной конструкции воздушный зазор по всей окружности практически одинаков и магнитная проводимость вдоль поперечной оси велика. Поэтому ток  $I_q$  создает значительный магнитный поток  $\Phi_q \gg \Phi_y$ . Поток  $\Phi_q$  наводит в проводниках вращающегося якоря ЭДС  $E_d$ , приложенную к продольным щеткам. Полярность  $E_d$  зависит только от полярности управляющего сигнала  $I_y$  и не зависит от направления вращения якоря, что в случае параллельной работы с аккумуляторной батареей является важным свойством ЭМУ.

При протекании тока нагрузки  $I_n$  по рабочей цепи обмотки якоря создается магнитный поток якоря  $\Phi_{я}$ , направленный по продольной оси навстречу потоку  $\Phi_y$  обмотки управления. При этом поток  $\Phi_{я}$  размагничивает магнитную систему, резко уменьшая суммарный магнитный поток по продольной оси. Выходное напряжение может упасть почти до нуля даже при малых токах нагрузки. Чтобы компенсировать влияние реакции якоря по продольной оси, в пазах по окружности статора размещают компенсационную обмотку (КО). Она включается последовательно в рабочую цепь нагрузки так, что

магнитодвижущая сила (МДС) компенсационной обмотки направлена встречно МДС якоря и создает встречный магнитный поток. При этом для нагруженного ЭМУ магнитный поток по продольной оси  $\Phi_d$  можно представить в виде трех составляющих (рис. 4. 21)

$$\Phi_d = \Phi_y - (\Phi_{я} - \Phi_k),$$

где  $\Phi_y$  - магнитный поток, создаваемый током управляющей обмотки;  $\Phi_{я}$  - магнитный поток продольной реакции якоря;  $\Phi_k$  - магнитный поток, создаваемый КО и обмоткой дополнительных полюсов.

Если  $\Phi_k = \Phi_{я}$ , то компенсация полная (критическая) и продольный поток ЭМУ создается только током управления. Если  $\Phi_k < \Phi_{я}$ , то в ЭМУ имеет место недокомпенсация потока  $\Phi_{я}$ , а при  $\Phi_k > \Phi_{я}$  - его перекомпенсация. В первом случае выходной сигнал ЭМУ уменьшается за счет недокомпенсации потока продольной реакции якоря, а во втором - увеличивается за счет его перекомпенсации. В связи с этим влияние КО на свойства ЭМУ можно рассматривать как влияние жесткой внутренней обратной связи: отрицательной - при недокомпенсации потока  $\Phi_{я}$  и положительной - при его перекомпенсации.

Поток продольной реакции якоря в десятки и сотни раз больше потока управления  $\Phi_y$ , поэтому небольшая неточность в расчете КО может привести к значительному изменению ЭДС  $E_d$  при изменении тока нагрузки. КО обычно выполняется с числом витков несколько большим необходимого, а регулировка степени компенсации  $K_k = \Phi_k / \Phi_{я}$  осуществляется с помощью сопротивления  $R_k$ , включенного параллельно КО (рис. 4.21). Компенсацию необходимо производить с очень большой точностью, поскольку при перекомпенсации возможно самовозбуждение ЭМУ как генератора последовательного возбуждения и потеря его управляемости, поэтому коэффициент компенсации  $K_k$  устанавливают не более 0,95.

По принципу действия ЭМУ поперечного поля аналогичен каскадному соединению двух генераторов, когда выход одного из них включается на обмотку возбуждения другого. Первому каскаду усиления соответствует сочетание обмотка управления - короткозамкнутая цепь якоря; второму каскаду: короткозамкнутая цепь - рабочая цепь якоря. Соответственно коэффициент усиления ЭМУ поперечного поля равен произведению коэффициентов усиления двух ступеней усиления.

Как видно из выражения (4. 27), коэффициент усиления быстро растет с увеличением частоты вращения (квадратичная зависимость). Поэтому ЭМУ выполняют на повышенные частоты вращения (3000... 8000 об/мин).

**Статические характеристики ЭМУ.** Свойства ЭМУ в установившемся статическом режиме, как и всякого генератора, характеризуются его внешней характеристикой  $U_{вых} = f(I)$ , которая

определяется формулой

$$U_{\text{вых}} = E_d - IR_d,$$

где  $U_{\text{вых}}$  - напряжение на выходе ЭМУ;  $E_d$  - ЭДС, действующая по продольной оси ЭМУ;  $I$  - ток нагрузки;  $R_d$  - внутреннее сопротивление ЭМУ по продольной оси, которое образуется суммой сопротивлений обмотки якоря, коммутируемой продольными щетками, переходного контакта коллектор - щетки, обмоток дополнительных полюсов и КО.

Внешние характеристики ЭМУ при различной степени компенсации показаны на рис. 4.22. Здесь даны обозначения: 1, 2 - перекомпенсация; 3 - полная компенсация; 4, 5 - недокомпенсация. При полной компенсации напряжение уменьшается за счет падения напряжения на активном сопротивлении  $R_d$ . Изменяя степень компенсации ЭМУ, можно получить желаемый вид внешней характеристики. При этом следует иметь в виду, что перекомпенсация может вызвать самовозбуждение ЭМУ и потерю управляемости. В ряде случаев для защиты генератора от перегрузки применяют ЭМУ со значительной недокомпенсацией потока  $\Phi$ , причем степень компенсации выбирают так, чтобы ток короткого замыкания  $I_{H \max}$  не превышал допустимого значения (рис. 4.22).

Важными статическими характеристиками ЭМУ являются коэффициенты усиления по мощности  $K_p$ , току  $K_i$  и напряжению  $K_U$ . Коэффициент усиления по мощности  $K_p$  может достигать больших значений (до  $10^5$ ), но чаще имеет величину порядка  $(5 \dots 10) \cdot 10^3$ . Коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  сравнительно мал и не превышает нескольких десятков. У ЭМУ малой мощности (до 0,5 кВт) он имеет значения порядка  $K_U = 2 \dots 5$ .

**Динамические характеристики ЭМУ.** Динамические свойства ЭМУ определяет передаточная функция. При выводе формулы передаточной функции ЭМУ принимаем, что магнитная система машины не насыщена и магнитный поток  $\Phi$  скомпенсирован.

Передаточная функция первой ступени усиления ЭМУ аналогична передаточной функции обычного генератора, рассмотренной в п.4.2.4.

Для обмотки управления уравнение напряжений согласно (4.22)

$$U_y = I_y R_y + L_y \frac{dI_y}{dt}.$$

Под действием тока  $I_y$  в поперечной цепи ЭМУ будет создаваться ЭДС  $E_q$ , пропорциональная току  $I_y$ , аналогично (4.23)

$$E_q = k_1 I_y,$$

где  $k_1$  - коэффициент пропорциональности.

На основании этих формул получим

$$T_y \frac{dE_q}{dt} + E_q = K_q U_y, \quad (4.28)$$

где  $K_q = K_1 / R_y$  - коэффициент усиления по напряжению первого каскада (цепь управления - поперечная цепь якоря) аналогично (4.25).

Передаточная функция первой степени усиления ЭМУ

$$K_{U1} = E_q / U_y = K_q / (T_y p + 1). \quad (4.29)$$

По аналогии с выражением (4.22) для поперечной цепи ЭМУ

$$E_q = I_q R_q + L_q \frac{dI_q}{dt}, \quad (4.30)$$

где  $I_q$ ,  $R_q$  и  $L_q$  - соответственно ток, активное сопротивление и индуктивность поперечной цепи ЭМУ.

Под действием тока  $I_q$  в продольной цепи ЭМУ будет создаваться ЭДС  $E_d$ , пропорциональная току  $I_q$ :

$$E_d = k_2 I_q, \quad (4.31)$$

где  $k_2$  - коэффициент пропорциональности.

Если к ЭМУ подключить сопротивление нагрузки  $R_{нг}$ , то на выходе усилителя напряжение равно

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_{нг}}{R_{нг} + R_d} E_d. \quad (4.32)$$

Подставляя в (4.30) выражения для тока  $I_q$  и ЭДС  $E_d$ , найденные из (4.31) и (4.32), получаем

$$T_q \cdot \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} = K_d E_q, \quad (4.33)$$

где  $T_q = L_q / R_q$  - постоянная времени поперечной цепи ЭМУ;

$K_d = (K_d R_H R_q) / (R_H + R_d) = U_{\text{вых}} / E_q$  - коэффициент усиления второго каскада (поперечная цепь - выходная цепь) ЭМУ по напряжению.

Исключая из выражений (4.29) и (4.33) промежуточную переменную  $E_q$ , получаем уравнение динамики ЭМУ, устанавливающее связь между напряжениями на входе  $U_y$  и выходе  $U_{\text{вых}}$  в виде

$$T_Y T_q \frac{d^2 U_{\text{вых}}}{dt^2} + (T_Y + T_q) \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} = K_q K_d U_y. \quad (4.34)$$

В операторной форме уравнение (4.34) запишется в виде

$$[T_Y T_q p^2 + (T_Y + T_q)p + 1] U_{\text{вых}}(p) = K_{\text{ЭМУ}} U_y(p), \quad (4.35)$$

где  $K_{\text{ЭМУ}} = K_q K_d$  - коэффициент усиления по напряжению.

На основании (4.35) найдем передаточную функцию ЭМУ:

$$W_{\text{ЭМУ}}(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{K_{\text{ЭМУ}}}{(T_Y p + 1)(T_q p + 1)}. \quad (4.36)$$

Из выражения (4.36) видно, что по своим динамическим свойствам ЭМУ представляют собой совокупность двух последовательно соединенных звеньев и, таким образом, подача на управляющую обмотку напряжения  $U_y$  вызовет изменение напряжения  $U_{\text{вых}}$  на выходе ЭМУ по апериодическому закону. Однако в реальных условиях на ЭМУ

действуют размагничивающие потоки, создаваемые вихревыми токами в стали, которые не учитывались при выводе передаточной функции (4.35), поэтому на выходе переходной процесс носит колебательный характер.

Быстродействие ЭМУ поперечного поля характеризуется двумя постоянными времени  $T_u$  и  $T_q$ , соответствующими первому и второму каскадам. Постоянная времени цепи управления  $T_u$  сравнительно мала (с учетом внутреннего сопротивления источника питания  $T_u = 0,005 \dots 0,025$  с), а постоянная времени поперечной цепи  $T_q$  значительно превосходит величину  $T_u$  ( $T_q = 0,03 \dots 0,15$  с). Поэтому основное влияние на инерционность ЭМУ оказывает  $T_q$ . Однако это влияние существенно уменьшается, если включить в схему внешнюю обратную связь (рис.4.23). В качестве обмотки обратной связи  $W_{o.c}$  используется одна из управляющих обмоток, которая включается таким образом, чтобы магнитный поток, создаваемый током обратной связи  $I_{o.c}$  был направлен навстречу магнитному потоку цепи управления  $\Phi_u$ . В результате получаем отрицательную обратную связь (ООС).

Принципиальной схеме (рис. 4.23) соответствует структурная схема, показанная на рис. 4.24.

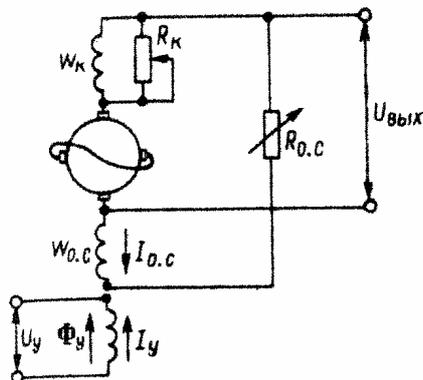


Рис. 4.23

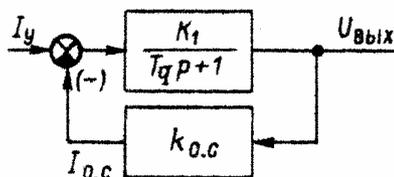


Рис. 4.24

Передаточная функция ЭМУ с учетом ООС

$$W_{ЭМУ}(p) = \frac{U_{вых}(p)}{I_y(p)} = \frac{K_э}{T_э p + 1}, \quad (4.37)$$

где  $T_э = T_q / (1 + K_1 k_{o.c})$  - постоянная времени ЭМУ после ввода обратной связи;  $K_1$  - коэффициент усиления ЭМУ, определяемый отношением  $K_1 = U_{вых} / I_y$ ;  $K_{o.c}$  - коэффициент обратной связи;  $K_э = K_1 / (1 + K_1 K_{o.c})$  - коэффициент усиления с учетом обратной связи.

Из выражения (4.37) видно, что ввод отрицательной обратной связи позволяет уменьшить в  $(1 + K_1 K_{o.c})$  постоянную времени ЭМУ. Следует однако иметь в виду, что величина коэффициента  $K_{o.c}$  не может выбираться только из условия обеспечения требуемого значения

постоянной времени  $Tэ$ . При этом необходимо учитывать также допустимую перегрузочную способность по току обмотки обратной связи, определяемую коэффициентом перегрузки  $Kп = I_{уmax} / I_{уНОМ}$ , где  $I_{уmax}, I_{уНОМ}$  - максимальный и номинальный токи в обмотке управления. Величина  $Kп$  для большинства ЭМУ не превосходит значения 5...8.

Положительными свойствами ЭМУ являются:

- возможность непосредственного подключения к ЭМУ исполнительного двигателя и изменения его скорости в широких пределах;
- малая инерционность и возможность ее уменьшения путем применения специальных схем включения ЭМУ;
- достаточно большой коэффициент усиления по мощности;
- линейная зависимость напряжения на выходе ЭМУ от тока управления;
- возможность суммирования нескольких управляющих сигналов.

Недостатки ЭМУ :

- необходимость принятия специальных мер по улучшению коммутации под продольными и поперечными щетками ЭМУ, что обусловлено большой частотой вращения якоря генератора (до 8000 об/мин);
- нестабильность работы ЭМУ при длительной его эксплуатации, проявляющаяся в различных значениях напряжения на выходе при постоянных значениях частоты вращения якоря и тока управления.

## 4.4. Тахогенераторы постоянного тока

### 4.4.1. Общие сведения

Тахогенератор (ТГ) представляет собой генератор малой мощности, выходное напряжение которого пропорционально частоте вращения вала  $\omega$ . Выходной характеристикой ТГ является зависимость

$$U = K\omega = K \frac{d\alpha}{dt},$$

где  $K$  - коэффициент пропорциональности,  $\alpha$  - угол поворота вала.

Основными требованиями, предъявляемыми к ТГ, являются:

- линейность выходной характеристики;
- высокая крутизна выходной характеристики;
- малое влияние на выходную характеристику внешней нагрузки и температуры окружающей среды;
- симметрия выходного напряжения при изменении направления вращения вала;
- эксплуатационная надежность;
- минимум пульсаций выходного напряжения;
- малые габариты и масса.

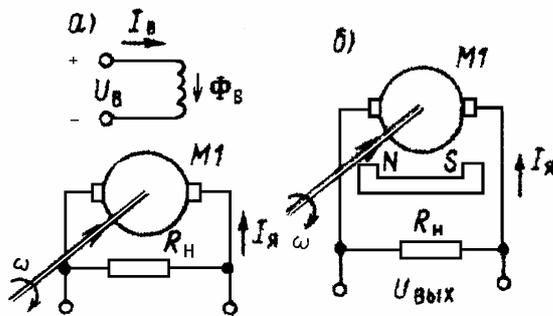
Степень этих требований зависит от назначения ТГ. По назначений ТГ можно разделить на три группы:

- ТГ, предназначенные для измерения частоты вращения вала исполнительного органа. Эти ТГ должны иметь достаточно высокую линейность (отклонение 0,5 - 1%) и стабильность характеристики.
- ТГ, предназначенные для регулирования частоты вращения вала в качестве корректирующего звена, т.е. для осуществления обратной связи по частоте вращения. При этом выходное напряжение ТГ сравнивается с эталонным и разность этих напряжений подается в цепь управления двигателя. Особенностью требований, предъявляемых к таким ТГ, является высокая крутизна выходной характеристики.
- ТГ, предназначенные для выполнения функции интегрирования и дифференцирования в счетно-решающих устройствах. К этим ТГ предъявляются весьма жесткие требования надежности в работе, стабильности и линейности характеристики (отклонение 0,05 - 0,1%).

ТГ изготавливаются постоянного и переменного тока (синхронные и асинхронные). ТГ постоянного тока имеют более высокие энергетические показатели, высокую крутизну и линейность выходной характеристики.

#### 4.4.2. Выходная характеристика

Тахогенераторы постоянного тока (ТГПТ) выполняются с независимым электромагнитным (внешним) возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов (рис.4.25). ТГПТ с



внешним возбуждением имеют большую крутизну выходной характеристики, чем со встроенным магнитом. Конструкция ТГПТ принципиально не отличается от обычной конструкции машин постоянного тока

Рис. 4.25.

Выходное напряжение ТГПТ согласно (4.8)

$$U = E - IR_{я} - 2\Delta U_{щ}.$$

Величина тока нагрузки

$$I = \frac{U}{R_{HT}}.$$

Результирующий магнитный поток  $\Phi$  при нагрузке определяется суммой постоянного потока возбуждения  $\Phi_B$  и потока реакции якоря  $\Phi_{я}$ , который пропорционален току якоря и при расположении щеток на геометрической нейтрали уменьшает поток возбуждения. Таким образом:

$$\Phi = \Phi_B - \Phi_{ря} = K_1 - K_2 I,$$

где  $K_1$  и  $K_2$  - постоянные коэффициенты.

ЭДС машины

$$E = C_E \Phi \omega = C_1 \omega - C_2 \frac{U}{R_{HT}}, \quad (4.38)$$

где  $C_1$  - коэффициент пропорциональности между ЭДС и частотой вращения при холостом ходе;  $C_2$  - коэффициент, учитывающий связь потока реакции якоря и тока якоря.

