

Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации

Санкт-Петербургская государственная академия
холода и пищевых технологий

Кафедра электротехники

Методические указания
для самостоятельного изучения
дисциплины “Электротехника”
для студентов технологического факультета

Часть III

Санкт-Петербург 1998

УДК 621.3

Афанасьева Н. А., Барщевский Г. Г. Методические указания для самостоятельного изучения дисциплины “Электротехника” для студентов технологического факультета. Ч. III. – СПб.: СПбГАХПТ, 1998. – 44 с.

В третьей части методических указаний даются теоретические вопросы, посвященные однофазным трансформаторам, трехфазным асинхронным и синхронным двигателям, двигателям постоянного тока. Вкратце затрагиваются основные вопросы электропривода промышленных предприятий.

Рецензент

Канд. техн. наук, доц. Ю. А. Усачев

Утверждены советом факультета техники пищевых производств

© Санкт-Петербургская государственная
академия холода и пищевых технологий,
1998

1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

1.1. Назначение, устройство, принцип действия трансформаторов

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте.

На электрических станциях (в месте производства электрической энергии) выгодно повышать напряжение до десятков, сотен тысяч вольт и выше (35, 110, 220, 330, 500, 750 кВ и выше), так как чем выше напряжение, тем меньше ток при той же передаваемой мощности, следовательно, требуется меньшее сечение проводов линии передачи. Далее электрическую энергию передают по проводам к расположенным в районах потребления понижающим подстанциям, где напряжение понижается до 6, 10 кВ. Эти напряжения используются для питания мощных электродвигателей и приемников, а также трансформаторов, понижающих напряжение до 380, 220 В.

Трансформаторы различаются:

по числу фаз

- однофазные,
- трехфазные;

по числу обмоток

- двухобмоточные,
- многообмоточные;

по назначению

- силовые,
- измерительные,
- автотрансформаторы.

Важнейшим свойством трансформатора является возможность передачи энергии при отсутствии электрической связи между обмотками.

Простейший однофазный трансформатор (рис. 1) состоит из сердечника 1 и двух обмоток 2. Сердечники, различающиеся по типу магнитопровода, могут быть стержневые, броневые. Сердечник представляет собой магнитопровод, собранный из листов электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм, изолированных друг от друга. Это делается для снижения вихревых токов и усиления индуктивной связи. Обмотки выполняются из медного провода круглого или прямоугольного сечения. Обмотки изолируют

как от стержня и ярма магнитопровода, так и друг от друга. В качестве изоляции применяются электротехнический картон, специальная бумага или изоляционные лаки.

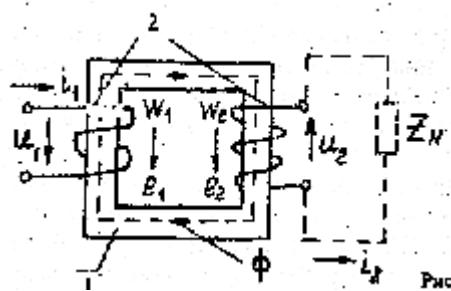


Рис. 1

1 – сердечник; 2 – обмотка с числом витков W_1, W_2

Основным параметром трансформатора является коэффициент трансформации K

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2},$$

где U_1, U_2 – напряжения первичной и вторичной обмоток, W_1, W_2 – число витков (соответственно).

Если $K > 1$ (т.е. $U_1 > U_2$) трансформатор называется понижающим, если $K < 1$ (т.е. $U_1 < U_2$) – повышающим.

Под действием подведенного к первичной обмотке напряжения в ней возникает ток i_1 , который создает переменный магнитный поток Φ_1 . Этот поток, замыкаясь основной своей частью (другая часть рассеивается по воздуху) по магнитопроводу и пересекая обмотки, наводит в последних э.д.с. l_1 и l_2 ; l_1 уравнивает основную часть напряжения u_1 ; l_2 – создает напряжение u_2 на выходных зажимах трансформатора. При замыкании вторичной обмотки на нагрузку Z_n в ней возникает ток i_2 , который создает свой магнитный поток Φ_2 , направленный в противоположную с первичным потоком Φ_1 сторону. В результате наложения потоков Φ_1 и Φ_2 создается общий поток Φ , сцепленный с витками обеих обмоток трансформатора и определяющий в них результирующие э.д.с. l_1 и l_2 . Значения э.д.с., индуцируемые в обмотках, находятся на основании закона электромагнитной индукции

$$l = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Если учесть, что магнитный поток Φ имеет синусоидальную форму, $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ и обозначить амплитудное значение э.д.с. в одном витке как $E_m =$

$\omega\Phi_m$, то получим: $i = E_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$, т.е. индуцируемая э.д.с. отстает от потока на угол $\frac{\pi}{2}$.