Подставляя (4.38) в уравнение напряжений (4.8), получим после преобразований формулу выходной характеристики:

$$U = \frac{C_1 \cdot \omega - \Delta U_{щ}}{1 + \frac{C_2 \cdot \omega + R_{я}}{R_{HT}}}. \quad (4.39)$$

Здесь  $\Delta U_{\text{щ}}$  - падение напряжения в щеточном контакте;  
 $R_{\text{я}}$  - сопротивление цепи якоря,  $R_{\text{нг}}$  - сопротивление нагрузки.

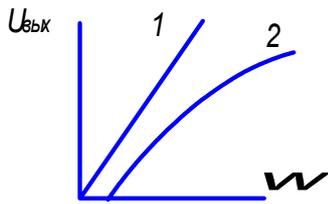


Рис.4.26

В режиме холостого хода ( $R_{\text{нг}} \rightarrow \infty$ ) выходная характеристика  $E = C_E \Phi \omega$  представляет собой прямолинейную зависимость 1 (рис.4.26) с максимальной крутизной характеристики

$$K_{\text{макс}} = C_1 = C_E \Phi_B. \quad (4.40)$$

При включении нагрузки выходная характеристика 2 (рис. 4.26) приобретает ряд погрешностей, которые рассмотрены ниже.

Однако пренебрегая реакцией якоря ( $C_2 = 0$ ) и падением напряжения в щеточном контакте ( $\Delta U_{\text{щ}} = 0$ ) в формуле (4.39) и принимая в идеальном случае выходную характеристику линейной, можно определить ее крутизну в виде

$$K = \frac{C_1}{1 + \frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{нг}}}}. \quad (4.41)$$

Крутизна идеальной характеристики зависит от величины нагрузки  $R_{\text{нг}}$ . С уменьшением  $R_{\text{нг}}$  крутизна характеристики падает.

Современные ТГПТ обладают крутизной характеристики в диапазоне 6...260 мВ·с<sup>-1</sup>, это значительно превышает крутизну выходной характеристики тахогенераторов переменного тока.

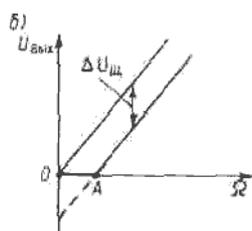
#### 4.4.3. Погрешности ТГПТ

*Погрешность нелинейности.* При включении нагрузки в цепь якоря не только уменьшается крутизна (4.41) выходной характеристики 2 (рис.4.26), но и искажается её линейная зависимость. Согласно (4.39) это искажение вызвано наличием частоты вращения  $\omega$  в знаменателе. Физический смысл этого явления объясняется влиянием реакции якоря. Степень отклонения характеристики от линейной зависимости называется погрешностью нелинейности. Обычно она выражается в относительных единицах в долях номинального напряжения и составляет 0,5...3%. Нелинейность выходной характеристики ТГ может вызвать автоколебания системы. Погрешность нелинейности можно уменьшить, ослабив влияние реакции якоря. Для этого ТГ выполняют с ненасыщенной магнитной системой, увеличивают сопротивление нагрузки  $R_{\text{нг}}$ , либо ограничивают рабочий диапазон скоростей (обычно до 0,5 номинального значения  $\omega_H$ ).

**Погрешность нечувствительности.** Эта погрешность вызвана падением напряжения в щеточном контакте  $\Delta U_{щ}$ . При  $\omega = 0$  выходная характеристика согласно (4.39) смещается на отрезок

$$U_{щ} = \frac{-\Delta U_{щ}}{1 + \frac{R_{я}}{R_{нг}}},$$

что вызывает постоянную ошибку ТГПТ (обычно на величину 0,2...0,5 В)



и появление зоны нечувствительности на величину  $\Delta \Omega$  (рис. 4.26 и 4.27). Величину  $\Delta \Omega$  можно определить из выражения (4.39), приравняв  $U = 0$  и пренебрегая реакцией якоря. Тогда

$$\Delta \Omega = \frac{\Delta U_{щ}}{C_1}.$$

Рис. 4.27

Для уменьшения этой погрешности стремятся уменьшить переходное сопротивление щеточного контакта  $\Delta U_{щ}$ , применяя щетки с малым сопротивлением (меднографитовые и серебрянографитовые), а в прецизионных ТГ - проволочные щетки с серебряными или золотыми напайками.

**Погрешность несимметрии выходного напряжения.** Эта погрешность обусловлена неточностью установки щеток на геометрической нейтрали, либо смещением их в процессе эксплуатации. Смещение щеток вызывает появление продольной реакции якоря, действие которой зависит от направления вращения якоря, что было рассмотрено выше в п.4.1.5.2 (рис.4.11).

Погрешность несимметрии вычисляется в виде:

$$A = \frac{U_{ПР} - U_{ЛЕВ}}{\frac{1}{2}(U_{ПР} + U_{ЛЕВ})},$$

где  $U_{ПР}$ ,  $U_{ЛЕВ}$  - напряжения соответственно при правом и левом направлениях вращения якоря.

Погрешность несимметрии не должна превышать 1...3 %.

**Температурная погрешность.** Одним из недостатков ТГПТ является высокая температурная погрешность, обусловленная нагревом, в первую очередь, обмотки возбуждения, что вызывает увеличение её сопротивления. Изменение сопротивления обмотки возбуждения  $R_B$  приводит даже при постоянном напряжении возбуждения  $U_B$  к изменению тока возбуждения  $i_B = U_B / R_B$ , магнитного потока  $\Phi$  и, следовательно, величины ЭДС  $E$  и выходного напряжения. Эти зависимости можно представить в виде:

$$t^{\circ} \rightarrow R_B \rightarrow i_B \rightarrow \Phi \rightarrow E.$$

Влияние температуры весьма значительно. Так, при изменении температуры с 15 °С до 75 °С величина  $R_B$  изменяется на 24 %.

Для уменьшения температурной погрешности применяются следующие способы.

- Включение в цепь обмотки возбуждения добавочного терморезистора  $R_{\theta}$ , изготовленного из манганина или константана, величина которого не зависит от температуры. Так как величина тока возбуждения должна оставаться постоянной и определяться величиной  $R_{\theta}$ , то величина  $R_{\theta}$  выбирается на порядок больше, чем  $R_B$ , что приводит к необходимости увеличения мощности источника питания обмотки возбуждения.

- Работа в насыщенной зоне магнитной характеристики  $\Phi=f(F)$  (рис. 4.9). При достаточно сильном насыщении магнитной цепи даже значительное изменение тока возбуждения мало влияет на величину магнитного потока. Данный способ помогает также уменьшить результат колебаний питающего напряжения. Недостаток этого способа - возрастание влияния реакции якоря при больших токах нагрузки.

- Установка магнитных шунтов между полюсными наконечниками. Магнитные шунты изготавливаются из специальных сплавов, магнитная проводимость которых уменьшается при увеличении температуры. Это приводит к тому, что магнитный поток шунтов  $\Phi_{\sigma}$  уменьшается и часть его пойдет по пути основного потока  $\Phi_0$ , сохраняя его величину неизменной.

Недостаток данного способа - сложность конструкции.

Температурная погрешность ТГ с возбуждением от постоянных магнитов, не имеющих обмотки возбуждения, возникает только за счет изменения сопротивления обмотки якоря, и весьма незначительна.

*Пульсации выходного напряжения.* Наличие пульсаций выходного напряжения является серьезным недостатком ТГПТ. Причины пульсаций обусловлены наличием зубцов якоря и коллекторных пластин, а также неравномерностью воздушного зазора. Пульсации выходного напряжения вызывают радиопомехи. Для их устранения ТГПТ снабжаются электрическими фильтрами, либо специальными экранами.

Хороший эффект дает конструкция ТГПТ с полым якорем. Такие ТГПТ серийно не выпускаются, по этому в качестве ТГПТ используется исполнительный двигатель серии ДПР. В этой конструкции обмотка укрепляется непосредственно на якоре, не имеющем пазов, поэтому

зубцовые пульсации отсутствуют; реакция якоря незначительна, а коммутация очень хорошая. Все это обеспечивает хорошие характеристики такого ТГПТ.

#### 4.4.4. Передаточная функция ТГПТ

Динамические характеристики определяет передаточная функция, представляющая собой отношение выходной величины к входной, записанных в операторной форме .

Для ТГ выходной величиной является напряжение на нагрузке  $U$ , а в качестве входной величины будем рассматривать угол поворота якоря  $\alpha$  . Таким образом необходимо определить:

$$W(p) = \frac{U(p)}{\alpha(p)} .$$

Рассматривается переходный процесс, когда величина тока якоря изменяется во времени. В этом случае уравнение напряжения примет вид

$$U = e - iR_{я} - L_{я} \frac{di}{dt} . \quad (4.42)$$

Величина ЭДС, если пренебречь реакцией якоря, будет определяться уравнением

$$e = k_{эм} \cdot \omega = k_{эм} \frac{d\alpha}{dt} , \quad (4.43)$$

где угловая частота вращения

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} \quad (4.44)$$

Электромагнитный коэффициент с учётом (4.47)

$$K_{эм} = C_M \Phi = (pN / 2\pi a) \Phi . \quad (4.45)$$

Величина тока

$$i = \frac{U}{R_{нГ}} .$$

С учетом этого получаем (4.42) в виде

$$U = K_{эм} \frac{d\alpha}{dt} - \frac{U}{R_{нГ}} R_{я} - L_{я} \frac{1}{R_{нГ}} \frac{dU}{dt} .$$

Объединяя однородные члены уравнения, содержащие  $U$  , получим коэффициент при  $U$

$$1 + \frac{R_{я}}{R_{нГ}} = \frac{R_{нГ} + R_{я}}{R_{нГ}} .$$

Разделим все члены уравнения на этот коэффициент, тогда:

$$U = \frac{K_{\text{ЭМ}} R_{\text{НГ}}}{R_{\text{НГ}} + R_{\text{Я}}} \frac{d\alpha}{dt} - \frac{L_{\text{Я}}}{R_{\text{НГ}} + R_{\text{Я}}} \frac{dU}{dt}.$$

Переходя к операторной форме записи, имеем

$$U(p) + T_{\text{Я}} p U(p) = K_{\text{У}} p \alpha(p),$$

где  $T_{\text{Я}} = \frac{L_{\text{Я}}}{R_{\text{НГ}} + R_{\text{Я}}}$  - постоянная времени якорной цепи,

$K_{\text{У}} = \frac{K_{\text{ЭМ}} R_{\text{НГ}}}{R_{\text{НГ}} + R_{\text{Я}}}$  - коэффициент усиления.

Таким образом,

$$W(p) = \frac{U(p)}{\alpha(p)} = \frac{K_{\text{У}} p}{1 + T_{\text{Я}} p}.$$

Полученное уравнение - это уравнение дифференцирующего инерционного звена. Однако поскольку постоянная  $T_{\text{Я}}$  достаточно мала

$$T_{\text{Я}} \approx 0,001 \dots 0,003 \text{ с} \quad (4.46)$$

и ею можно пренебречь, то ТГПТ представляет собой идеальное дифференцирующее звено с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{U(p)}{\alpha(p)} \approx K_{\text{У}} p.$$

Если определить передаточную функцию по частоте вращения в виде

$$W(p) = \frac{U(p)}{\omega(p)},$$

то с учетом (4.44) в операторной форме записи

$$\omega(p) = p \alpha(p),$$

получим

$$W(p) = \frac{U(p)}{\omega(p)} = K_{\text{У}}.$$

В этом случае ТГПТ представляет собой усилительное звено.

## 4.5. Двигатели постоянного тока

### 4.5.1. Основные уравнения

Классификация двигателей постоянного тока (ДПТ) по способу возбуждения аналогична классификации генераторов ГПТ (п.4.1.7).

В отличие от генераторного режима работы, когда с обмотки якоря снимается выходное напряжение, в режиме двигателя к обмотке якоря подводится напряжение питания. Взаимодействие тока проводников якоря с магнитным полем обмотки возбуждения создает силу Ампера, выталкивающую проводники якоря из магнитного поля, т.е. возникает электромагнитный момент, под действием которого якорь приходит во вращение. Таким образом, электрический двигатель преобразует потребляемую электрическую энергию в механическую энергию вращения. Подробнее принцип работы двигателя рассмотрен в п. 4.1.3.

Электромагнитный момент двигателя (4.12)

$$M = C_M \Phi I_{я},$$

При работе с установившейся частотой вращения электромагнитный момент уравновешивается статическим моментом на валу

$$M_C = M_0 + M_2, \quad (4.47)$$

где  $M_0$  - момент холостого хода, обусловленный собственными потерями двигателя;  $M_2$  - полезный момент (момент нагрузки на валу).

При работе в динамическом режиме с изменением частоты вращения на вал двигателя действует статический  $M_C$  и динамический  $M_\delta$  моменты

$$M = M_C \pm M_\delta. \quad (4.48)$$

Динамический момент пропорционален моменту инерции  $J$  вращающихся частей двигателя и приводного механизма

$$M_\delta = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (4.49)$$

Динамический момент при ускорении вращения положителен, а при замедлении - отрицателен. В установившемся режиме  $M_\delta = 0$  и  $M = M_C$ .

Уравнения ЭДС (4.3), (4.5) и напряжения на зажимах двигателя (4.14)

$$E = C_E \Phi n = C_M \Phi \omega, \quad U = E + IR$$

позволяют получить уравнение скоростной характеристики

$$n = \frac{U - IR}{C_E \Phi} . \quad (4.50)$$

Подставив в (4.50) выражение тока из формулы момента (4.12), получим формулу механической характеристики

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{MR}{C_E C_M \Phi^2} . \quad (4.51)$$

#### 4.5.2. Устойчивость работы

При устойчивой работе двигатель способен вернуться к исходному режиму при малых возмущениях его работы, когда эти возмущения прекратятся (например, кратковременные изменения напряжения сети или момента нагрузки). Условием устойчивости работы является падающая зависимость механической характеристики (4.51), т.е. при увеличении момента нагрузки на валу частота вращения двигателя уменьшается (рис.4.28). Математически критерий устойчивости работы двигателя описывается условием  $(dM / dn) < 0$ , либо  $(dn / dM) < 0$ .

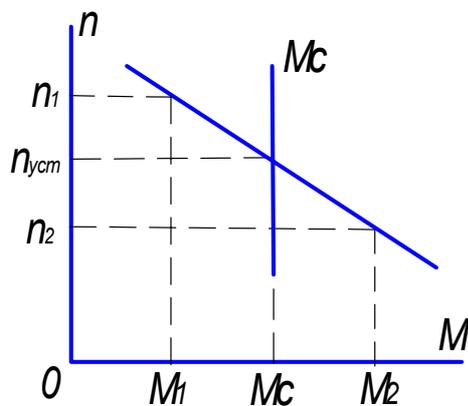


рис. 4.28

Пусть рабочая точка двигателя соответствует  $n_{уст}$  и  $M=M_C$ . При увеличении частоты вращения до значения  $n_1$  (под действием случайного фактора) момент двигателя уменьшается, причем  $M_1 < M_C$ . На валу возникает отрицательный динамический момент, что вызывает замедление вращения двигателя до  $n_{уст}$ . И наоборот, при уменьшении частоты

вращения до  $n_2$  появляется

положительный динамический момент

(т.к.  $M_2 > M_C$ ) и частота вращения двигателя возрастает до  $n_{уст}$ . Таким образом, двигатель в определенных пределах обладает способностью к саморегулировке. При возрастающей механической характеристике двигатель будет работать неустойчиво, поэтому такие двигатели не проектируют.

Отметим, что вид характеристики  $M_C=f(n)$  определяется свойствами приводного механизма. Например, у металлорежущих станков

$$M_C \approx \text{const}, \text{ а у вентиляторов и насосов } M_C \approx n^2.$$

### 4.5.3. Пуск двигателя

В момент включения двигатель неподвижен ( $n = 0$ ), следовательно противо-ЭДС обмотки якоря  $E = 0$ . Согласно (4.14) величина начального пускового тока

$$I_n = \frac{U}{R}.$$

Обычно сопротивление якорной цепи  $R$  незначительно, поэтому начальный пусковой ток может составить  $I_n \approx (10...50)I_H$ . Такое превышение тока недопустимо, так как оно может вызвать «круговой огонь» на коллекторе, а также резкое снижение напряжения питающей сети, если ее мощность невелика. Для ограничения пускового тока обычно в цепь якоря включается пусковой реостат. В начальный момент пуска реостат должен быть полностью введен. По мере разгона двигателя реостат выводят, переключая его со ступени на ступень. По окончании пуска его полностью выводят, так как пусковые реостаты обычно рассчитаны на кратковременный режим работы. Сопротивление пускового реостата  $R_{ПР}$  выбирают из условия:

$$I_{II} = \frac{U}{R + R_{ПР}} = (1,4...1,7)I_H.$$

Во время пуска поток возбуждения должен быть максимален для обеспечения большего пускового момента (4.12).

При питании двигателя от регулируемого источника пуск производят при пониженном напряжении (например, система генератор - двигатель).

Двигатели малой мощности (до 0,5...1кВт) допускают прямой пуск от сети без пускового реостата. Эти двигатели имеют значительное сопротивление обмотки якоря и величина пускового тока составляет  $I_{II} = (3... 5) I_H$ . Вследствие малой массы двигателя имеют небольшое время пуска (не более 1...2с), поэтому такое превышение тока для них неопасно.

### 4.5.4. Способы регулирования частоты вращения

Частоту вращения согласно (4.50) можно регулировать следующими способами :

- а) напряжением  $U$ , подводимым к электродвигателю;
- б) добавочным сопротивлением  $R_d$ , включенным в цепь якоря, тогда

$$n = \frac{U - I(R + R_d)}{C_E \Phi}; \quad (4.52)$$

- в) магнитным потоком  $\Phi$  с помощью тока возбуждения, вводя реостат в цепь возбуждения.

Регулирование частоты вращения изменением напряжения питания  $U$  осуществляется уменьшением напряжения от номинального значения, что приводит к уменьшению частоты вращения (регулировка «вниз»). Этот способ регулирования позволяет сохранить высокое значение КПД, однако при этом требуется специальный регулируемый источник питания (например, система генератор - двигатель).