После ряда преобразований с учетом числа витков w_1 и w_2 получим действующие значения э.д.с. первичной и вторичной обмоток

$$E_1 = 4,44w_1f\Phi_m, \quad E_2 = 4,44w_2f\Phi_m.$$

Принцип саморегулирования трансформатора

При увеличении тока нагрузки (для активно-индуктивной нагрузки) м.д.с. вторичной обмотки w_2i_2 также увеличится. Эта м.д.с. стремится ослабить поток Φ . Уменьшение потока Φ приводит к уменьшению э.д.с. E_1 , т.е. нарушению электрического равновесия $E_1 = -U_1$, следовательно, к росту тока i_1 в первичной обмотке. Равенство $E_1 = -U_1$ восстанавливается, когда рост м.д.с. w_1i_1 скомпенсирует рост м.д.с. w_2i_2 ; это может быть при увеличении тока i_1 и соответственно росте потока Φ_1 . Таким образом, изменение нагрузки трансформатора, т.е. тока i_2 приводит к соответствующему изменению тока i_1 , так что выполняется закон сохранения энергии и обеспечивается баланс мгновенных мощностей $P_1 = P_2$ или $U_1i_1 = U_2i_2$.

1.2. Уравнения равновесия трансформатора Приведенный трансформатор.

Если учесть потоки рассеяния и считать, что обмотки обладают активным сопротивлением, то получим следующие уравнения равновесия трансформатора:

для первичной обмотки

$$U_1 = -E_1 + jx_{1\text{расс}}I_1 + R_1I_1;$$

для вторичной обмотки

$$U_2 = E_2 - jx_{2\text{расс}}I_2 + R_2I_2,$$

где

$$E_{1\text{расс}} = -jx_{1\text{расс}}I_1;$$

$$E_{2\text{расс}} = -jx_{2\text{расс}}I_2.$$

При исследовании трансформатора для упрощения расчетов и построения его векторных диаграмм пользуются так называемым приведенным трансформатором, в котором число витков вторичной обмотки приво-

дится к числу витков первичной обмотки, тогда условно можно считать, что коэффициент трансформации равен 1. Все параметры приведенного трансформатора пишутся со знаком “1”, т.е. I_2^1 , U_2^1 , R_2^1 , X_2^1 , E_2^1 и т.д. Соотношения между параметрами вторичной обмотки реального и приведенного трансформатора следующие:

$$I_2^1 = \frac{I_2}{K}; E_2^1 = E_2 K; U_2^1 = U_2 R;$$

$$R_2^1 = R_2 K^2; X_2^1 = X_2 K^2; Z_2^1 = Z_2 K^2,$$

где K – коэффициент трансформации реального трансформатора.

Кроме того, для приведенного трансформатора, справедливо соотношение $E_1 = E_2^1$, что очень важно при построении векторной диаграммы нагруженного трансформатора.

1.3. Режим холостого хода трансформатора

Холостым ходом трансформатора называется работа трансформатора без нагрузки, т.е. при разомкнутой вторичной обмотке (ток $I_2 = 0$). По первичной обмотке течет ток холостого хода I_0 , который создает поток Φ_0 .

Зависимость тока холостого хода первичной обмотки от напряжения называется характеристикой холостого хода $I_{10} = f(U_{10})$. Она имеет тот же вид, что и вольтамперная характеристика (ВАХ) любой катушки с магнитопроводом. По виду этой характеристики судят о магнитных свойствах материала сердечника. Обычно при проектировании трансформаторов амплитуду магнитной индукции (B_m) выбирают не более 1,6–1,7 Тл.

Опыт холостого хода проводят при разомкнутой вторичной обмотке; подключают к ней только вольтметр, внутреннее сопротивление которого достаточно велико, и ток по вторичной обмотке не идет (рис. 2).

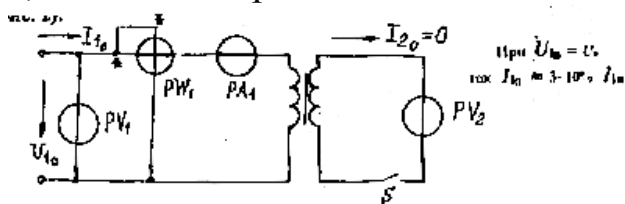


Рис. 2

По показаниям измерительных приборов можно найти коэффициент трансформации трансформатора и мощность потерь в магнитопроводе. Потери в стали – это мощность, идущая на нагревание сердечника, обусловленная, во-первых, мощностью, затраченной на перемагничивание сердечника и, во-вторых, мощностью теряемой в сердечнике из-за наличия вихревых (индукционных) токов в нем. Мощность, затраченная на перемагничи-