Регулирование частоты вращения с помощью добавочного сопротивления  $R_d$  в цепи якоря также является регулировкой «вниз». Механические характеристики при наличии  $R_d$  называются искусственными. Из-за больших потерь мощности в регулировочном реостате и значительном уменьшении КПД этот способ находит ограниченное применение. Отметим, что при достаточно большой величине сопротивления  $R_d$  и изменении направления вращения двигателя под действием внешней силы (например, спуск груза) против направления действия электромагнитного момента двигателя, механическая характеристика пересекает ось абс-цисс, а двигатель переходит в режим электромагнитного тормоза, потребляя электрическую энергию из сети и механическую энергию с вала.

Регулирование частоты вращения уменьшением магнитного потока осуществляется посредством реостата в цепи возбуждения и дает увеличение частоты вращения (регулировка «вверх»).

Механические характеристики для этих способов регулирования рассмотрены ниже.

Широкое применение находит импульсное регулирование частоты вращения, рассмотренное в п.4.6.5.

Изменение направления вращения якоря (реверсирование) согласно (4.50) может быть получено изменением полярности напряжения и тока якоря (переключение полярности обмотки якоря) или изменением направления магнитного потока (переключение полярности обмотки возбуждения). При одновременном переключении обеих обмоток направление вращения двигателя остается неизменным.

Изменение полярности напряжения, приложенного к якорю, применяют при необходимости быстрого торможения двигателя (торможение противовключением). Для ограничения толчков тока и момента в якорную цепь вводят добавочное сопротивление. Если после остановки двигатель не отключить, то он начнет вращаться в другую сторону (реверс).

Рекуперативное торможение двигателя осуществляют путем отдачи электрической энергии в сеть. Для этого необходимо, чтобы ЭДС маши-

ны превосходит напряжение сети, этого можно достичь увеличением тока возбуждения или частоты вращения. Ток якоря и момент изменяют свое направление, машина переходит в режим генератора. Двигатель последовательного возбуждения нельзя непосредственно перевести в генераторный режим. Процесс рекуперации более просто осуществить для двигателя смешанного возбуждения.

Для двигателя независимого возбуждения применяют динамическое торможение, когда якорь отключается от сети и замыкается на нагрузочное сопротивление. Машина переходит в генераторный режим.

#### 4.5.5. Характеристики двигателей

Основными характеристиками двигателя являются рабочие и механические характеристики. Рабочие характеристики (ГОСТ 17154-71) - это зависимости частоты вращения  $n$ , тока якоря  $I_{я}$ , полезного момента  $M_2$  подводимой мощности  $P_1$  и КПД  $\eta$  от полезной мощности двигателя  $P_2$ . При этом напряжение на двигателе  $U$  и ток в параллельной обмотке возбуждения  $i_B$  должны быть равны номинальным значениям, а добавочное сопротивление  $R_{\partial}$  в цепи якоря должно отсутствовать. Таким образом, рабочие характеристики представляют собой зависимости  $n, I_{я}, M_2, P_1, \eta = f(P_2)$  при  $U = U_N, i_B = i_{BN}, R_{\partial} = 0$ .

Механические характеристики (ГОСТ 17154 -71) - это зависимость  $n = f(M_2)$  при  $U = const, i_B = const, R_{\partial} = const$ . Механическая характеристика, соответствующая условиям рабочей характеристики ( $U = U_N, i_B = i_{BN}, R_{\partial} = 0$ ), называется естественной.

В режиме холостого хода, когда  $P_2 = 0$ , двигатель потребляет из сети мощность  $P_{10}$ , идущую на покрытие потерь на возбуждение, механических и в стали. Потерями в обмотках якорной цепи в режиме холостого хода можно пренебречь. Перечисленные потери с увеличением полезной мощности двигателя  $P_2$  будут оставаться практически неизменными и называются постоянными потерями. С ростом полезной мощности  $P_2$  потребляемая мощность  $P_1$  растет быстрее за счет потерь в обмотках якорной цепи, которые зависят от квадрата тока якоря и называются переменными потерями. Таким же образом будет меняться ток якоря  $I_{я}$ . Этим же объясняется и характер кривой КПД. Максимальное значение КПД соответствует такой нагрузке двигателя, когда переменные потери будут равны постоянным. Изменение момента  $M_2$  определяется формулой  $M_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2 \cdot 60}{2\pi n}$ . Так как с увеличением мощности

$P_2$  частота вращения незначительно уменьшается, то  $M_2$  растет несколько быстрее, чем  $P_2$ .

**Двигатель параллельного возбуждения.** Серийные двигатели параллельного возбуждения снабжаются слабой обмоткой последовательного возбуждения, называемой стабилизирующей (рис.4.13,д). Число витков этой обмотки выбирается так, чтобы компенсировать размагничивающее действие поперечной реакции якоря. В таком двигателе при изменении нагрузки магнитный поток остается практически постоянным.

Механические характеристики двигателя показаны на рис.4.29. Естественная характеристика обозначена цифрой 1. Частота вращения (4.50, 4.51) двигателя с ростом нагрузки уменьшается. Однако это изменение незначительно, т.к. величина сопротивления  $R$  якорной цепи мала.

Отношение  $\Delta n = \frac{n_0 - n_H}{n_H}$  определяет номинальное изменение частоты

вращения двигателя при изменении его нагрузки от номинальной до нуля (ГОСТ 183-74). Для двигателя параллельного возбуждения нормального исполнения  $\Delta n$  не превышает 10%. Такая механическая характеристика называется «жесткой».

Двигатель независимого возбуждения имеет такие же характеристики.

Регулирование частоты вращения двигателя возможно всеми тремя способами, описанными выше.

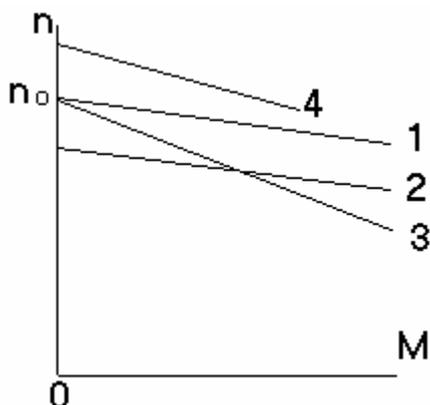


Рис.4.29

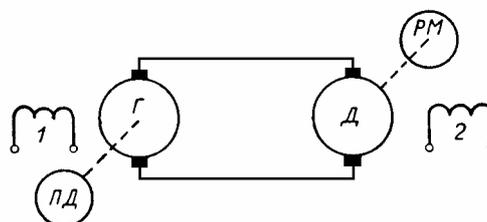


Рис.4.30

Для двигателей средней и большой мощности широкое применение находит система «генератор-двигатель» (Г-Д), позволяющая изменять напряжение питания двигателя путем подключения к специальному генератору постоянного тока (рис.4.30). При уменьшении напряжения механическая характеристика 2 (рис.4.29) идет ниже естественной.

При включении добавочного сопротивления  $R_d$  в цепь якоря характеристика 3 согласно (4.52) увеличивает свой наклон.

При уменьшении тока возбуждения с помощью реостата в цепи возбуждения частота вращения двигателя возрастает (характеристика 4). Зависимость частоты вращения от тока возбуждения имеет вид гипер-

болы. При малых значениях тока возбуждения, а тем более при обрыве цепи возбуждения ( $I_v = 0$ ), частота вращения резко увеличивается, что может привести к «разносу» двигателя и его механическому разрушению.

Двигатели параллельного и независимого возбуждения благодаря линейности и жесткости механических характеристик, также возможности плавного регулирования частоты вращения в широких пределах получили распространение как в силовом электроприводе (для привода механизмов и станков), так и в схемах автоматики.

**Двигатель последовательного возбуждения.** В этих двигателях обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря (рис.4.13,г) и ток возбуждения двигателя равен току якоря  $I_v = I_я$ , что придает двигателям особые свойства. При небольших нагрузках, когда магнитная цепь машины ненасыщена ( $\Phi \equiv I_я$ ), электромагнитный момент пропорционален квадрату тока якоря:

$$M = C_M \Phi I_я = C_M' I_я^2. \quad (4.53)$$

С увеличением нагрузки магнитная цепь машины насыщается и пропорциональность между потоком  $\Phi$  и током  $I_{я}$  нарушается. При значительном насыщении поток практически постоянен. Зависимость электромагнитного момента  $M$  от тока якоря  $I_{я}$  в начальной части (когда нет насыщения) имеет форму параболы, а в области больших нагрузок переходит в прямую (рис.4.31).

Зависимость частоты вращения  $n$  от тока якоря  $I_{я}$  (скоростная характеристика) определяется выражением  $n = (U - I_{я}\Sigma r)/(C_E \Phi)$ .

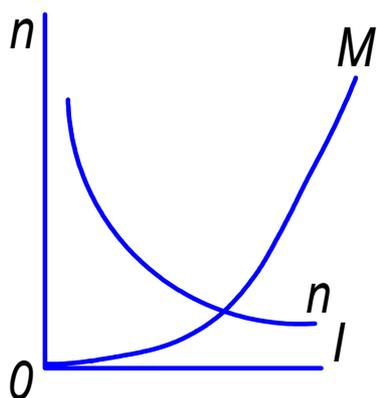


Рис.4.31

В области небольших нагрузок, когда магнитная система машины ненасыщена и  $\Phi \propto I_{я}$  эта характеристика имеет вид гиперболы; с увеличением нагрузки растет насыщение и характеристика становится более полой (рис. 4.31). Следует обратить внимание на недопустимость работы двигателя последовательного возбуждения в режиме холостого хода или с нагрузкой менее 25% от номинальной, так как при этом магнитный поток

слишком мал и частота вращения достигает чрезмерно больших значений, что ведет к «разносу» двигателя. Исключение составляют двигатели малых мощностей (до 100 Вт), которые могут работать в режиме холостого хода, так как мощность механических потерь этих двигателей при больших частотах вращения соизмерима с их номинальной мощностью.

Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения  $n = f(M)$  при  $U = const$  имеет вид гиперболы (рис.4.34, кривая 3) аналогично скоростной характеристике  $n = f(I_{я})$ .

Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения возможно изменением напряжения питания  $U$ , включением добавочного сопротивления в цепь якоря  $R_{доб}$  и изменением величины магнитного потока  $\Phi$ . Первые два способа регулирования производятся также, как и в двигателе параллельного возбуждения.

При введении добавочного сопротивления  $R_{доб}$  в цепь якоря механическая характеристика смещается в область меньших частот вращения.

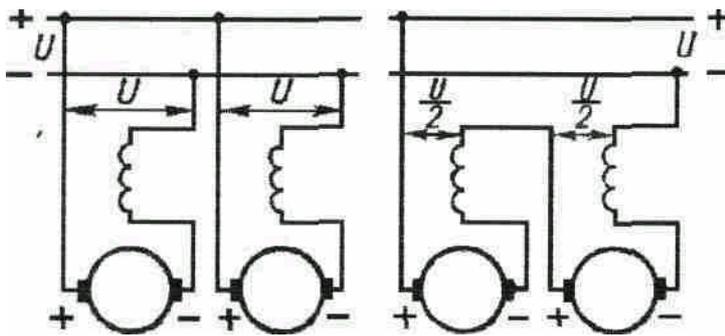


Рис. 4.32

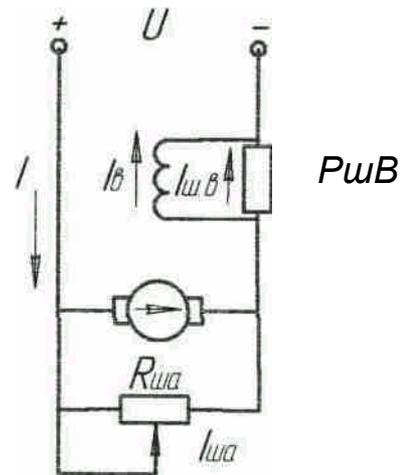


Рис.4.33

В транспортных установках, где на каждой ведущей оси устанавливается отдельный двигатель, регулирование частоты вращения изменением напряжения питания осуществляется путем переключения двигателей с параллельного включения в сеть на последовательное (рис.4.32).

При регулировании частоты вращения изменением магнитного потока  $\Phi$  возможны два случая (рис.4.33). В первом случае реостат  $R_{шв}$  включается параллельно обмотке возбуждения, что вызывает уменьшение тока возбуждения  $I_B = I_{Я} - I_{шв}$  и увеличение частоты вращения. Во втором случае реостат  $R_{шя}$  включается параллельно обмотке якоря, что сопровождается увеличением тока возбуждения  $I_B = I_{Я} + I_{шя}$  и снижением частоты вращения. Однако значительные потери в реостате  $R_{шя}$  делают этот способ неэкономичным, что ограничивает его применение.

Способность двигателей последовательного возбуждения развивать большой электромагнитный момент, пропорциональный квадрату тока нагрузки, обеспечивает этим двигателям хорошие пусковые свойства - большой пусковой момент при сравнительно малом токе. Благодаря хорошим пусковым свойствам и мягкой механической характеристике с глубоким изменением скорости, эти двигатели широко применяются на транспорте.

**Двигатель смешанного возбуждения** . Двигатель имеет две обмотки возбуждения: последовательную и параллельную (рис.4.13,д). При встречном включении обмоток магнитный поток с увеличением нагрузки будет уменьшаться, что приведет к возрастанию частоты

вращения (4.50) и работа двигателя будет неустойчивой, поэтому встречное включение обмоток не применяется. При согласном включении обмоток механическая характеристика 2 (рис.4.34) двигателя смешанного возбуждения более мягкая, чем двигателя параллельного возбуждения 1, чем но более жесткая, чем двигателя последовательного возбуждения 3. Такие двигатели применяются для привода компрессо-

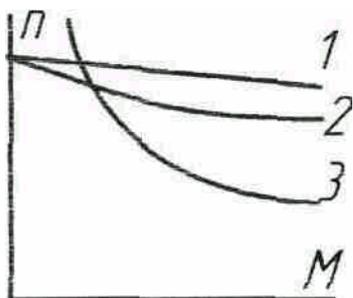


Рис.4.34

ров, строгальных станков, печатных машин, прокатных станов, подъемников и т.д.

#### 4.5 6 Универсальный коллекторный двигатель

Универсальные коллекторные двигатели могут работать как от постоянного, так и от переменного тока. Они находят широкое применение в устройствах автоматики и в бытовых электроприборах. Коллекторные двигатели переменного тока в принципе отличаются от двигателей постоянного тока лишь тем, что их магнитную систему, включая станину и полюса, делают шихтованной из листовой электротехнической стали. Это необходимо для уменьшения магнитных потерь, так как магнитный поток возбуждения является переменным (изменяется с частотой сети). Электромагнитный вращающий момент в коллекторном двигателе переменного тока создается также, как в двигателе постоянного тока, за счет взаимодействия тока якоря  $I_{я}$  с магнитным потоком возбуждения  $\Phi$

$$M = C_m I_{я} \Phi.$$

Однако здесь и ток якоря, и магнитный поток изменяются с частотой сети, причем поток несколько отстает по фазе от тока на угол  $\gamma$  (рис.4.36,а) за счет потерь в стали

$$i = I_{\max} \sin \omega t, \quad \Phi = \Phi_{\max} \sin(\omega t - \gamma).$$

Подставив выражения  $i$  и  $\Phi$  в уравнение момента и преобразовав его, получим

$$M = \frac{C_m}{2} I_{\max} \Phi_{\max} \cos \gamma - \frac{C_m}{2} I_{\max} \Phi_{\max} \sin(2\omega t - \gamma)$$

или  $M = M_{const} + M_{var}.$

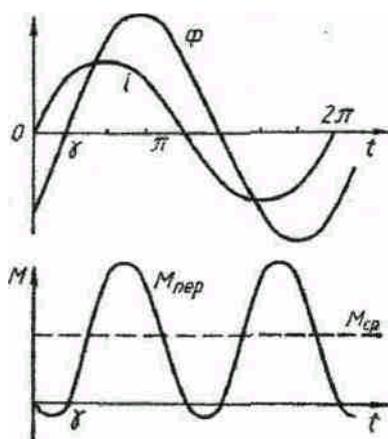


Рис.4.35

Таким образом, вращающий момент коллекторного двигателя переменного тока имеет две составляющие момента (рис.4.36,б) : постоянную (не зависящую от времени t)

$$M_{const} = 0,5C_m I_{max} \cos \gamma = M_{CP} \quad (4.54)$$

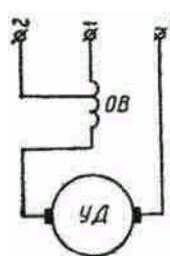
и переменную (изменяющуюся с удвоенной частотой сети)

$$M_{var} = -0,5C_m I_{max} \Phi_{max} \sin(2\omega t - \gamma). \quad (4.55)$$

Анализ зависимости  $M = f(t)$  показывает также, что в течение периода величина момента не

остаётся постоянной. Однако пульсации момента не нарушают работу двигателя, так как частота пульсации велика.

Фазовый сдвиг  $\gamma$  является причиной появления в течение каждого периода некоторого отрицательного значения электромагнитного момента.



Для уменьшения фазового сдвига  $\gamma$  коллекторные двигатели переменного тока выполняют с последовательным возбуждением (рис.4.36). При этом ток якоря является также и током возбуждения, что обеспечивает малую величину фазового сдвига  $\gamma$  между током  $i$  и потоком  $\Phi$ . Рабочие свойства двигателя аналогичны двигателю постоянного тока

Рис. 4.36 последовательного возбуждения.

Для того, чтобы получить примерно одинаковые частоты вращения на постоянном и на переменном токе, обмотку возбуждения выполняют с ответвлениями: при работе электродвигателя от сети постоянного тока обмотка возбуждения используется полностью, а при работе от сети переменного тока - лишь частично (рис.4. 36).