вание сердечника, зависит от его материала (трансформаторная сталь, электротехническая сталь, сталь 3 и т.д.), т.е. от формы петли гистерезиса, а мощность, создаваемая вихревыми токами, зависит от формы и конструкции сердечника (стержневой, броневой, тороид и т.д.). Для уменьшения второго типа потерь в стали, сердечник делается не сплошной, а шихтованный с толщиной пластин 0,3–0,5 мм, которые разделены между собой изоляцией. Потери в стали для данного типа трансформатора – величина постоянная и не зависят от нагрузки трансформатора. Тем не менее потери в стали зависят от потока в сердечнике Φ_0 , который создается током I_{10} , а он в свою очередь, зависит от напряжения, подаваемого на первичную обмотку V_{10} . Таким образом, если уменьшать или увеличивать первичное напряжение, то потери в стали тоже будут меняться. Поскольку ваттметр PW_1 определяет всю мощность, забираемую трансформатором из сети (затраченную мощность), полезная работа не совершается ($I_{20} = 0$) и потери в меди очень малы $P_M = I^2 R$, то можно считать, что показание ваттметра – это и есть потери в стали – $P_{ст}$, так как

$$P_1 = P_M + P_{ст}$$

$$\parallel \quad |$$

$$0 \text{ малы}$$

Векторная диаграмма представлена на рис. 3.

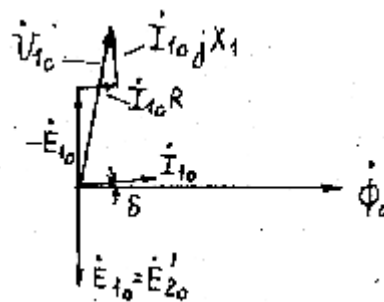


Рис. 3

Уравнение равновесия для режима холостого хода

$$U_{10} = -E_{10} + I_{10} R + j I_{10} X_1;$$

$$U_{20} = -E_{20}^1,$$

где $-E_{20}^1$ – приведенное значение э.д.с. вторичной обмотки трансформатора; δ – угол магнитных потерь, зависящий от материала сердечника.

Значительное увеличение напряжения холостого хода недопустимо, так как вследствие насыщения может сильно увеличиться ток холостого хода. Обычно V_{10} не должно быть больше $1,1 U_{1н о м}$

1.4. Режим короткого замыкания трансформатора

Режим короткого замыкания трансформатора – это аварийный режим, так как при коротком замыкании вторичной обмотки ток в ней очень большой, это может привести к сильному перегреву сердечника и вызвать его разрушение.

Опыт короткого замыкания трансформатора проводят при **пониженном напряжении** на первичной обмотке и короткозамкнутой вторичной обмотке. Условие проведения опыта – напряжение (U_1) первичной обмотки должно быть 5–10% от $V_{1н.о.м.}$, а ток вторичной обмотки не должен превышать $I_{2н.о.м.}$ (рис. 4).

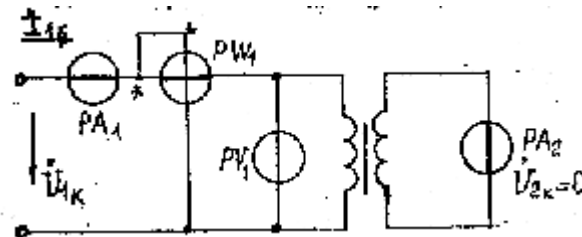


Рис. 4

Уравнение равновесия

$$E_{2к} = -(R_2 + jX_2) I_{2к}$$

Действительно значение $E_{2к}$ составляет 2–5% от E_2 в рабочем режиме, поток в сердечнике Φ_k при этом уменьшается пропорционально $E_{2к}$, а, следовательно, и мощность потерь в магнитопроводе (потери в стали), которая пропорциональна Φ^2 . Поэтому потерями в стали в опыте короткого замыкания можно пренебречь, а учитывая, что потери в меди обмоток пропорциональны квадрату тока в них ($P_k = R_1 I_{1к}^2 + R_2 I_{2к}^2$, т.е. достаточно велики, можно считать, что ваттметром PW_1 измеряется мощность потерь в обмотках – потери в меди.

Если R_k – активное сопротивление при коротком замыкании, то

$$P_k = R_k I_{1н.о.м.}^2; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{\left(\frac{V_{1к}}{I_{1к}}\right)^2 - R_k^2}.$$

Зная величины R_k , X_k , Z_k , можно определить активную и индуктивную составляющие напряжения короткого замыкания ($U_{ка}$ и $U_{кр}$). Значения R_k и X_k очень важны при расчете трансформатора: необходимо обеспечить минимальные размеры трансформатора, для этого конструкторы выбирают такие плотность тока в проводах и индукцию в магнитопроводе, которые соответствовали бы предельно допустимой температуре нагревания при работе трансформатора.

Напряжение короткого замыкания очень важный параметр, который должен указываться на щитке трансформатора и в его паспорте.

1.5. Режим работы трансформатора под нагрузкой

Режим работы трансформатора под нагрузкой – это режим работы трансформатора, при котором на его вторичную обмотку подключается потребитель с изменяющейся величиной тока (рис. 5).

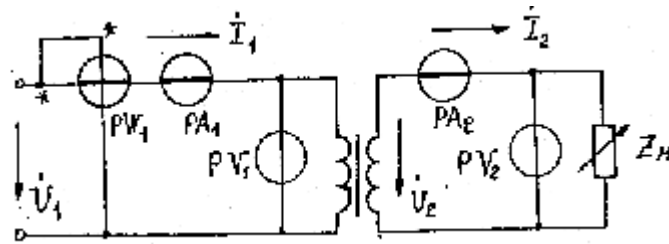


Рис. 5

При работе трансформатора под нагрузкой различают два режима:
– номинальный режим, когда

$$U_1 = U_{\text{н о м}}; I_1 = I_{\text{н о м}};$$

– рабочий режим, когда V_1 близко к $V_{\text{н о м}}$, а ток I_1 определяется нагрузкой трансформатора.

Уравнение равновесия трансформатора

$$U_1 = -E_1 + I_1 R + jI_1 X_1;$$

(1)

$$U_2^1 = E_2^1 - I^1 R_2^1 - jI_2^1 X_2^1,$$

где U_2^1 , E_2^1 – приведенные значения напряжения, э.д.с. и тока I_2^1 вторичной обмотки.

Выведем уравнение намагничивающих сил трансформатора. Если при режиме холостого хода поток в сердечнике

$$\Phi_0 = \frac{I_0 W_1}{R_m},$$

где I_0 – ток холостого хода в первичной обмотке; W_1 – число витков первичной обмотки; R_m – магнитное сопротивление, то при нагрузке

$$\Phi = \frac{I_1 W_1 + I_2 W_2}{R_M},$$

где I_1, W_1 – ток и число витков в первичной обмотке; I_2, W_2 – ток и число витков во вторичной обмотке.

Как уже говорилось, для устойчивой работы трансформатора необходимо, чтобы поток холостого хода всегда равнялся бы потоку в сердечнике при рабочем режиме для любой нагрузки ($\Phi_0 = \Phi$), тогда можно записать

$$I_0 W_1 = I_1 W_1 + I_2 W_2. \quad (2)$$

Если разделить выражение (2) на число витков первичной обмотки W_1 , получим

$$I_0 = I_1 + I_2 \frac{W_2}{W_1},$$

где $\frac{W_2}{W_1}$ – обратная величина коэффициента трансформации.

Тогда

$$I_2 \frac{W_2}{W_1} = I_2^1,$$

где I_2^1 – приведенное значение тока во вторичной обмотке (см. раздел 1.2).

Учитывая вышесказанное, уравнение намагничивающих сил имеет вид

$$I_1 = I_0 - I_2^1. \quad (3)$$

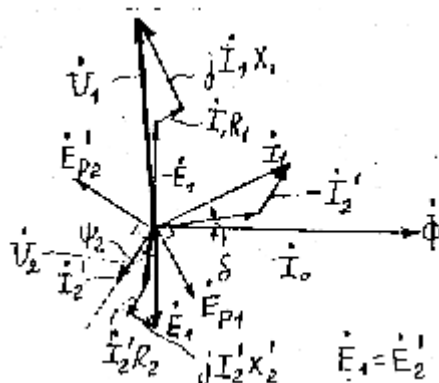
Векторная диаграмма нагруженного трансформатора представлена на рис. 6. Векторная диаграмма строится на основании уравнений (1), (3).

E_{p1}^1, E_{p2}^1 – э.д.с. полей рассеяния.

δ – угол магнитных потерь; ψ_2 – угол, определяющий сдвиг фаз между э.д.с. E_2^1 и током I_2^1

$$\psi_2 = \arctg \frac{X_2^1 + X_H^1}{R_2^1 + R_H^1},$$

где $R_H^1; X_H^1$ – приведенные значения активного и индуктивного сопротивления нагрузки.



1.6. Внешняя характеристика трансформатора. Коэффициент полезного действия трансформатора

Внешняя или вольт-амперная характеристика трансформатора – зависимость напряжения U_2 на выходе трансформатора от тока вторичной обмотки I_2 при постоянном напряжении на входе ($U_1 = \text{const}$) и постоянном коэффициенте мощности нагрузки ($\cos \varphi_{\text{нагр}} = \text{const}$). У реального трансформатора при обычной активно-индуктивной нагрузке напряжение U_2 уменьшается с ростом тока I_2 за счет имеющихся э.д.с. полей рассеяния и падений напряжения на активных сопротивлениях первичной и вторичной обмоток. Однако для различного характера нагрузки ($\varphi > 0$; $\varphi < 0$; $\varphi = 0$) падение напряжения на вторичной обмотке может быть различным. Внешняя характеристика трансформатора представлена на рис. 7а, б. На рис. 7,б представлена внешняя характеристика трансформатора для различного характера нагрузки.