Недостатками универсального коллекторного двигателя являются: искрение на щетках, радиопомехи, повышенный шум, невысокая надежность. Однако универсальные коллекторные двигатели по сравнению с двигателями переменного тока позволяют получить гораздо большую частоту вращения: до 10 000 об/мин и более при частоте сети 50 Гц, тогда как двигатели переменного тока будут иметь наибольшую частоту вращения около 3000 об/мин.

## 4.6. Исполнительные двигатели постоянного тока

### 4.6.1. Общие сведения

В устройствах автоматики широко применяются управляемые электрические двигатели небольшой мощности. Такие двигатели обычно называются исполнительными. В настоящее время в качестве исполнительных двигателей наибольшее распространение находят либо двухфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым или полым ротором, либо двигатели постоянного тока с независимым электромагнитным возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов. Исполнительные двигатели постоянного тока (ИДПТ) имеют ряд преимуществ: высокую линейность характеристик, простоту управления, хорошую энергетiku, меньшие массу и габариты. Основным недостатком ИДПТ является наличие щеточно-коллекторного узла, что снижает надежности работы, усложняет эксплуатацию, ограничивает область применения (например во взрыво- и пожароопасных средах) и др.

К исполнительным двигателям предъявляются более жесткие требования, чем к двигателям общепромышленного применения, что объясняется спецификой их работы в схемах автоматики, например частыми переходными режимами работы (пуск, останов, регулирование скорости).

Основными требованиями являются:

надежность работы; отсутствие самохода, т.е. самоторможение двигателя при снятии сигнала управления; линейность регулировочных и механических характеристик; широкий диапазон регулирования частоты вращения; устойчивость работы; малая мощность управления; высокое быстродействие (малоинерционность), т.е. минимальное время останова или разгона ротора; большой пусковой момент; малое напряжение трогания; малые габариты и масса и др.

Одним из главных требований является высокое быстродействие исполнительного двигателя. Основной величиной, характеризующей быстродействие, является электромеханическая постоянная времени, определяющая время разгона и останова двигателя,

$$T_{MEK} = \frac{J \omega_0}{M_{II}} \quad (4.55)$$

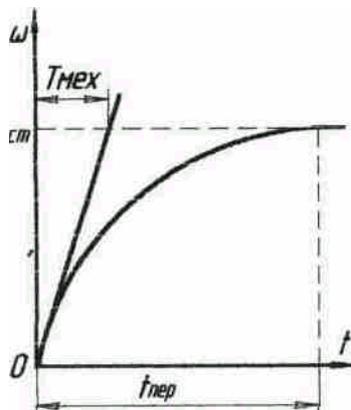
где  $\omega_0$  - частота вращения холостого хода (рад/с);  $M_{II}$  - пусковой момент (Нм);  $J$  - суммарный момент инерции ротора двигателя  $J_p$  и приводного механизма ( $\text{кгм}^2$ ).

Момент инерции ротора

$$J = M_p D^2 / 4 \quad (4.56)$$

где  $M_p$  - масса ротора (кг);  $D$  - диаметр ротора (м).

Повышению быстродействия двигателя и уменьшению  $T_{мех}$  способствуют увеличение пускового момента, уменьшение массы и наружного диаметра ротора, уменьшение номинальной частоты вращения. Стремление уменьшить инерционность ротора породило целый ряд конструктивных модификаций исполнительных двигателя, некоторые из которых рассмотрены в 4.6.8.



На рис.4.37 показан график переходного процесса при пуске двигателя. Графически электромеханическая постоянная времени  $T_{мех}$  определяется как отрезок, отсекаемый касательной от установившегося значения скорости. Время переходного процесса, в зависимости от точности приближения

частоты вращения к установившемуся значению, составляет  $t_{пер} = (3...4)T_{мех}$ .

Рис.4.37

составляет  $t_{пер} = (3...4)T_{мех}$ .

#### 4.6.2. Система относительных единиц

Основные уравнения ЭДС, момента, напряжения на зажимах якоря, частоты вращения, механической характеристики двигателя постоянного тока были рассмотрены в п.4.5 и приводятся ниже:

$$E = C_E \Phi \omega = C_M \Phi I, \quad M = C_M \Phi I, \quad U = E + IR,$$

$$n = \frac{U - IR}{C_E \Phi}, \quad n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{MR}{C_E C_M \Phi^2}$$

Эти уравнения позволяют сделать важные упрощения при управлении двигателями: напряжение питания задает частоту вращения, а ток якоря определяется моментом нагрузки на валу. Следует отметить, что частота вращения двигателя уменьшается с увеличением момента нагрузки, что является необходимым условием устойчивости его работы (п.4.5.2).

Для сравнения между собой двигателей различных типов удобно использовать систему относительных единиц. Базисные значения величин определяются при номинальных напряжениях на обмотках. За базисные значения принимаются: номинальные напряжения обмоток, частота вращения идеального холостого хода (при  $M=0$ )

$$n_{OH} = U_H / C_E \Phi_H, \tag{4.57}$$

номинальный пусковой момент

$$M_{пн} = C_M \Phi_H I_{пн} \tag{4.58}$$

где пусковой ток

$$I_{пн} = U_H / R_{я} \tag{4.59}$$

Относительные значения частоты вращения и момента

$$v = n / n_{OH} \quad m = M / M_{пн}. \tag{4.60}$$

Коэффициент сигнала управления

$$\alpha = U / U_H. \quad (4.61)$$

Разделим уравнение частоты вращения на базисное значение  $n_{OH}$  (4.57)

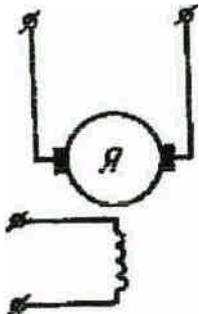
$$\frac{n}{n_{OH}} = \frac{UC_E \Phi_H}{C_E \Phi U_H} - \frac{MR \cdot C_E \Phi}{C_E C_M \Phi^2 U_H} \quad (4.62)$$

Тогда основное уравнение двигателя примет вид

$$v = \frac{U}{U_H} \cdot \frac{\Phi_H}{\Phi} - m \frac{\Phi_H^2}{\Phi^2} \quad (4.63)$$

### 4.6.3. Якорное управление

Рассмотрим исполнительный двигатель постоянного тока (ИДПТ) с независимым электромагнитным возбуждением (рис.4.38). Двигатель имеет два входа: обмотка якоря и обмотка полюсов. В зависимости от того, на какую из обмоток подается сигнал управления  $U_y$ , различают два способа управления: якорное и полюсное. Вторая обмотка обычно находится постоянно под номинальным напряжением.



При якорном управлении сигнал управления подается на обмотку якоря  $U = U_y$ . На обмотке полюсов напряжение постоянно и равно номинальному  $U_H = U_{пн}$ , поэтому магнитный поток, пренебрегая реакцией якоря, можно считать постоянным, равным номинальному  $\Phi = \Phi_H$ . В этом случае частота вращения (4.50)

$$n = \frac{U}{C_E \Phi_H} - \frac{MR}{C_E C_M \Phi_H^2}$$

Рис.4 38

изменяется прямопропорционально напряжению управления  $U$ . С увеличением момента нагрузки частота вращения уменьшается. Уравнение в относительных единицах (4.63) имеет вид

$$v = \alpha - m \quad (4.64)$$

или  $m = \alpha - v \quad (4.65)$

Уравнение (4.65) определяет вид механических характеристик  $m = f(v)$

при постоянном коэффициенте сигнала  $\alpha$ , а уравнение (4.64) - вид

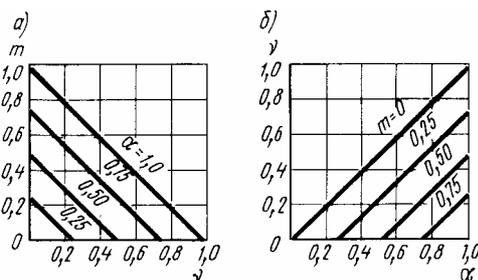


Рис.4. 39

регулирующих характеристик  $v = f(\alpha)$  при постоянном моменте  $m$ . Следует отметить, что момент двигателя согласно (4.47) уравнивается суммой моментов холостого хода  $m_0$  и нагрузки  $m_2$ . Механические и регулировочные характеристики при якорном управлении (рис.4.39) линейны и не меняют своей

крутизны. Это обстоятельство приводит к тому, что быстродействие

двигателя остается постоянным при изменении сигнала управления. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Частота вращения холостого хода при  $m_0 = 0$  с учетом (4.64)  $\nu = \alpha$

$$\omega_0 = \nu \omega_{OH} = \alpha \omega_{OH}.$$

Пусковой момент при  $\nu = 0$  с учетом (4.65)  $m = \alpha$

$$M_{II} = m M_{III} = \alpha M_{III}.$$

Отсюда следует, что постоянная времени (4.55)  $T_{MEK} = \frac{J \omega_0}{M_{II}} = \frac{j \alpha \omega_{OH}}{M_{III}}$

не зависит от коэффициента сигнала управления  $\alpha$  и остается постоянной величиной.

#### 4.6.4. Полюсное управление

При полюсном управлении сигнал управления подается на обмотку полюсов  $U_{II} = U_y$ , на обмотке якоря напряжение постоянно и равно номинальному  $U = U_H$ . Основным достоинством полюсного управления является малая потребляемая мощность управления, так как ток полюсной обмотки в 5...10 раз меньше тока якоря.

Коэффициент сигнала при полюсном управлении определяет собой отношение магнитных потоков

$$\alpha_{II} = \frac{U_{II}}{U_{III}} = \frac{\Phi}{\Phi_{II}}$$

Тогда (4.63) примет вид  $\nu = \frac{1}{\alpha_{II}} - \frac{m}{\alpha_{II}^2} = \frac{\alpha_{II} - m}{\alpha_{II}^2}$ . (4.66)

Отсюда  $m = \alpha_{II}(1 - \alpha_{II}\nu)$  (4.67)

Вид механических (4.67) и регулировочных (4.66) характеристик представлен на рис.4.40

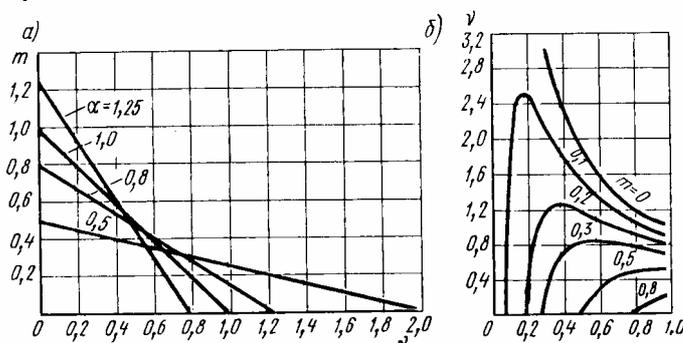


Рис. 4.40

Механические характеристики при полюсном управлении линейны, но с уменьшением напряжения управления меняют крутизну, поэтому быстродействие двигателя резко падает. Действительно, частота вращения холостого хода при  $m_0 = 0$  с учетом (4.66)

$$\omega_0 = v \omega_{OG} = \frac{1}{\alpha_{II}} \omega_{OH}$$

Пусковой момент при  $v = 0$  с учетом (4.67)

$$M_{II} = m M_{III} = \alpha_{II} M_{III}$$

Постоянная времени (4.55)

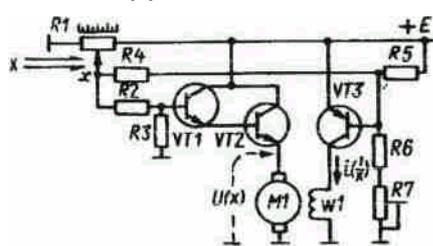
$$T_{MEK} = \frac{J \omega_0}{M_{II}} = \frac{J \omega_{OH}}{\alpha_{II}^2 M_{III}}$$

Таким образом, электромеханическая постоянная времени обратно пропорциональна квадрату сигнала полюсного управления, например при уменьшении сигнала в два раза постоянная  $T_{MEK}$  увеличивается, а быстродействие соответственно уменьшается в четыре раза.

Регулировочные характеристики при полюсном управлении нелинейны, при малых моментах неоднозначны, при малых сигналах управления двигатель может иметь самоход, достигая резкого увеличения частоты вращения свыше допустимых по прочности машины значений. При малых сигналах управления и наличии нагрузки на валу двигатель не вращается (начальный участок регулировочных характеристик), в то время как по якорной цепи протекают значительные токи, способные перегреть обмотку якоря. Кроме того, начальная часть характеристики при малых сигналах управления является зоной неустойчивой работы, так как случайное увеличение нагрузки может привести к остановке двигателя. Таким образом, начальная зона (до максимума данной характеристики) практически недопустима для нормальной эксплуатации двигателя. Только при значительной величине нагрузки (свыше  $0.5 M_{III}$ ) эти явления исчезают и двигатель можно использовать для работы при полюсном управлении.

Отметим, что при больших магнитных потоках, когда наступает достаточное насыщение магнитопровода, регулирование пропадает и частота вращения более не изменяется.

Указанные особенности полюсного управления (управления по возбуждению) приводят к его крайне редкому самостоятельному применению, но его используют в сочетании с якорным управлением, что позволяет расширить пределы регулирования частоты вращения с 7...10 до 20...50. На рис.4.41 дан пример подобной схемы



комбинированного широкодиапазонного управления маломощным ИДПТ. В этой схеме при увеличении сигнала за счет перемещения вправо движка  $R1$  увеличивается напряжение питания якоря, снимаемое с эмиттерного повторителя  $VT1$ ,

$VT2$  (якорное управление).

Рис.4.41

Одновременно уменьшается ток обмотки

возбуждения (полюсное управление), питаемой от транзистора VT3. Ток возбуждения никогда не падает до нуля благодаря цепочке с подстроечным резистором R7, с помощью которого устанавливается минимальное значение коллекторного тока VT3  $i(1/x)$ .

#### 4.6.5 Импульсное управление

Для многих устройств необходимо поддерживать постоянной частоту вращения двигателей при определенных изменениях нагрузки на валу. Регуляторы частоты вращения, применяемые при якорном или полюсном управлении, вызывают значительные потери энергии (особенно при якорном управлении), поэтому регулятор выбирают со значительным резервом мощности. При импульсном управлении удается резко снизить требования к мощности элементов схемы.

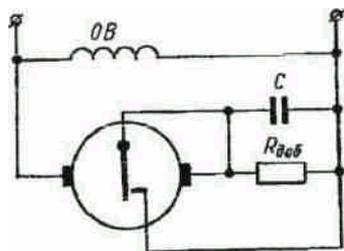


Рис.4.42

Примером импульсного управления двигателем может служить схема с периодическим включением и выключением добавочного сопротивления в цепи якоря с помощью реле или встроенного центробежного регулятора (рис.4.42). Если скорость его превысит заданную, то контакт регулятора размыкается и в цепь якоря вводится добавочное сопротивление.

Частота вращения снижается, центробежная сила, действующая на подвижный контакт, уменьшается, контакт регулятора закорачивает добавочное сопротивление. Процесс повторяется непрерывно во время работы двигателя, частота вращения которого колеблется возле заданного значения. Недостатками центробежного регулятора являются: малый срок службы, ограниченный износом контактов, работающих в вибрационном режиме, значительные радиопомехи, невысокая точность - отклонения составляют 2.. 4 %. Регуляторы на основе контактных переключателей в виде реле, герконов, вращающихся коммутаторов не обеспечивают нужной надежности и ресурсов работы.

Существуют высокоточные системы импульсного управления на логических микросхемах, где в качестве бесконтактных силовых ключей используются мощные транзисторы и тиристоры с большим сроком службы. Особенно удобны для импульсного управления бесщеточные двигатели постоянного тока, схема которых уже включает необходимые бесконтактные импульсные коммутаторы. В качестве датчика скорости применяют миниатюрный тахогенератор переменного тока. Сигнал датчика поступает на вход регулятора, включенного в якорную цепь двигателя. На якорь подается импульсы напряжения регулируемой ширины. При изменении ширины импульсов и скважности  $s$ , изменяется среднее напряжение на якоре, что обеспечивает поддержание заданной скорости. При использовании систем с полупроводниковым стабилизатором недопустимо изменение

полярности питающего напряжения, так как это выведет из строя регулятор (пробой триодов).

#### *4.6.6. Пуск и реверсирование нерегулируемых двигателей постоянного тока*

подавляющее большинство исполнительных двигателей устройств автоматики управляется релейными схемами, где не предусмотрена регулирование частоты вращения. Такие схемы предназначены для пуска, остановки и реверса двигателя. Переходные процессы сопряжены со значительными перегрузками по току и мощности в цепях питания и устройств их коммутации. Обычно они должны иметь запас мощности, рассчитанный на десятикратную перегрузку в течение 2...5 с. Если подобный резерв нереализуем, то в схеме должны быть предусмотрены средства временного ограничения токов, несмотря на то, что это приведет к увеличению времени переходного процесса. В таких схемах обычно применяется токовое реле, которое вводит токоограничивающий балластный резистор в цепь якоря. Подобные схемы используют обычно в двигателях мощностью свыше 100... 150 Вт, когда резерв мощности источника не выгоден по массогабаритным требованиям.

Схемы пуска, остановки и реверсирования имеют разную структуру в зависимости от того, какой тип возбуждения имеет двигатель. На рис. 4.43,а,б показаны схемы для двигателей соответственно независимого и последовательного возбуждения, причем последовательная обмотка разделена на две части для осуществления реверса двигателя.

На рис.4.43,а использованы кнопки с самовозвратом, поэтому функции запоминания введенных сигналов управления выполняют реле K1 и K2, благодаря контактам самоблокировки K1.1 и K2.1, взаимной деблокировки K2.2 и K1.2. Подачу питания в двигатель обеспечивают силовоточные контакты K1.3 и K2.3 в контуре двигателя. Ими же в выключенном состоянии якорь двигателя замыкается накоротко, что приводит к электромагнитному торможению и улучшает динамику двигателя. Непременным условием реверсирования является неизменность направления тока возбуждения в обмотке  $w_1$  при изменении направления тока якоря. Чтобы обеспечить выполнение этого условия, обмотка возбуждения питается через диодный выпрямитель на VD3 и VD4.