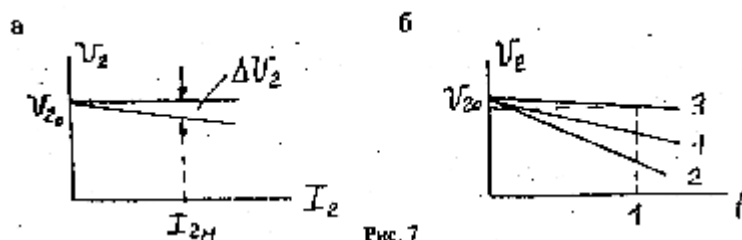


Рис. 7

1 – для активной нагрузки ($\varphi_2 = 0$). 2 – для активно-индуктивной нагрузки ($\varphi_2 < 0$),
3 – для активно-емкостной нагрузки ($\varphi_2 > 0$).

ΔU_2 – потери напряжения в трансформаторе; β – коэффициент загрузки трансформатора

Для обычных трансформаторов коэффициент загрузки берется от 0 до 1,3.

$$\beta = \frac{I_2^1}{I_{2\text{н о м}}^1}.$$

Потери напряжения в трансформаторе зависят как от величины нагрузки (I_2) и ее характера (φ_2), так и от сопротивлений обмоток трансформатора R_k и X_k

$$\Delta U = \beta I_{2 \text{ н о м}}^1 (R_{\text{к}} \cos \varphi_2 + X_{\text{к}} \sin \varphi_2).$$

Потери напряжения удобнее определять в относительных единицах.

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_{1 \text{ н о м}}} \cdot 100 = \beta (U_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}} \sin \varphi_2),$$

где $U_{\text{ка}}$ и $U_{\text{кр}}$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания трансформатора.

Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора (η) – это отношение мощности, потребляемой приемником, к мощности, подводимой к трансформатору от источника электроэнергии

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{м}} + P_{\text{ст}}},$$

где $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ – подводимая к трансформатору мощность; $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ – отдаваемая трансформатором мощность; $P_1 - P_2 = \Delta P$ – потери мощности в трансформаторе.

Обычно потери мощности составляют 1–5% от номинальной мощности. Эти потери разделяются на два вида:

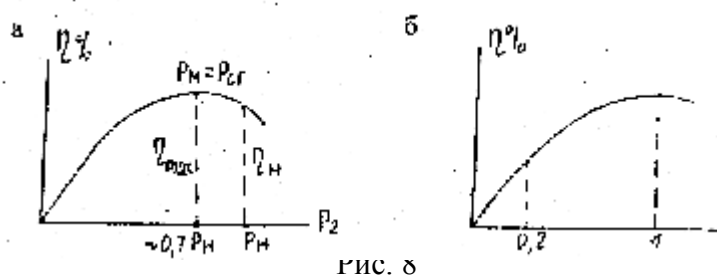
- потери в стали сердечника
- потери в меди обмоток – потери на нагрев.

Потери в стали постоянны для данного типа трансформатора и не зависят от нагрузки. Они зависят от материала (частоты перемагничивания), формы и конструкции сердечника (величина вихревых токов). Для уменьшения потерь в стали сердечник делается шихтованным. У большинства трансформаторов $P_{\text{ст}}$ менее 1% от номинальной мощности. Эти потери определяются опытом холостого хода, и в паспорте трансформатора указывают их номинальное значение. Потери в меди растут с увеличением нагрузки, они пропорциональны квадрату тока в обмотках, определяются опытом короткого замыкания и также указываются в паспорте трансформатора. Если учесть коэффициент загрузки трансформатора β , то коэффициент полезного действия выражается следующей формулой:

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + P_{\text{ст н}} + \beta^2 P_{\text{м н}}}$$

В отличие от других приемников трансформаторы нормируются не по активной, а по полной мощности ($S_n = U_{1n} I_{1n}$), так как размеры трансформатора при данной частоте определяются в основном номинальным напряжением и номинальным током. Номинальный ток определяет сечение проводов обмоток, а от номинального напряжения зависит величина магнитного потока в сердечнике, а следовательно, и размеры магнитопровода.

Кривая к.п.д. трансформатора представлена на рис. 8, а и 8, б.



Падение к.п.д. трансформатора при нагрузке, большей чем $0,7-0,8 P_{2n}$, объясняется значительным увеличением потерь меди обмоток а максимума к.п.д. трансформатора достигает при равенстве потерь в меди и стали. Из зависимости $\eta = f(\beta)$ (рис. 8, б) видно, что к.п.д. трансформатора мало меняется при $0,2 \leq \beta \leq 1$.

У трансформаторов большой мощности к.п.д. достигает 98–99%.

2. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Трехфазный асинхронный двигатель (АД) – это двигатель переменного тока, который преобразует электрическую энергию в механическую посредством создающегося в статоре вращающегося магнитного поля, которое заставляет вращаться ротор, причем частота вращения ротора меньше частоты вращения поля статора.

2.1. Принцип получения вращающегося магнитного поля в статоре АД

В теории электрических машин известно физическое явление, когда можно наблюдать движение магнитного поля, созданного неподвижными контурами с переменными токами: для получения этого явления необходимо определенным образом расположить обмотки с токами, кроме того, токи в обмотках должны иметь временный сдвиг по фазе.

Наиболее часто применяют двухфазные и трехфазные обмотки. Мгновенное распределение токов в проводниках этих обмоток непрерывно смещается в пространстве (вращается или движется прямолинейно). Соответственно суммарное магнитное поле этих потоков будет иметь те же свойства, что и поле движущегося магнита. В большинстве электрических машин пе-

ременного тока вращающее поле токов статора заставляет вращаться ротор. Для усиления поля применяются ферромагнитные материалы, так что между статором и ротором остается минимальный воздушный зазор. Поле в воздушном зазоре играет фундаментальную роль: по распределению магнитной индукции в воздушном зазоре можно рассчитать э.д.с. в обмотках, а также электромагнитные силы, действующие на токи в них.

Трехфазную обмотку в АД выполняют в виде трех групп катушек, смещенных в пространстве на 120° . Обмотки могут быть соединены звездой или треугольником и подключаются к трехфазному источнику э.д.с., где токи в каждой фазе сдвинуты во времени на $2/3$ периода:

$$i_A = I_m \sin \omega t, \quad i_B = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \quad i_C = I_m \sin(\omega t - 4\pi/3).$$

Принцип получения вращающегося магнитного поля поясняется на рис. 9, а и 9,б.

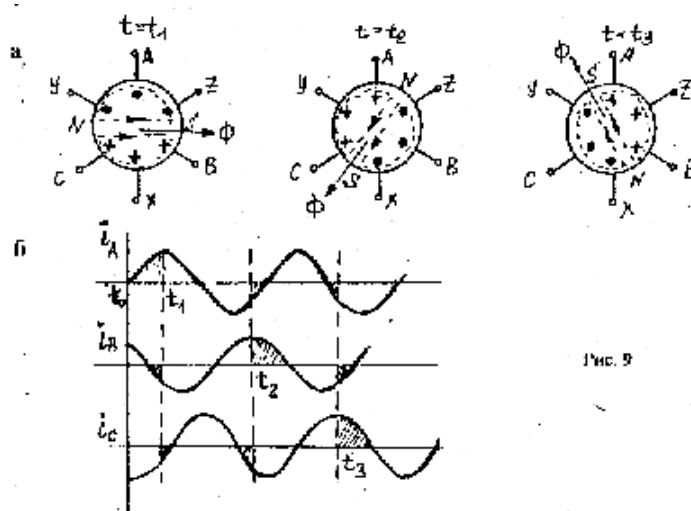


Рис. 9

Ток, проходя по катушке, создает пульсирующее магнитное поле, направление и величина которого определяется направлением и величиной тока. Рассматривая магнитные поля в любые моменты времени — t_0, t_1, t_2, t_3 (рис. 9, а и 9, б), можно заметить, что результирующее поле трех фаз, оставаясь постоянным по величине, непрерывно меняет свое направление (поток Φ на рис. 9, а), т.е. вращается в пространстве. Частота вращения магнитного поля в пространстве зависит от частоты тока. За один период изменения тока поле сделает один полный оборот. Синхронная частота вращения поля для двух полюсов магнита, вращающегося в пространстве, равна: $n_c = 60f$. Если ввести понятие p — число пар полюсов, то угловая скорость поля $\Omega = \frac{\omega}{p}$, где ω — угловая частота тока в обмотке. Если учесть, что $\omega = 2\pi f$, где f —

частота тока в сети, получим $\Omega = \frac{2\pi f}{p}$. Однако $\Omega = 2\pi n$, где n – частота вращения (в оборотах в секунду), тогда $2\pi n = \frac{2\pi f}{p}$, т.е. $n = \text{об/сек}$ или $n = \frac{60f}{p}$ об/мин.

Таким образом, частота вращения поля статора асинхронного двигателя равна: $n_1 = \frac{60f}{p}$.