В современной схемотехнике контактные элементы заменяют тиристорными устройствами. На рис.4.43,б изображена такая схема с тремя тиристорами, образующими триггер с тремя устойчивыми состояниями: "выключено", "вправо", "влево". Конденсаторные связи C1, C2, C3 обеспечивают выключение ранее проводящего тиристора при включении одной из трех кнопок SB1 ....SB3

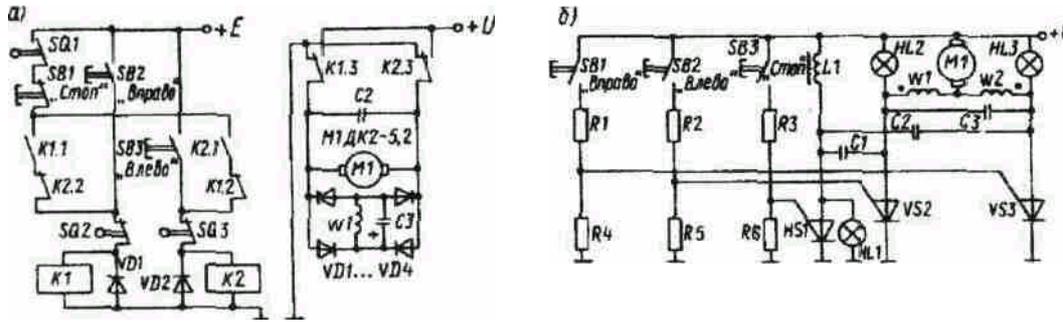


Рис.4.43

#### 4.6.7. Передаточная функция двигателя постоянного тока

Рассмотрим якорное управление ИДПТ (рис.4.38). Реакцией якоря пренебрегаем

Уравнение напряжения (4.42) для обмотки якоря в переходном режиме

$$U_y = e - iR_y - L_y \frac{di}{dt}$$

Уравнения ЭДС якоря (4.43)

$$e = k_{ЭМ} \cdot \omega$$

и вращающего момента

$$M_{ДВ} = k_{ЭМ} I_y \tag{4.68}$$

где электромагнитный коэффициент (4.45)

$$k_{ЭМ} = C_M \Phi = (pN / 2\pi a) \Phi$$

Уравнение моментов согласно (4.48) и (4.49)

$$J(d\omega / dt) = M_{ДВ} - M_c$$

где J - момент инерции вращающихся частей, приведенный к валу двигателя; M<sub>c</sub> - момент сопротивления на валу (4.47).

Если рассматривать пуск двигателя на холостом ходу при M<sub>c</sub>= 0, то

$$J(d\omega / dt) = k_{ЭМ} I_y \tag{4.69}$$

Подставив в (4.42) ток I из (4.69) и ЭДС из (4.43) получим

$$T_{МЭХ} T_y \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_{МЭХ} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U_y}{k_{ЭМ}}$$

где  $T_{МЭХ} = \frac{RJ}{k_{ЭМ}^2}$  - электромеханическая постоянная времени;

$T_y = \frac{L_y}{R}$  - электромагнитная постоянная времени якоря.

В операторном виде уравнение (4.70) будет иметь вид

$$(T_{МЭХ} T_y p^2 + T_{МЭХ} p + 1) \omega(p) = \frac{U_y(p)}{k_{ЭМ}}$$

Передаточная функция двигателя с независимым возбуждением

$$W_{дв}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{\gamma}(p)} = \frac{k_{дв}}{T_{мех}T_{я}p^2 + T_{мех}p + 1}$$

где  $k_{дв} = 1/\kappa_{эм}$ , рад/(В·с) - коэффициент передачи двигателя.

Поскольку индуктивность обмотки якоря невелика, то постоянная времени якорной цепи достаточно мала (4.46) и ею можно пренебречь. Таким образом, при якорном управлении двигатель может быть представлен апериодическим звеном первого порядка

$$W_{дв}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{\gamma}(p)} = \frac{k_{дв}}{T_{мех}p + 1}$$

Если регулируемой величиной является угол поворота двигателя

$\alpha = \int_0^T \omega dt$ , то передаточная функция двигателя будет иметь вид

$$W_{дв}(p) = \frac{\alpha(p)}{U_{\gamma}(p)} = \frac{k_{дв}}{p(T_{мех}p + 1)}$$

При полюсном управлении электромагнитная постоянная времени  $T_{п}$  полюсной обмотки управления по величине сравнима с электромеханической постоянной времени  $T_{мех}$  и постоянную  $T_{п}$  необходимо учитывать, поэтому при полюсном управлении двигатель следует рассматривать как апериодическое звено второго порядка.

Для практических расчетов часто приходится определять параметры передаточной функции двигателя по паспортным данным или каталогам, в которых не всегда имеются сведения об индуктивности якорной обмотки или о электромагнитной постоянной времени. В этом случае индуктивность обмотки якоря можно определить по формуле [ ]

$$L_{я} \approx \frac{30U_{н}c_{\nu}}{\pi p n_{н} I_{н}}$$

где  $U_{н}$  - номинальное напряжение;  $n_{н}$  - номинальная частота вращения (об/мин);  $I_{н}$  - номинальный ток якоря;  $c_{\nu}$  - эмпирический коэффициент, равный 0,4 или 0,1 соответственно для машин при отсутствии или при наличии компенсационной обмотки.

Электромеханическая постоянная времени [ ]

$$T_{мех} = \frac{J_p R \omega_{н}^2}{(U_{н} - I_{н} R)^2} \quad \text{или} \quad T_{мех} = \frac{J_p R I_{н}^2 \omega_{н}^2}{P_{н}^2}$$

где  $J_p$  - момент инерции ротора (кг м<sup>2</sup>);  $R$  - сопротивление якоря;  $\omega_{н}$  - номинальная угловая скорость (рад/с);  $P_{н}$  - номинальная мощность (Вт).

Момент инерции ротора  $J_p = \frac{MD^2}{4}$ . Электромагнитный коэффициент

(4.45) можно определить по паспортным данным  $k_{ЭМ} = \frac{U_H - I_H R}{\omega_H}$ .

Коэффициент передачи  $k_{ДВ} = 1/k_{ЭМ}$  и постоянная времени  $T_{МЭХ} = \frac{J_p R}{k_{ЭМ}^2}$ .

#### 4.6.8. Конструктивные модификации исполнительных двигателей постоянного тока

Исполнительные двигатели с электромагнитным возбуждением (серия СЛ) по конструкции представляют обычную машину постоянного тока. Особенностью их конструкции является ненасыщенная магнитная система, поэтому реакция якоря практически не влияет на их рабочие характеристики и ею вполне можно пренебречь. Эти двигатели могут иметь шихтованные не только якорь, но станину и полюса, что необходимо из-за частой работы в переходных режимах.

При проектировании исполнительных двигателей стремятся обеспечить минимальный момент инерции ротора  $J_p = GD^2/4$  и максимальное быстродействие двигателя. Для уменьшения инерционности двигатель выполняют с уменьшенным диаметром  $D$  и увеличенной длиной якоря, а для повышения пускового момента увеличивают магнитную индукцию в воздушном зазоре.

Электромеханическая постоянная времени двигателей серии СЛ составляет  $T_{мех} = 0,02 \dots 0,1$  с.

Двигатели серии ДПМ и ДПУ имеют возбуждение от постоянных магнитов, выполненных из сплавов типа "альнико". Достоинствами таких машин является повышенный КПД. Электромеханическая постоянная времени равна 0,02-0,05 сек. Недостатки подобных двигателей:

изменение характеристик с течением времени из-за "старения" магнитов (машина размагничивается под действием реакции якоря и других факторов), повышенная стоимость двигателя, вызванная высокой стоимостью магнитных материалов и сложностью их обработки. Серийные двигатели, выпускаемые отечественной промышленностью, имеют мощность до 25 Вт. Перспективны конструкции статорных систем возбуждения с толстопленочными намагничивающими покрытиями полюсов на основе редкоземельных материалов с высокой магнитной энергией, что позволит уменьшить габариты таких двигателей и улучшить их характеристики.

Двигатели с дисковым якорем представляют конструкцию, в которой для повышения быстродействия уменьшена масса вращающихся частей. Якорь такого двигателя представляет собой

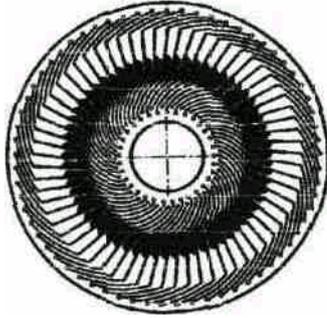


Рис.4.44

тонкий диск обычно из стеклотекстолита толщиной 1-3 мм. На диск с двух сторон наклеивается медная фольга толщиной 0,05...0,4 мм. Фольгу покрывают слоем светочувствительного материала и методом фотопечати наносят схему обмотки. Затем химическим способом вытравливают ненужные части фольги и с обеих сторон образуется полусхемы обмотки якоря. Полувитки обмотки, лежащие с противоположных сторон диска,

электрически соединяют с помощью сквозных заклепок, создавая замкнутую обмотку. Схема печатной полуобмотки представлена на рис.4. Обмотку выполняют как простую волновую. Поскольку в печатной обмотке можно выполнить относительно небольшое число витков на диске, то такие машины выполняются на пониженное напряжение: 24, 12, 6 В. Машины с дисковым якорем не имеют явно выраженного коллектора. Поверхность диска с обмоткой выполняет одновременно роль торцевого коллектора. Щетки при этом располагают в осевом направлении. На рис.4.44 видна зачерненная полоса, оставленная трением щеток. Обычно применяют металлографитные щетки МГ или СГ, у которых падение напряжения в щеточном контакте невелико (0,15...0,2 В), что очень важно для низковольтных машин. В проводниках якоря допускают большую плотность тока, поскольку неизолированные проводники, расположенные на поверхности диска, хорошо охлаждаются. Магнитный поток направлен в осевом направлении и создается постоянными магнитами. По сравнению с обычной машиной воздушный зазор намного увеличен, так как состоит из двух воздушных зазоров с обеих сторон диска и толщины этого немагнитного диска. Увеличение воздушного зазора требует увеличения МДС системы возбуждения и ограничивает величину индукции, что приводит к уменьшению энергетике двигателя. Момент инерции ротора существенно уменьшен за счет отсутствия на роторе стального пакета и коллектора.

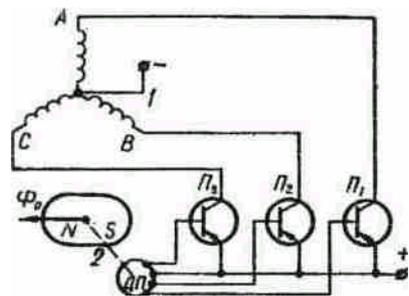
Электромеханическая постоянная времени таких двигателей  $T_{эм} = 0,01...0,03$  с. Недостатком подобных двигателей является уменьшенный срок службы за счет истирания проводников в месте щеточного контакта, а также старения материала диска, сопровождающегося короблением и снижением механической прочности.

Двигатели с полым цилиндрическим якорем (ДПР) также используют идею уменьшения момента инерции ротора за счет отсутствия стального магнитопровода ротора. В этом случае катушки обмотки не укладывают, как обычно в пазы якоря, а спрессовывают в пластмассовом наполнителе по цилиндрической поверхности в виде

полого стакана. Якорный стакан консольно укреплен на валу двигателя, концы катушек якоря подсоединяют к пластинам обычного коллектора. Система возбуждения выполняется либо с постоянными магнитами, либо с электромагнитами. Для уменьшения магнитного сопротивления внутри полого вращающегося якоря располагается магнитное неподвижное ярмо (внутренний статор), конструктивно связанное со щитом двигателя. Немагнитный зазор в подобной машине значительно больше, чем в нормальных машинах, что ограничивает величину магнитной индукции. В отличие от машины с дисковым якорем и печатной обмоткой двигатель с полым якорем может выполняться на любое рабочее напряжение. Поскольку диаметр якоря таких машин меньше, чем в машинах с дисковым якорем, то инерционность ротора и постоянная времени будут меньше:  $T_{мех} = 0,006...0,02$  с. Машины с полым якорем выполняют мощностью до 15 Вт.

Малоинерционные двигатели с гладким якорем (серия МИГ) имеют наибольшее быстродействие. Электромеханическая постоянная этих двигателей составляет  $T_{мех} = (2...6)10^{-3}$  с, мощность - 10...60 Вт. Для повышения быстродействия используются наиболее качественные материалы для магнитов, индукция в воздушном зазоре доведена до 0.9... 1,2 Тл. В конструкции двигателя устранены зубцы - наиболее насыщающийся участок магнитной цепи, обычно ограничивающий величину индукции в зазоре. Сердечник якоря такой машины представляет собой гладкий цилиндр, набранный из изолированных листов электротехнической стали. Обмотка якоря равномерно распределена по изолированной поверхности гладкого сердечника, она пропитывается лаком и бандажуется стеклолентой. Двигатели типа МИГ отличаются хорошей коммутацией и высоким пусковым моментом. Они применяются в быстродействующих приводах и следящих системах. Ведутся разработки по увеличению мощности этих двигателей.

Бесщеточные (бесконтактные) двигатели постоянного тока позволяют решить чрезвычайно важную проблему коллекторных машин - отказаться от щеточно-коллекторного узла, наличие которого приводит



датчик

Рис.4.45

к понижению надежности работы, ограничению области применения и др. На основе применения современных полупроводниковых элементов созданы бесщеточные (БДП) микродвигатели постоянного тока, лишенные указанных недостатков. Основными элементами БДП являются собственно двигатель, управляемый полупроводниковый коммутатор и

положения ротора (ДПР). Конструкция

двигателя обращенная, аналогичная синхронным машинам: на роторе выполняют систему возбуждения (обычно постоянные магниты), а рабочую обмотку (обмотку якоря) располагают на статоре. Пакет статора набран из изолированных листов электротехнической стали, так как он пересекается вращающимся магнитным полем ротора. Преобразование постоянного тока внешней цепи в переменный, протекающий по обмотке, осуществляется полупроводниковым переключателем - коммутатором. Моменты переключения направления тока в ветвях обмотки задаются датчиком положения, связанным с валом двигателя. Датчики положения могут быть различных типов: магнитодиодные, фоторезисторные, датчики Холла и другие бесконтактные преобразователи. Принципиальная схема бесщеточного микродвигателя постоянного тока показана на рис.4.45. Приведенная схема по рабочим свойствам соответствует двигателю с коллектором из трех коллекторных пластин. Для упрощения схемы коммутатора на секции (фазы) обмотки подают однополярное напряжение. В зависимости от положения датчика управляющий сигнал поступает на один из транзисторов, через который положительный потенциал подается на фазы обмотки. При этом ток от положительного зажима источника питания идет через транзистор, работающий в ключевом режиме, через секцию обмотки и нулевой провод к отрицательному зажиму источника. Система управления настраивается так, чтобы магнитные поля системы возбуждения и работающих (открытых) фаз обмотки создавали максимальный вращающий момент. Для этого необходимо, чтобы эти магнитные поля были сдвинуты на  $90^\circ$ . В момент времени, соответствующий рис.4.45, необходимо открыть транзистор П1, это создаст вращающий момент, направленный по часовой стрелке. При повороте ротора управляющий сигнал поступает на транзистор П2, а транзистор П1 при дальнейшем вращении запирается и т.д.

Рабочие характеристики бесщеточного двигателя постоянного тока аналогичны характеристикам коллекторного; двигатели имеют высокий пусковой момент, большую перегрузочную способность, линейные механические и регулировочные характеристики, широкий диапазон регулирования скорости. Применение управляемого полупроводникового коммутатора позволяет регулировать скорость с помощью маломощных управляющих сигналов. Такие двигатели могут использоваться для установок, работающих в вакууме, жидких средах, при значительных колебаниях температуры и т.д., обеспечивая длительный срок службы и высокую надежность. Однако электронное устройство коммутации с системой бесконтактных датчиков - сложный и дорогой узел. Это сдерживает широкое применение БДП как модулей современных устройств автоматики, тем более что при использовании питания переменным током сильную конкуренцию им составляют исполнительные двухфазные асинхронные двигатели.



$$x_{K3} = \sqrt{z_{K3}^2 - r_{K3}^2} = \sqrt{8^2 - 1} = 7,94$$

Параметры обмоток, Ом

$$r_1 = r_2' = \frac{r_{K3}}{2} = 0,5; \quad x_1 = x_2' = \frac{x_{K3}}{2} = 3,97$$

Полное сопротивление намагничивающего контура, Ом

$$z_m = \frac{U_{1\Phi H}}{i_0 \cdot I_{1H}} = \frac{5773,5}{0,02 \cdot 57,735} = 5000$$

Активное сопротивление намагничивающего контура, Ом

$$r_m = \frac{P_0}{3 \cdot (i_0 \cdot I_{1H})^2} = \frac{3000}{3 \cdot (0,02 \cdot 57,735)^2} = 750$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура, Ом

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2} = \sqrt{5000^2 - 750^2} = 4940$$

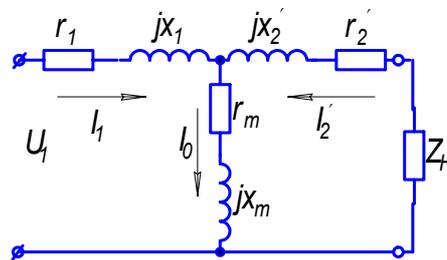


Рис. 5.1. Схема замещения трансформатора

### 3. КПД трансформатора

$$\text{КПД } \eta = \frac{P_2}{P_1},$$

где  $P_2 = \beta S_H \cos \varphi_2$  - полезная мощность,  
 $\cos \varphi_2$  - коэффициент мощности,  
 $P_1 = P_2 + \Sigma P$  - потребляемая мощность,  
 $\Sigma P = P_0 + \beta P_{KH}$  - сумма потерь.