При определенной схеме соединения проводников обмоток статора токи, протекающие по обмоткам, могут создавать вращающееся магнитное поле, эквивалентное полю четырех ($p = 2$), шести ($p = 3$) и т.д. полюсов магнитов, вращающихся в пространстве. Число пар полюсов АД влияет на частоту вращения поля в пространстве, а следовательно, и на частоту вращения ротора. Если учесть, что стандартная частота тока в сети $f = 50$ Гц и число пар полюсов в АД, как правило, ограничивается $p = 4$, получим следующую таблицу синхронных частот вращающегося магнитного поля в статоре:

p	1	2	3	4	и т.д.
n	3000	1500	1000	750	

Из сказанного можно сделать вывод, что условиями получения вращающегося магнитного поля в статоре АД являются:

- 1) смещение катушек разных фаз на 120° в пространстве;
- 2) сдвиг токов в катушках по фазе, т.е. во времени на $2/3\pi$;
- 3) равенство действующих фазных м.д.с.

В трехфазных асинхронных двигателях число катушек должно быть кратным 3 (3, 6, 9, 12 и т.д.).

2.2. Устройство асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором просты и дешевы в изготовлении, поэтому нашли наибольшее применение в промышленности.

Эти АД состоят из неподвижной части статора и подвижной части ротора, разделенных воздушным зазором (от 0,1 до 1–1,5 мм).

Статор – это цилиндр с пазами, собранный из штампованных пластин электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм. Делается это для умень-

шения потерь в стали. Пазы создают в статоре каналы для укладки проводников обмотки. Пакет пластин статора запрессован в корпус-оболочку, который имеет соединительные элементы (лапы, торцевой фланец и т.д.) для крепления к неподвижному жесткому основанию. Обмотку статора выполняют в виде одно-или многовитковых катушек, имеющих одинаковые размеры. Каждая фаза статорной обмотки состоит из нескольких последовательно включенных катушек (чаще всего берут три катушки, находящиеся в соседних пазах); такая обмотка обеспечивает распределение магнитной индукции, близкое к синусоидальному. Катушки статора питаются от сети трехфазного переменного тока.

Ротор – вращающаяся часть – также набирается из штампованных пластин электротехнической стали, которые запрессовывают на вал, входящий при сборке машины в боковые подшипниковые щиты. Короткозамкнутая обмотка имеет вид беличьего колеса. В пазы ротора заливают алюминий. Стержни обмотки замкнуты по торцам кольцами, которые отливаются одновременно со стержнями. Кроме того, алюминиевая отливка имеет лопасти, обеспечивающие вентиляцию машины. Такие роторы применяются в машинах малой и средней мощности (рис. 10). Условное графическое изображение АД с короткозамкнутым ротором представлено на рис. 11.



Рис. 10



Рис. 11

2.3. Устройство асинхронных двигателей с фазным ротором

АД с фазным ротором дороже и сложнее в изготовлении, поэтому они применяются в приводах достаточно большой мощности (100–200 кВт) или в тех случаях, когда необходимо регулировать частоту вращения двигателя при неизменной нагрузке. Кроме того, АД с фазным ротором имеют улучшенные пусковые характеристики.

Статор – неподвижная часть – устроен так же, как и у АД с короткозамкнутым ротором (см. разд. 2.2).

Ротор – вращающаяся часть – устроен по-иному. В пазы фазного ротора укладываются не стержни, а проводники катушек обмотки. Концы фаз обмотки ротора, соединенные в звезду, выводятся к изолированным друг от друга и от вала двигателя контактными кольцам. По кольцам скользят укрепленные в щеткодержателях щетки, с помощью которых цепь обмотки ротора соединяется с пусковым или регулировочным реостатом, расположенным неподвижно около двигателя. С помощью этого реостата можно регулировать пусковой момент или частоту вращения двигателя, не меняя нагрузки.



Рис. 12

На рис. 12 приведено условное графическое обозначение АД с фазным ротором.

В обоих видах двигателя – с короткозамкнутым или фазным ротором – обмотка ротора от внешнего источника не питается.

2.4. Принцип действия асинхронных двигателей

В статоре АД создается вращающееся магнитное поле. Это поле, пересекая обмотки неподвижного ротора, наводит в них э.д.с. по закону электромагнитной индукции ($e = - \frac{d\Phi}{dt}$), а так как цепь обмотки ротора замкнута,

то в ней появляется ток ($I_2 = \frac{E_2}{Z_2}$, где Z_2 – комплексное сопротивление

обмотки ротора). Ток ротора создает магнитное поле ротора, которое вращается в пространстве с такой же скоростью, как и поле статора. В результате сложения полей статора и ротора в АД создается результирующее магнитное поле. От взаимодействия токов ротора с вращающимся магнитным полем статора возникает вращающий момент, который принуждает ротор вращаться в ту же сторону, что и магнитное поле. Частота вращения, с которой магнитное поле вращается в пространстве, называется синхронной скоростью n_1

$= \frac{60f}{p}$, частота вращения ротора n_2 всегда меньше синхронной частоты

вращающегося поля, она называется асинхронной, т.е. вращение ротора всегда отстает от вращения поля статора. Разность между n_1 и n_2 называется

скоростью скольжения, а отношение $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ называется скольжением.