Отсюда

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{KH}}.$$

Расчеты  $\eta = f(\beta)$  сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

$P_0 = 3$  кВт,  $P_{KH} = 10$  кВт,  $\cos \varphi_2 = 0,8$

| $\beta$ | $P_2$ , кВт | $P_K$ , кВт | $\Sigma P$ , кВт | $P_1$ , кВт | $\eta$ , % |
|---------|-------------|-------------|------------------|-------------|------------|
| 0,25    | 200         | 0,625       | 3,625            | 203,625     | 98,22      |
| 0,50    | 400         | 2,5         | 5,5              | 405,5       | 98,64      |
| 0,5477  | 438,2       | 3,0         | 6,0              | 444,2       | 98,65      |
| 0,75    | 600         | 5,625       | 8,625            | 606,25      | 98,58      |
| 1,00    | 800         | 10          | 13               | 813         | 98,40      |
| 1,25    | 1000        | 15,625      | 18,625           | 1018,625    | 98,17      |

Максимальное значение КПД  $\eta_{\max}$  соответствует условию равенства постоянных и переменных потерь  $P_0 = \beta_{\text{ОПТ}}^2 \cdot P_{\text{КН}}$

$$\text{Отсюда } \beta_{\text{ОПТ}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{КН}}}} = \sqrt{\frac{3}{10}} = 0,5477$$

Расчет  $\eta_{\max}$  приведен в таблице 5.1. Значение  $\eta_{\max} = 98,65\%$ .

#### 4. Процентное изменение напряжения на зажимах вторичной обмотки

$$\Delta U = u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2 + (u_p \cos \varphi_2 + u_a^2 \sin \varphi_2) / 200 \approx u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2,$$

$$\text{где } u_a = (I_1 \cdot r_k / U_{1\text{ФН}}) 100\% = \frac{57,735 \cdot 1}{5773,5} \cdot 100\% = 1\%$$

$$u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2} = \sqrt{8^2 - 1} = 7,94\%$$

Расчеты  $\Delta U = f_2(\varphi)$  сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 Изменение выходного напряжения  $\Delta U$ , %

| характер нагрузки          | $\varphi_2$ | $\cos \varphi_2$ | $\sin \varphi_2$ | $u_a \cos \varphi_2$ | $u_p \cos \varphi_2$ | $\Delta U$ , % |
|----------------------------|-------------|------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| ин-<br>дук-<br>тив-<br>ный | 0           | 1                | 0                | 1                    | 0                    | 1              |
|                            | 30          | 0,867            | 0,5              | 0,867                | 3,97                 | 4,84           |
|                            | 60          | 0,5              | 0,867            | 0,5                  | 6,884                | 7,384          |
|                            | 90          | 0                | 1                | 0                    | 7,94                 | 7,94           |
| ем-<br>кост-<br>ной        | -30         | 0,867            | -0,5             | 0,867                | -3,97                | -3,103         |
|                            | -60         | 0,5              | -0,867           | 0,5                  | -6,884               | -6,384         |
|                            | -90         | 0                | -1               | 0                    | -7,94                | -7,94          |

5. При параллельной работе двух трансформаторов между трансформаторами распределяется в соответствии с их напряжением короткого замыкания следующим образом:

$$\text{первый трансформатор } S_1 = \frac{u_{k2}}{u_{k1} + u_{k2}} \cdot S_{\text{НГ}}$$

$$\text{второй трансформатор } S_2 = \frac{u_{k1}}{u_{k1} + u_{k2}} \cdot S_{\text{НГ}}$$

По условию задания  $u_{k1} = 8\%$ ,  $u_{k2} = 1,1 \cdot u_{k1} = 8,8\%$ ,  $S_{\text{НГ}} = 2S_{\text{Н}} = 2000$  кВА,

$$S_1 = \frac{8,8}{8 + 8,8} \cdot 2000 = 1047,62 \text{ кВА}, \quad S_{21} = \frac{8}{8 + 8,8} \cdot 2000 = 952 \text{ кВА}.$$

Таким образом, первый трансформатор перегружен, а второй недогружен примерно 5%.

## Задача 2

Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет данные, приведенные в таблице 5.3: число пар полюсов  $2p$ , номинальная мощность  $P_{2H}$ , линейное напряжение обмотки ротора  $U_{2H}$ , активные сопротивления фазы статора  $r_1$  и ротора  $r_2'$  при  $20^\circ\text{C}$ , индуктивные сопротивления статора  $x_1$  и ротора  $x_2'$ . Частота сети  $f_1 = 50$  Гц, напряжение  $U_1 = 380$  В.

Соединение обмоток статора и ротора "звезда". Класс нагревостойкости изоляции F, расчетная температура обмоток  $115^\circ\text{C}$ .

Таблица 5.3

Данные асинхронных двигателей с фазным ротором

| Тип двигателя | $2p$ | $P_{2H}$<br>кВт | $U_{2H}$<br>В | $r_1$<br>Ом | $r_2'$<br>Ом | $x_1$<br>Ом | $x_2'$<br>Ом |
|---------------|------|-----------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 4АК200М4УВ    | 2    | 22              | 340           | 0,024       | 0,026        | 0,050       | 0,075        |

Требуется:

1. Определить синхронную частоту вращения.  
Определить потребляемый ток, момент и коэффициент мощности при пуске двигателя с замкнутой накоротко обмоткой ротора, т.е. без пускового реостата.
2. Определить сопротивление пускового реостата  $R_p$  при котором начальный пусковой момент имеет максимально возможное значение. Определить в этом режиме пусковой момент, ток статора и коэффициент мощности.
3. Рассчитать механические характеристики двигателя для трех значений добавочных сопротивлений в цепи ротора:  $R_d = 0$ ,  $R_d = R_p / 2$ ,  $R_d = R_p$ .

Решение

1. Синхронная частота вращения, об/мин

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000$$

Активные сопротивления обмоток при  $115^\circ\text{C}$ , Ом

$$R_1 = r_1(235 + 115)/(235 + 20) = 0,024 \cdot 1,3725 = 0,03294$$

$$R_2' = r_2'(235 + 115)/(235 + 20) = 0,026 \cdot 1,3725 = 0,0357$$

Полное сопротивление короткого замыкания при отсутствии пускового реостата, Ом

$$Z_K = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2} = \sqrt{R_K^2 + x_K^2} = \sqrt{0,0686^2 + 0,125^2} = 0,1426$$

где  $R_K = R_1 + R_2' = 0,03294 + 0,0357 = 0,0686$ ,  $x_K = x_1 + x_2' = 0,50 + 0,075 = 0,125$

Начальный пусковой ток, А

$$I_0 = \frac{U_{1\phi}}{Z_K} = \frac{220}{0,1426} = 1542,8$$

где  $U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$

Коэффициент мощности при пуске

$$\cos \varphi_{II} = \frac{R_K}{Z_K} = \frac{0,0686}{0,125} = 0,549$$

Пусковой момент, Н·м

$$M_0 = \frac{pmU_{1\phi}^2 R_2}{2\pi f_1 Z_K^2} = \frac{1 \cdot 3 \cdot 220^2 \cdot 0,0357}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,1426^2} = 811,4$$

где  $m = 3$  - число фаз обмотки статора.

Критическое скольжение

$$s_K \equiv R_2' / X_K = 0,2855$$

Максимальный момент, Н·м

$$M_K \equiv \frac{pmU_{1\phi}^2}{4\pi f_1 X_K} = \frac{1 \cdot 3 \cdot 220^2}{4\pi \cdot 50 \cdot 0,125} = 1848,7$$

2. Сопротивление пускового реостата определяем из условия, что пусковой  $M_{II}$  момент имеет максимально возможное значение  $M_K (M_{II} = M_K)$ , поэтому критическое скольжение

$$s_K \equiv R_2' / X_K = 1$$

Суммарное активное сопротивление роторной цепи определяется сопротивлением обмотки ротора и сопротивлением пускового реостата

$$R_{2\Sigma} = R_2 + R_p = X_K$$

Откуда определяем приведенное значение пускового реостата, Ом

$$R_p' = X_K - R_2' = 0,125 - 0,0357 = 0,0893$$

Искомое сопротивление пускового реостата, Ом

$$R_p = R_p' / k^2 = 0,0893 / 1,118^2 = 0,0715$$

где коэффициент трансформации обмоток статора и ротора

$$k = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{U_1}{U_{2л}} = \frac{380}{340} = 1,118$$

Полное сопротивление короткого замыкания при наличии пускового реостата  $R_p$ , Ом

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = \sqrt{0,1579^2 + 0,125^2} = 0,2014,$$

где  $R_K = R_1 + R_2' + R_p = 0,03294 + 0,0357 + 0,0898 = 0,1579$

Начальный пусковой ток, А

$$I_H = U_{1\phi} / Z_K = 220 / 0,2014 = 1092,3$$

Коэффициент мощности при пуске

$$\cos\varphi_K = R_K / Z_K = 0,1579 / 0,2014 = 0,784$$

3. При добавочном сопротивлении  $R'_D = \frac{R'_P}{2}$  суммарное сопротивление роторной цепи, Ом

$$R_{2\Sigma} = R'_2 + \frac{R'_P}{2} = 0,0357 + \frac{0,0893}{2} = 0,0803.$$

Полное сопротивление короткого замыкания при

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = \sqrt{0,1133^2 + 0,125^2} = 0,1687,$$

где  $R_K = R_1 + \frac{R'_P}{2} = 0,03294 + 0,0803 = 0,1133$

Пусковой момент, Н·м

$$M_0 = \frac{pmU_{1\phi}^2 R_2}{2\pi f_1 Z_K^2} = \frac{1 \cdot 3 \cdot 220^2 \cdot 0,0803}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,1687^2} = 1304$$

Критическое скольжение

$$s_K \equiv R'_2 / X_K = 0,0803 / 0,1687 = 0,476$$

Расчет механической характеристики ведем по упрощенной формуле Клосса

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}}$$

Значения M и  $s_K$  определены ранее, причем  $s_K$  различно для каждой механической характеристики.

Расчеты механических характеристик  $M = f(s)$  для трех значений добавочных сопротивлений сведены в таблицу 5.4.

Таблица 5.4

Электромагнитный момент, М, Н·м

$M_K = 1848,7$  Н·м

| R                  | s |        |        |        |        |        |        |        |        | s <sub>K</sub> |
|--------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
|                    | 0 | 0,125  | 0,250  | 0,375  | 0,500  | 0,625  | 0,750  | 0,875  | 1,0    |                |
| 0                  | 0 | 1358,5 | 1832,6 | 1782,1 | 1592,2 | 1397,4 | 1229,4 | 1090,3 | 811,4  | 0,2855         |
| R <sub>P</sub> / 2 | 0 | 908,3  | 1522,1 | 1797,4 | 1846,5 | 1782,2 | 1672,8 | 1552,1 | 1304   | 0,476          |
| R <sub>P</sub>     | 0 | 455,1  | 870,0  | 1215,6 | 1479,0 | 1661,8 | 1774,8 | 1832,4 | 1848,7 | 1              |

### Задача 3

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором питается от трехфазной сети с линейным напряжением  $U_1$ , частотой 50 Гц. Величины, характеризующие номинальный режим двигателя: мощность на валу  $P_{2H}$ , синхронная частота вращения  $n_1$ , номинальное скольжение  $s_H$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_H$  и полезного действия  $\eta_H$ , кратности критического  $k_M$  и пускового моментов  $k_\Pi$ , кратность пускового тока  $i_\Pi$  приведены в таблице 5.5. Соединение обмоток статора - "треугольник".

Таблица 5.5

Данные для расчета

| Тип двигателя | $U_1$ , В | $P_{2H}$ , кВт | $n_1$ об/мин | $s_H$ % | $\cos\varphi_H$ | $\eta_H$ % | $k_M$ | $k_\Pi$ | $i_\Pi$ |
|---------------|-----------|----------------|--------------|---------|-----------------|------------|-------|---------|---------|
| 4A132S4У3     | 220       | 7,5            | 1500         | 2,9     | 0,86            | 87,5       | 3,0   | 2,2     | 7,5     |

Определить:

- число пар полюсов;
- номинальную частоту вращения ротора;
- номинальный фазный ток обмотки статора;
- номинальный момент на валу;
- критическое скольжение и момент двигателя;
- пусковой момент при номинальном напряжении и снижении его значения на 10%;
- указать три характерные точки механической характеристики двигателя;
- пусковой ток;
- величину емкости блока конденсаторов, увеличивающих коэффициент мощности до 0,95 и изобразить электрическую схему двигателя с включением блока конденсаторов.

### Решение

1. Число пар полюсов обмотки статора

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2$$

2. Номинальная частота вращения ротора, об/мин

$$n_H = n_1(1 - s_H) = 1500(1 - 0,029) = 1456,5$$

3. Номинальное фазное напряжение, В

$$\text{При соединении в } \Delta \quad U_\phi = U_1 = 220$$

4. Номинальный фазный ток обмотки статора, А

$$I_{\phi H} = \frac{P_{2H}}{3U_\phi \eta_H \cos\varphi_H} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,86} = 15,1$$

5. Номинальный момент на валу, Н·м

$$M_H = \frac{P_{2H} 10^3}{\omega_H} = \frac{7500}{152,45} = 49,2$$

где угловая скорость вращения, 1/с

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1456,6}{60} = 152,45$$

### 6. Критическое скольжение

$$s_{KP} = s_H (k_M + \sqrt{k_M^2 - 1}) = 0,029(3 + \sqrt{9 - 1}) = 0,17$$

### 7. Критический момент, Н·м

$$M_M = k_M M_H = 3 \cdot 49,2 = 147,6$$

### 8. Пусковой момент

При номинальном напряжении, Н·м

$$M_{II} = k_{II} M_H = 2,2 \cdot 49,2 = 108,2$$

при пониженном напряжении

$$M'_{II} = M_{II} \left( \frac{U}{U_H} \right)^2 = M_{II} \cdot 0,9^2 = 0,81 \cdot 108,2 = 87,6$$

### 9. Данные к расчету механической характеристики

Таблица 5.6

| Параметры | Режим работы |             |          |
|-----------|--------------|-------------|----------|
|           | Номинальный  | Критический | Пусковой |
| s         | 0,029        | 0,17        | 1        |
| M, Н·м    | 49,2         | 147,6       | 108,2    |

### 10. Пусковой ток, А

$$I_{II} = i_{II} I_{\Phi H} = 7,5 \cdot 15,1 = 113,25$$

### 11. Емкость блока конденсаторов, мкФ

$$C = \frac{P_H}{2\pi \cdot f \cdot U_1^2} (tg \varphi_1 - tg \varphi_2) = \frac{7500}{6,28 \cdot 50 \cdot 220^2} (0,593 - 0,3)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - соответственно углы сдвига фаз между напряжением и током до включения и после включения блока конденсаторов, град

$$\varphi_1 = \arccos 0,86 = 30,7$$

$$\varphi_2 = \arccos 0,86 = 18,3$$

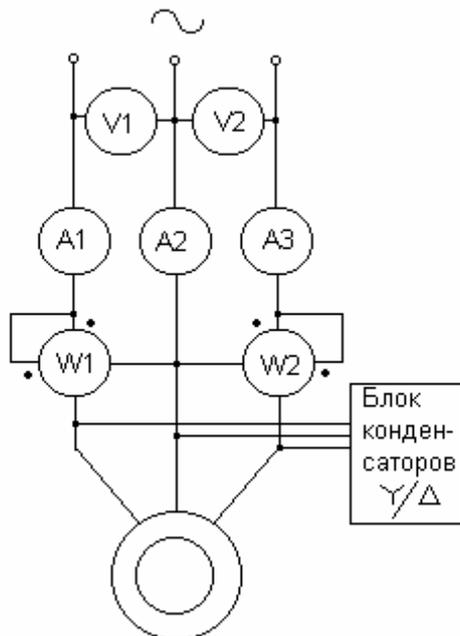


Рис. 5.2. Электрическая схема двигателя с блоком конденсаторов

#### Задача 4

Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальные данные:  
напряжение на зажимах двигателя  $U_H$ , мощность на валу  $P_{2H}$ , частота вращения  $n_H$ , коэффициент полезного действия  $\eta_H$ , сопротивления цепей якоря  $R_{я}$  и возбуждения  $R_B$ .

Исходные данные приведены в таблице 5.7

| $U_H, В$ | $P_{2H}, кВт$ | $n_H, об/мин$ | $\eta_H, \%$ | $R_{я}, Ом$ | $R_B, Ом$ |
|----------|---------------|---------------|--------------|-------------|-----------|
| 220      | 2,8           | 3000          | 85,5         | 0,6         | 190       |

Изобразить электрическую схему

Рассчитать характеристики двигателя: зависимости

- частоты вращения якоря

- момента на валу  $M$

- коэффициента полезного действия  $\eta$

- полезной мощности  $P_2$

от тока якоря при значениях, равных 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 от номинального значения.

#### Решение

1. Расчет номинального режима работы

Номинальная потребляемая мощность, кВт

$$P_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta_H} = \frac{2,8}{0,855} = 3,275$$

Номинальный ток, потребляемый двигателем, А

$$I_H = \frac{P_{1H}}{U_H} = \frac{3,275}{220} = 14,88$$

Номинальный ток возбуждения, А

$$I_{BH} = \frac{U_H}{R_B} = \frac{220}{190} = 1,16$$

Номинальный ток якоря, А

$$I_{яH} = I_H - I_{BH} = 14,88 - 1,16 = 13,72$$

Номинальный момент двигателя, Нм

$$M_H = \frac{P_{2H}}{\omega_H} = \frac{2800}{314} = 8,92$$

где угловая частота  $\omega_H = \frac{2\pi \cdot n_H}{60} = \frac{6,28 \cdot 3000}{60} = 314$

Суммарные потери в номинальном режиме работы, кВт

$$\sum P_H = P_{1H} - P_{2H} = 3,275 - 2,8 = 0,475$$

Переменные потери в номинальном режиме (электрические потери в обмотке якоря), кВт

$$P_{кH} = I_{яH}^2 R_{я} = 13,72^2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} = 0,113$$

Потери на возбуждение, кВт

$$P_B = I_{BH}^2 R_B = 1,16^2 \cdot 190 \cdot 10^{-3} = 0,256$$

Добавочные потери, кВт

$$P_{\text{ДОБН}} = 1\% P_{1Н} = 0,0327$$

Постоянные потери (потери в стали и механические), кВт

$$P_0 = \sum P_H - P_{KH} - P_B - P_{\text{ДОБН}} = 0,475 - 0,113 - 0,256 - 0,033 = 0,0733$$

2. Расчет режима работы при текущем значении тока якоря

Предполагаем, что магнитный поток остается постоянным.

Потребляемый ток двигателя

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{ВН}}$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = U_H I$$

Частота вращения

$$n = n_H \frac{U_H - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{U_H - I_{\text{яН}} R_{\text{я}}}, \quad \omega = \frac{2\pi n}{60}$$

Потери

$$P_K = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} = P_{KH} k_1^2;$$

$$P_{\text{ДОБ}} = P_{\text{ДОБН}} k_1^2;$$

$$\sum P = P_K + P_B + P_0 + P_{\text{ДОБ}},$$

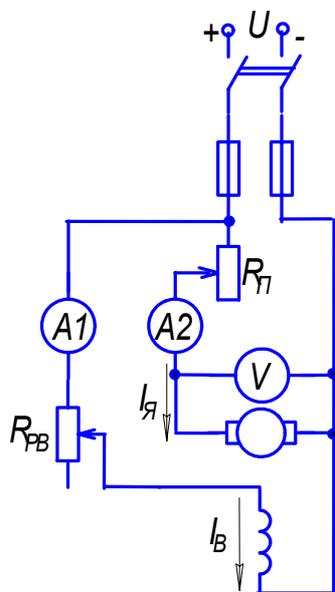
причем для простоты расчета принимаем, что потери холостого  $P_0$  с нагрузкой практически не меняются.

Полезная мощность

$$P_2 = P_1 - \sum P,$$

Момент на валу

$$M = \frac{P_2}{\omega},$$



Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Результаты расчета даны в таблице 5.8

Таблица 5.8

Характеристики двигателя

$U_H = 220$  В,  $I_{\text{ВН}} 1,16$  А,  $P_B = 0,225$  кВт,  $P_0 = 0,0733$  кВт

| Параметры              | $k_1 = I_{\text{я}} / I_{\text{яН}}$ |        |        |        |
|------------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|
|                        | 0,25                                 | 0,5    | 0,75   | 1,0    |
| $I_{\text{я}}$ , А     | 3,43                                 | 6,86   | 10,29  | 13,72  |
| $I$ , А                | 4,59                                 | 8,02   | 11,45  | 14,88  |
| $P_1$ , кВт            | 1,01                                 | 1,764  | 2,52   | 3,275  |
| $n$ , об/мин           | 3087                                 | 3058   | 3029   | 3000   |
| $\omega$ , 1/с         | 323                                  | 320    | 317    | 314    |
| $P_K$ , кВт            | 0,007                                | 0,0282 | 0,0636 | 0,113  |
| $P_{\text{ДОБ}}$ , кВт | 0,0002                               | 0,0008 | 0,0018 | 0,0033 |
| $\sum P$ , кВт         | 0,337                                | 0,359  | 0,395  | 0,475  |
| $P_2$ , кВт            | 0,673                                | 1,405  | 2,12   | 2,8    |
| $M$ , Нм               | 2,08                                 | 4,39   | 6,69   | 8,62   |
| $\eta$ , %             | 66,6                                 | 79,6   | 84,2   | 85,5   |

## Задача 5

Параметры генератора постоянного тока параллельного возбуждения приведены в таблице 5.9. Здесь приняты обозначения: номинальная мощность  $P_{нг}$  и напряжение  $U_{нг}$ , ток возбуждения  $i_{нг}$ , сопротивление обмотки якоря при  $15^\circ\text{C}$ , частота вращения, КПД  $\eta$ .

При расчете пренебречь реакцией якоря и считать ток возбуждения машины постоянным.

Таблица 5.9

Данные машины постоянного тока

| $P_{нг}$<br>кВт | $U_{нг}$ ,<br>В | $i_{нг}$ ,<br>А | $n_{нг}$ ,<br>об/мин | $\eta$ ,<br>% | $R_{нд}$ ,<br>Ом | $P_{нд}$ ,<br>кВт | $U_{нд}$ ,<br>В |
|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|---------------|------------------|-------------------|-----------------|
| 11              | 115             | 2               | 800                  | 83            | 0,05             | 10                | 110             |

Требуется:

- определить частоту вращения данной машины в режиме двигателя, считая, что КПД при номинальной нагрузке в генераторном и двигательных режимах работы равны, напряжение на зажимах двигателя и его номинальная мощность даны в таблице 5.9;
- определить изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу (током якоря при холостом ходе пренебречь);
- определить, как изменится частота вращения двигателя, если подведенное к обмотке якоря напряжение уменьшится до  $0,8 U_{нд}$  при неизменном тормозном моменте, соответствующем номинальной мощности двигателя.

Решение

1. Номинальный ток машины:

в режиме генератора  $I_{нг} = P_{нг} / U_{нг} = 11000 / 115 = 95,65 \text{ А}$

в режиме двигателя  $I_{нд} = P_{нд} / (U_{нд}\eta) = 10000 / (110 \cdot 0,83) = 109,53 \text{ А}$

Ток в обмотке якоря:

в режиме генератора  $I_{янг} = I_{нг} + i_{нг} = 95,65 + 2 = 97,65 \text{ А}$

в режиме двигателя  $I_{янд} = I_{нд} - i_{нд} = 109,53 - 2 = 107,53 \text{ А}$

так как по условию задачи ток возбуждения остается неизменным,

$$i_{нг} = i_{нд} = 2 \text{ А}$$

ЭДС обмотки якоря при номинальной нагрузке:

в режиме генератора

$$E_{нг} = U_{нг} + I_{янг} R_{я15} + \Delta U_{щ} = 115 + 97,65 \cdot 0,062 + 2 = 123,0 \text{ В}$$

в режиме двигателя

$$E_{нд} = U_{нд} + I_{янд} R_{я75} - \Delta U_{щ} = 110 + 107,53 \cdot 0,062 - 2 = 101,3 \text{ В}$$

где сопротивление обмотки якоря, приведенное к температуре  $75^\circ\text{C}$ ,

$$R_{я75} = R_{я15} (235+75) / (235+15) = 0,05 \cdot 1,24 = 0,062 \text{ Ом}$$

Падение напряжения в переходном контакте щеток обычно принимают

$$\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$$

Частоту вращения можно определить из формулы ЭДС  $E$ :

$$E = c n \Phi$$

где  $c$  - постоянный для данной машины коэффициент.  
 Магнитный поток  $\Phi$  считаем постоянным, так как ток возбуждения по условию задачи не меняется, а реакцией якоря пренебрегаем. Таким образом, частота вращения двигателя при номинальной нагрузке может быть найдена из соотношения

$$E_{нг} / E_{нд} = n_{нг} / n_{нд}$$

откуда

$$n_{нд} = n_{нг}(E_{нг} / E_{нд}) = 800(101,3 / 123) = 670 \text{ об/мин.}$$

2. Для того, чтобы найти изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу, используем уравнения ЭДС двигателя: при номинальной нагрузке

$$E_{нд} = U_{нд} - I_{янд} R_{я75} - \Delta U_{щ} = c n_{нд} \Phi$$

при холостом ходе, пренебрегаем током якоря (по условию задачи),

$$E_{од} \approx U_{нд} c n_{од} \Phi$$

Откуда, принимая магнитный поток постоянным, получаем соотношение

$$n_{од} / n_{нд} = U_{нд} / E_{нд}$$

из которого определяем искомую частоту вращения двигателя при холостом ходе

$$n_{од} = n_{нд}(U_{нд} / E_{нд}) = 670(110 / 101,3) = 727 \text{ об/мин}$$

Относительное изменение частоты вращения

$$\Delta = (n_{од} - n_{нд}) / n_{нд} \cdot 100\% = (727 - 670) / 670 \cdot 100 = 8,5\%$$

3. Для определения частоты вращения двигателя при пониженном напряжении, рассмотрим сначала формулу электромагнитного момента

$$M = k \Phi I_{нд}$$

где  $k$  - постоянный для данной машины коэффициент.

По условию задачи при изменении напряжения момент двигателя остается равным номинальному, и магнитный поток  $\Phi$  не меняется. Отсюда следует, что ток обмотки якоря при изменении напряжения также остается постоянным, равным номинальному. Это обстоятельство позволяет записать формулу частоты вращения двигателя

при номинальном напряжении  $U_{нд}$

$$n_{нд} = (U_{нд} - I_{янд} R_{я75} - \Delta U_{щ}) / c \Phi$$

при пониженном напряжении  $0,8 U_{нд}$

$$n = (0,8 U_{нд} - I_{янд} R_{я75} - \Delta U_{щ}) / c \Phi$$

Искомое изменение частоты вращения

$$n / n_{нд} = (0,8 U_{нд} - I_{янд} R_{я75} - \Delta U_{щ}) / (U_{нд} - I_{янд} R_{я75} - \Delta U_{щ}) = \\ = (0,8 \cdot 110 - 109,53 \cdot 0,062 - 2) / (110 - 109,53 \cdot 0,062 - 2) = 0,78$$

## Задача 6

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением имеет номинальные данные: напряжение на зажимах двигателя  $U_H$ , мощность на валу  $P_{2H}$ , частота вращения  $n_H$ , коэффициент полезного действия  $\eta_H$ , сопротивления цепей якоря  $R_{\text{я}}$  и возбуждения  $R_B$ .

Исходные данные приведены в таблице 5.10

Таблица 5.10

Данные для расчета

| $U_H$<br>В | $P_{2H}$<br>кВт | $n_H$<br>об/мин | $\eta_H$<br>% | $R_{\text{я}}$<br>Ом | $R_B$<br>Ом |
|------------|-----------------|-----------------|---------------|----------------------|-------------|
| 110        | 1,1             | 1500            | 72,5          | 0,52                 | 0,48        |

Изобразить электрическую схему двигателя.

Рассчитать зависимости:

- частоту вращения якоря
- момент на валу  $M$ ,
- коэффициент полезного действия
- полезной мощности двигателя от потребляемого тока.

Сравнить частоту вращения двигателя при номинальном моменте для естественной механической характеристики (напряжение на якоре без шунтирования обмотки возбуждения) и двух искусственных характеристик:

- напряжение на якоре без шунтирования обмотки возбуждения
- напряжение на якоре шунтированием обмотки возбуждения, сопротивление шунта.

Вычислить пусковое сопротивление из условия и пусковой момент

### Решение

#### 1. Расчет номинального режима работы

Номинальная потребляемая мощность, кВт

$$P_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta_H} = \frac{1,1}{0,725} = 1,517$$

В двигателе последовательного возбуждения ток возбуждения определяется током якоря.

Номинальный ток якоря и ток возбуждения, А

$$I_H = I_{\text{яH}} = I_{\text{вH}} = \frac{P_{1H}}{U_H} = \frac{1517}{110} = 13,79$$

Номинальный момент двигателя, Нм

$$M_H = \frac{P_{2H}}{\omega_H} = \frac{1100}{157} = 7,0$$

где угловая частота вращения 1/с

$$\omega_H = 2\pi \frac{n_H}{60} = 6,28 \frac{1500}{60} = 157$$

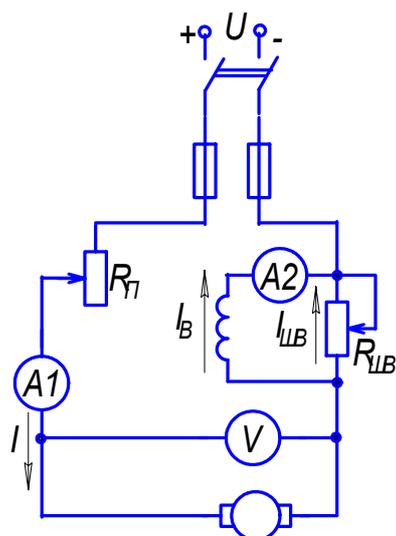
Суммарные потери в номинальном режиме

$$\sum P_H = P_{1H} - P_{2H} = 1,517 - 1,1 = 0,417$$

Переменные потери в номинальном режиме (электрические потери в обмотках), кВт

$$P_{KH} = P_{\text{яH}} + P_{\text{вH}} + P_{\text{добH}} = 0,0989 + 0,0913 + 0,0152 = 0,2054$$

где потери в обмотке якоря, кВт



работы, кВт

$$P_{яH} = I_{яH}^2 R_{я} = 13,79^2 \cdot 0,52 \cdot 10^{-3} = 0,0989,$$

потери на возбуждение, кВт

$$P_{BH} = I_{BH}^2 R_B = 13,79^2 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} = 0,0913$$

добавочные потери, кВт

$$P_{доб.н} = 1\% \cdot P_{1H} = 0,0152$$

Постоянные потери (потери в стали и механические), кВт

$$P_0 = \sum P_H - P_{KH} = 0,417 - 0,2054 = 0,212$$

Принимаем, что потери в стали и механические равны:

$$P_{ст.н} = P_{мх.н} / 2 = 0,106$$

2. Расчет для режима естественной механической характеристики при текущем значении тока якоря  $I_{я}$ .

Отличием двигателя последовательного возбуждения является то, что ток возбуждения  $I_B$  определяется током якоря и изменяется в зависимости от момента нагрузки. При этом изменяется величина магнитного потока  $\Phi$ . Изменение магнитного потока от тока возбуждения приводится в таблице 5.11.

Таблица 5.11

Зависимость  $k_{\Phi} = f(I_B/I_{BH})$

|              |      |      |      |      |      |     |      |      |      |      |     |
|--------------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|
| $I_B/I_{BH}$ | 0    | 0,2  | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1,0 | 1,2  | 1,4  | 1,6  | 1,8  | 2,0 |
| $k_{\Phi}$   | 0,05 | 0,45 | 0,73 | 0,88 | 0,95 | 1,0 | 1,03 | 1,06 | 1,08 | 1,09 | 1,1 |

Расчетные формулы

Потребляемая мощность, кВт

$$P_1 = U_H I,$$

Частота вращения якоря, об/мин

$$n = n_H \frac{U_H - k_1 I_{яH} (R_{я} + R_B)}{k_{\Phi} (U_H - I_{яH} (R_{я} + R_B))},$$

где  $k_1 = I_{я} / I_{яH}$  - относительное значение тока якоря,

$k_{\Phi} = \Phi / \Phi_H$  - относительное значение магнитного потока,

$R_{я}$  и  $R_B$  - сопротивления цепи якоря и обмотки возбуждения.

С изменением потока возбуждения потери в стали изменяются пропорционально квадрату изменения потока:

$$P_{ст} = k_{\Phi}^2 P_{ст.н}$$

Переменные потери, кВт

$$P_K = P_{KH} \left( \frac{I}{I_H} \right)^2$$

Механические потери полагаем пропорциональными частоте вращения, кВт

$$P_{MX} = P_{MX.н} \frac{n}{n_H}$$

Суммарные потери, кВт

$$\sum P = P_K + P_{MX} + P_{ст}$$

Полезная мощность, кВт

$$P_2 = P_1 - \sum P$$

Момент двигателя

$$M = \frac{P_2}{\omega}$$

КПД, %

$$\eta = P_2 / P_1 \cdot 100$$

Расчеты режима естественной механической характеристики сведены в таблицу 5.12

Таблица 5.12

Режим естественной механической характеристики

$P_{МХН} = 0,106$  кВт,  $P_{СТН} = 0,106$  кВт

| Параметры        | $k_1 = I / I_H$ |        |        |        |
|------------------|-----------------|--------|--------|--------|
|                  | 0,25            | 0,5    | 0,75   | 1,0    |
| I, А             | 3,45            | 6,90   | 10,35  | 13,79  |
| $k_\Phi$         | 0,52            | 0,82   | 0,93   | 1,0    |
| $P_1$ , кВт      | 0,379           | 0,758  | 1,138  | 1,517  |
| n, об/мин        | 2884            | 1829   | 1613   | 1500   |
| $\omega$ , 1/с   | 302             | 192    | 167    | 157    |
| $P_K$ , кВт      | 0,0128          | 0,0514 | 0,1155 | 0,2054 |
| $P_{МХ}$ , кВт   | 0,204           | 0,129  | 0,114  | 0,106  |
| $P_{СТ}$ , кВт   | 0,0287          | 0,0713 | 0,0917 | 0,106  |
| $\Sigma P$ , кВт | 0,245           | 0,252  | 0,321  | 0,417  |
| $P_2$ , кВт      | 0,134           | 0,506  | 0,818  | 1,1    |
| M, Нм            | 0,44            | 2,64   | 4,90   | 7,0    |
| $\eta$ , %       | 35,3            | 66,8   | 72,1   | 72,5   |

3. Расчеты для режима искусственной механической характеристики при шунтировании обмотки возбуждения ( $R_{ШВ} = R_B$ ).

Потребляемая мощность, кВт

$$P_1 = U_H I,$$

где  $I = I_{Я}$  - ток, потребляемый двигателем.

Ток возбуждения равен половине тока якоря, так как  $R_{ШВ} = R_B$ :

$$I_B = I_{ШВ} = \frac{I_{Я}}{2}$$

Частота вращения якоря, об/мин

$$n = n_H \frac{U_H - k_1 I_{ЯН} (R_{Я} + R_B / 2)}{k_\Phi (U_H - I_{ЯН} (R_{Я} + R_B))}$$

Переменные потери, кВт

$$P_K = P_{Я} + P_B + P_{ДОБ} = k_1^2 [I_{ЯН}^2 (R_{Я} + R_B / 2) + P_{ДОБ.Н}]$$

где потери в обмотке якоря, кВт

$$P_{Я} = I_{Я}^2 R_{Я},$$

потери на возбуждение, кВт

$$P_B = I_B^2 R_B + I_{ШВ}^2 R_{ШВ} = 0,5 I_A^2 R_B$$

добавочные потери

$$P_{ДОБ} = \kappa_1^2 P_{ДОБ.Н}$$

Суммарные потери, кВт

$$\sum P = P_K + P_{МХ} + P_{СТ}$$

Расчет остальных величин производится по формулам, приведенным в п. 2. Расчеты для режима искусственной механической характеристики сведены в таблицу 5.13.

Таблица 5.13

Режим искусственной механической характеристики при шунтировании обмотки возбуждения ( $R_{ШВ} = R_B$ ),  $U = U_H = 110$  В.

| Параметры        | $k_1 = I / I_H$ |       |       |
|------------------|-----------------|-------|-------|
|                  | 0,5             | 0,75  | 1,0   |
| I, А             | 6,90            | 10,35 | 13,79 |
| $I_B / I_{ВН}$   | 0,25            | 0,375 | 0,50  |
| $k_\Phi$         | 0,52            | 0,70  | 0,83  |
| $P_1$ , кВт      | 0,758           | 1,138 | 1,517 |
| n, об/мин        | 3140            | 2275  | 1869  |
| $\omega$ , 1/с   | 329             | 238   | 196   |
| $P_K$ , кВт      | 0,040           | 0,090 | 0,16  |
| $P_{МХ}$ , кВт   | 0,222           | 0,161 | 0,106 |
| $P_{СТ}$ , кВт   | 0,028           | 0,052 | 0,073 |
| $\Sigma P$ , кВт | 0,290           | 0,303 | 0,339 |
| $P_2$ , кВт      | 0,469           | 0,835 | 1,18  |
| M, Нм            | 1,41            | 3,51  | 6,01  |
| $\eta$ , %       | 61,8            | 73,4  | 77,6  |

4. Расчеты для режима искусственной механической характеристики при пониженном напряжении питания ( $U = 0,5 U_H$ ).

Частота вращения якоря, об/мин

$$n = n_H \frac{U - k_1 I_{ЯН} (R_Я + R_B)}{k_\Phi (U_H - I_{ЯН} (R_Я + R_B))}$$

Расчет остальных величин производится по формулам, приведенным в п.2.

Режим искусственной механической характеристики при пониженном напряжении питания ( $U = 0,5 U_H = 55$  В).

| Параметры        | $k_1 = I / I_H$ |        |        |        |
|------------------|-----------------|--------|--------|--------|
|                  | 0,25            | 0,5    | 0,75   | 1,0    |
| I, А             | 3,45            | 6,90   | 10,35  | 13,79  |
| $\cos\phi$       | 0,52            | 0,82   | 0,93   | 1,0    |
| $P_1$ , кВт      | 0,19            | 0,379  | 0,569  | 0,7585 |
| n, об/мин        | 1545            | 914    | 748    | 642    |
| $\omega$ , 1/с   | 162             | 95,8   | 78,4   | 67,3   |
| $P_K$ , кВт      | 0,0128          | 0,0514 | 0,1155 | 0,2054 |
| $P_{MX}$ , кВт   | 0,109           | 0,064  | 0,053  | 0,045  |
| $P_{CT}$ , кВт   | 0,0287          | 0,0713 | 0,0917 | 0,106  |
| $\Sigma P$ , кВт | 0,151           | 0,187  | 0,260  | 0,357  |
| $P_2$ , кВт      | 0,039           | 0,192  | 0,309  | 0,402  |
| M, Нм            | 0,24            | 2,00   | 3,94   | 5,97   |
| $\eta$ , %       | 20,5            | 50,6   | 54,3   | 53,0   |

5. Сравнение частоты вращения двигателя при различных режимах работы  
В таблице 5.15 приведены значения частоты вращения при различных режимах работы двигателя по данным, полученным из предыдущих расчетов (таблицы 5.12-5.14)

Таблица 5.15  
Частота вращения при различных режимах работы

| Режим работы       | Номинальный | U = 110 В<br>шунтирование ОВ | U = 55 В |
|--------------------|-------------|------------------------------|----------|
| n, об/мин          | 1500        | 1869                         | 642      |
| n / n <sub>H</sub> | 1           | 1,25                         | 0,43     |

6. Расчет пускового сопротивления и пускового момента  
Пусковой ток

$$I_H = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{п}}},$$

Отсюда определим пусковое сопротивление

$$R_{\text{п}} = \frac{U_H}{I_{\text{п}}} - R_{\text{я}} - R_{\text{в}} = \frac{110}{2 \cdot 13,79} - 0,52 - 0,48 = 3 \text{ Ом}$$

Пусковой момент

$$M_{\text{п}} = M_H \left( \frac{I_{\text{п}}}{I_H} \right)^2 = 4M_H = 4 \cdot 7 = 28 \text{ Нм}$$

## Задача 7

Явнополюсный синхронный генератор имеет следующие данные в относительных единицах:

номинальное напряжение  $U = 1$

номинальный ток  $I = 1$

номинальная ЭДС  $E = 1,87$

синхронное сопротивление по продольной оси  $x_d = 1,1$

синхронное сопротивление по поперечной оси  $x_q = 0,75$

индуктивное сопротивление обратного следования фаз  $x_2 = 0,25$

индуктивное сопротивление нулевого следования фаз  $x_0 = 0,045$

Вычислить относительное значение активной мощности в номинальном режиме, если угол нагрузки  $\theta = 20^\circ$ .

Определить при номинальном возбуждении в относительных единицах установившиеся токи короткого замыкания

- трех фаз;
- двух фаз;
- одной фазы.

Решение

1. Активная мощность в относительных единицах

$$P = \frac{E \cdot U}{x_d} \cdot \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = \frac{1,87}{1,1} 0,342 + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{0,75} - \frac{1}{1,1} \right) 0,643 = 0,717$$

2. Установившиеся токи при коротком замыкании в относительных единицах  
Значение тока короткого замыкания определяется равенством

$$i_{1k} = \frac{E}{Z_K},$$

где  $E$  и  $Z_K$  - соответственно ЭДС и сопротивление, соответствующее виду короткого замыкания

Трехфазное замыкание

$$I_{K(3)} = \frac{E_K}{x_d} = \frac{1,87}{1,1} = 1,7$$

Двухфазное замыкание

$$I_{K(2)} = \frac{E_0 \sqrt{3}}{x_d + x_2} = \frac{1,87 \sqrt{3}}{1,1 + 0,25} = 2,4$$

Однофазное замыкание

$$I_{K(2)} = \frac{3E_0}{x_d + x_2 + x_0} = \frac{3 \cdot 1,87}{1,1 + 0,25 + 0,045} = 2,15$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 5.16

Таблица 5.16

| Параметры    | Короткое замыкание |          |            |
|--------------|--------------------|----------|------------|
|              | трех фаз           | двух фаз | одной фазы |
| $Z_K$ , о.е. | 1,1                | 1,35     | 1,395      |
| $E_K$ , о.е. | 1,87               | 3,24     | 5,61       |
| $i_K$ , о.е. | 1,7                | 2,4      | 2,15       |

## Задача 8

Электромашинный усилитель поперечного поля (ЭМУ) работает при постоянном токе управления и частоте вращения, независимых от нагрузки. Параметры ЭМУ следующие:

полезная мощность  $P_{3H} = 1300$  Вт, выходное напряжение  $U_{3H} = 230$  В, частота вращения  $n_H = 4000$  об/мин, сопротивление обмоток при температуре  $15^\circ\text{C}$ : якоря  $R_{Я 15^\circ} = 1,12$  Ом, компенсационной  $R_{К 15^\circ} = 1,16$  Ом и обмотки управления  $R_{1 15^\circ} = 4250$  Ом, числа витков компенсационной обмотки  $w_K = 262$  и обмотки управления  $w_1 = 4200$ , ток обмотки управления  $i_l = 10$  мА, приведенная магнитная проводимость по продольной оси  $\lambda = 790 \cdot 10^{-8}$  и по поперечной  $\lambda = 200 \cdot 10^{-8}$ .

Требуется

1. Рассчитать внешние характеристики ЭМУ  $U_3 = f(I_3)$  при изменении тока нагрузки  $I_3$  от 0 до номинального  $I_{3H}$  для трех значений коэффициента компенсации  $K_K = 0,99; 1,0; 1,01$ .
2. Определить коэффициент усиления  $K_U$  для номинального значения тока  $I_{3H}$  и трех значений  $K_K = 0,99; 1,0; 1,01$ .

Решение

Номинальный ток ЭМУ

$$I_{3H} = P_{3H} / U_{3H} = 1300 / 230 = 5,65 \text{ А}$$

Выходная ЭДС ЭМУ

$$E_{10} = c n_H^2 w_1 i_l = 55,39 \cdot 10^{-8} \cdot 4000^2 \cdot 4200 \cdot 0,01 = 372 \text{ В}$$

$$\text{где } c = \left( \frac{pN}{60 \cdot a} \right)^2 \frac{\lambda_{\text{прод}} \lambda_{\text{попер}} w_1}{R_{Я 15^\circ} + R_{К 15^\circ}} = \frac{4 \cdot 262}{60} \cdot \frac{790 \cdot 200 \cdot 10^{-16} \cdot 262}{1,12 + 1,16} = 55,39 \cdot 10^{-8}$$

Число пар полюсов  $p = 1$ .

Число пар параллельных ветвей обмотки якоря  $a = 1$ .

Число витков обмотки якоря  $w_1 = w_K = 262$

Число проводников обмотки якоря  $N = 4 \cdot a \cdot w = 1048$

Сопротивление  $R_1$  и  $R_{Я}$ , приведенные к  $75^\circ\text{C}$ :

$$R = R_{Я 15^\circ} \frac{235 + 75}{235 + 15} = 1,24 \cdot 1,12 = 1,3888 \text{ Ом}, \quad R = R_{К 15^\circ} \frac{235 + 75}{235 + 15} = 1,24 \cdot 1,16 = 1,4384 \text{ Ом}.$$

Падение напряжения в переходном контакте угольно-графитных щеток принимают

$$\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$$

Выходное напряжение ЭМУ рассчитываем по формуле

$$U_1 = E_{30} - I_{3H} \cdot ((R_{Я} + R_{К}) + c \cdot n_K^2 \cdot (w_a - K_K \cdot w_K)) - \Delta U_{щ}$$

Расчеты выполняем для трех значений коэффициента компенсации  $K_K$

$K_K = 0,99$

$$U_1 = E_{30} - I_{3H} \cdot ((R_{Я} + R_{К}) + c \cdot n_K^2 \cdot (w_a - K_K \cdot w_K)) - \Delta U_{щ} = \\ = 372 - 5,65 \cdot ((1,3888 + 1,4384) + 55,39 \cdot 10^{-8} \cdot 4000^2 \cdot 0,01 \cdot 262) = 223 \text{ В}$$

$K_K = 1,0$

$$U_1 = E_{30} - I_{3H} \cdot (R_{Я} + R_{К}) - \Delta U_{щ} = 372 - 5,65 \cdot ((1,3888 + 1,4384) - 2) = 354 \text{ В}$$

$$K_K = 1,01$$

$$U_1 = E_{30} - I_{3H} \cdot ((R_{Я} + R_K) + c \cdot n_K^2 \cdot (w_a - K_K \cdot w_K)) - \Delta U_{Щ} =$$

$$= 372 - 5,65 \cdot ((1,38888 + 1,4384) + 55,39 \cdot 10^{-8} \cdot 4000^2 \cdot 0,01 \cdot 262) - 2 = 485,5 \text{ В}$$

2. Коэффициент усиления представляет собой отношение мощности на выходе к мощности на входе и определяется по формуле:

$$K_V = \frac{c \cdot n_H^2}{R + c \cdot n_H^2 \cdot (w_a - K_K w_K)} \cdot \frac{w_1^2 R_H}{R_1}$$

Сопротивление щеточного контакта

$$R_{Щ} = \Delta U_{Щ} / I_{3H} = 2 / 5,65 = 0,3538$$

Сопротивление нагрузки определяется для  $K_K = 0,99; 1,0; 1,01$  для соответствующих значений напряжения  $U_3$ :

$$R_H = U_3 / I_{3H} = 223 / 5,65 = 39,45$$

$$R_H = U_3 / I_{3H} = 354 / 5,65 = 62,675$$

$$R_H = U_3 / I_{3H} = 485,5 / 5,65 = 85,894$$

Суммарное сопротивление также определяется для трех значений  $K_K = 0,99; 1,0; 1,01$

$$R_{\Sigma} = R_{Я} + R_K + R_{Щ} = 1,38888 + 1,4384 + 0,3538 + 39,45 = 42,63$$

$$R_{\Sigma} = R_{Я} + R_K + R_{Щ} = 1,38888 + 1,4384 + 0,3538 + 62,675 = 65,856$$

$$R_{\Sigma} = R_{Я} + R_K + R_{Щ} = 1,38888 + 1,4384 + 0,3538 + 85,894 = 89,075$$

Сопротивление обмотки управления, приведенное к  $75^{\circ}\text{C}$ :

$$R_1 = R_{1\ 15^{\circ}}(235 + 75) / (235 + 15) = 5270$$

Коэффициент усиления вычисляем для  $K_K = 0,99; 1,0; 1,01$

$$K_V = \frac{c \cdot n_H^2}{R + c \cdot n_H^2 \cdot (w_a - K_K w_K)} \cdot \frac{w_1^2 R_H}{R_1} = \frac{55,39 \cdot 10^{-8} \cdot 4000^2 \cdot 4200^2 \cdot 39,45}{42,63 + 23,22 \cdot 5270} = 17770$$

$$K_V = \frac{c \cdot n_H^2}{R_{\Sigma}} \cdot \frac{w_1^2 R_H}{R_1} = \frac{55,39 \cdot 10^{-8} \cdot 4000^2 \cdot 4200^2 \cdot 62,675}{65,856 \cdot 5270} = 28230$$

$$K_V = \frac{c \cdot n_H^2}{R_{\Sigma} - c \cdot n_H^2 \cdot 0,01 w_K} \cdot \frac{w_1^2 R_H}{R_1} = \frac{55,39 \cdot 10^{-8} \cdot 4000^2 \cdot 4200^2 \cdot 85,814}{89,075 - 23,22 \cdot 5270} = 38650$$

## Задача 9

В синхронной передаче использованы синхронизирующиеся датчик и приемник (сельсины). Обмотка индуктора - сосредоточенная катушечная, число полюсов  $2p=2$ . Обмотка якоря - двухслойная трехфазная, число пазов якоря  $z_{Я} = 24$ , число проводников в пазу якоря  $s_{Я} = 82$ , полное сопротивление одной фазы обмотки якоря  $Z = 80 \text{ Ом}$ . Частота сети  $f = 400 \text{ Гц}$ , максимальное значение ЭДС при разомкнутой обмотке якоря  $E = 43 \text{ В}$ . Принять момент трения на валу  $M_{ТР} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Требуется

1. Определить минимальный угол рассогласования в статическом режиме, необходимый для преодоления сопротивления трения на валу приемника (момент сопротивления нагрузки приемника равен нулю).
2. Определить угол рассогласования синхронной передачи в режиме вращения при отношении  $\omega/\omega_1 = 0,12$ , где  $\omega$  - частота вращения ротора,  $\omega_1$  - синхронная частота. Момент сопротивления на валу приемника равен  $M_D = 0,6M_m$ , где  $M_m$  -

максимальный момент сельсина.

### Решение

Общее число проводников

$$N = s_{\text{я}} z_{\text{я}} = 82 \cdot 24 = 1968$$

Число витков обмотки

$$w = N / m = 1968 / 2 \cdot 3 = 328$$

где  $m = 3$  - число фаз обмотки якоря.

Магнитный поток по продольной оси

$$\Phi = \frac{E}{4,44 f w k_{\text{об}}} = \frac{43}{4,44 \cdot 400 \cdot 328 \cdot 0,9} = 8,2 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}$$

где  $k_{\text{об}} \approx 0,9$  - обмоточный коэффициент

Наибольшее значение эффективного тока

$$I = E / Z = 43 / 80 = 0,5375 \text{ А}$$

Наибольшее значение МДС обмотки якоря на два полюса

$$F_m = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} w k_{\text{об}} I = \frac{4 \cdot 1,41}{3,14} 328 \cdot 0,9 \cdot 0,5375 = 285,7 \text{ А}$$

Амплитуда составляющей МДС по поперечной оси

$$F_{qm} = 0,75 F_m = 0,75 \cdot 285,7 = 214,3 \text{ А}$$

Амплитуда синхронизирующего момента

$$M_m = 0,5 \cdot c \cdot F_{qm} \sin \nu = 0,5 \cdot 32,8 \cdot 214,3 \cdot 0,707 \cdot 8,2 \cdot 10^{-5} = 0,204$$

где конструктивная постоянная  $c = pN/60 = 1968/60 = 32,8$

$\nu = 45^\circ$  - угол сдвига по фазе между током и напряжением (определяется параметрами обмотки)

Удельный синхронизирующий момент

$$M_{\text{уд}} = M_m \sin 1^\circ = M_m 0,0175 = 0,0175 \cdot 0,20485 = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}$$

Угол рассогласования в статическом режиме

$$\Theta = \arcsin \frac{M_{\text{мп}}}{M_{\text{уд}}} = \arcsin \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 10^{-3}} = 0,4^\circ$$

Угол рассогласования в динамическом режиме определяем, используя формулу

$$\text{Откуда } \Theta_{\text{д}} = \arcsin \frac{M_{\text{д}}}{M_m \cos(\omega / \omega_1)} = \arcsin \frac{0,6 M_m}{M_m \cos(0,12)} = 37,2^\circ$$