Скольжение – это основной параметр АД. Чем больше момент сопротивления на валу, тем больше должно быть скольжение. Скольжение может выражаться в процентах или в относительных единицах. При неподвижном роторе, когда $n_2 = 0$, скольжение $S = 1$ (режим пуска АД). Реально, скольжение меняется от 0,02 до 0,8. Обычно АД проектируют так, чтобы при холостом ходе $S_{х.х} = 0,001 \div 0,005$, а при номинальном режиме $S_n = 0,05$.

В зависимости от величины скольжения различают следующие режимы работы АД:

- режим двигателя ($0 < S < 1$) – трехфазная асинхронная машина является преобразователем электрической энергии в механическую,
- режим генератора ($S < 0$) – трехфазная асинхронная машина является преобразователем механической энергии в электрическую,
- режим электромагнитного тормоза ($S > 1$).

Ротор трехфазной асинхронной машины вращается в направлении, противоположном направлению вращения магнитного поля, создаваемого токами в обмотке статора.

Вращающий момент, развиваемый двигателем, также зависит от его скольжения. Скольжение, при котором двигатель развивает максимальный момент, называется **критическим** ($S_{кр}$). Критическое скольжение достигается при противодействующем моменте на валу $M_{пр} \geq M_{max}$ после чего двигатель останавливается. Зависимость момента двигателя от его скольжения описывается формулой Клосса.

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{S_{кр}}{S} + \frac{S}{S_{кр}}},$$

где M_{max} – максимальный момент, который может развить АД; $S_{кр}$ – критическое скольжение; M и S – текущие координаты момента и скольжения.

Графическая зависимость $M_{max} = f(S)$ представлена на рис. 13.

АД обычно проектируют так, чтобы $S_{кр} \approx 0,1$. Электромагнитный момент M_n при $S = 1$, т.е. при $n_2 = 0$, называется пусковым моментом.

Пусковой момент АД так же, как и максимальный, пропорционален квадрату питающего напряжения ($M_n = V_c^2$), поэтому АД весьма чувствителен к снижению питающего напряжения, а при очень малых напряжениях сети двигатель может даже не запуститься. У нормальных двигателей обычно бывает

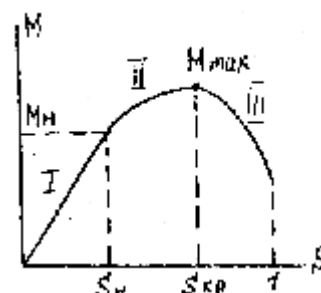


Рис. 13:

I – рабочий режим; II – перегрузка;
III – неустойчивая работа

$$\frac{M_{\max}}{M_n} = 2 - 2,5; \quad \frac{M_{\text{пуск}}}{M_n} = 1,1 \div 1,8.$$

Максимальный момент определяет перегрузочную способность АД. У работающего двигателя динамическое равновесие моментов автоматически восстанавливается при увеличении скольжения, пока тормозной момент на валу меньше максимального момента, развиваемого двигателем. Когда же тормозной момент становится равным максимальному, то при дальнейшем увеличении нагрузки возрастание скольжения будет уменьшать вращающий момент; динамическое равновесие, нарушенное увеличением нагрузки, не восстанавливается, и двигатель останавливается.

2.5. Характеристики асинхронного двигателя

Механические характеристики

Механической характеристикой называется зависимость частоты вращения ротора n_2 от электромагнитного момента при $V_1 = \text{const}$. В установившемся режиме этот момент равен противодействующему моменту рабочего механизма.

Механическую характеристику можно получить из кривой $M_{\max} = f(S)$ используя соотношение $n_2 = n_1(1-S)$. По этому соотношению высчитывается значение частоты вращения ротора n_2 для нескольких значений скольжения ($0 < S < 1$). Для этих же значений скольжения по кривой $M = f(S)$ определяются соответствующие значения моментов M . Синхронная частота вращения n_1 подсчитывается по формуле

$$n_1 = 60f/p,$$

которая для данного типа двигателя является величиной постоянной. Тогда получается механическая характеристика $n = f(M)$, представленная на рис. 14.

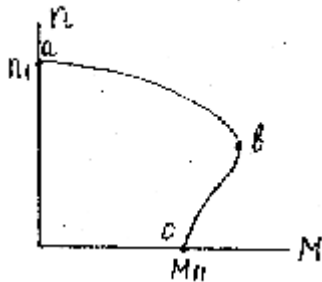


Рис. 14

Участок характеристики $c-b$ соответствует разгону двигателя. В точке b – максимальный момент, до которого разгоняется двигатель. Участок характеристики $a-b$ соответствует установившемуся режиму работы двигателя. Этот участок соответствует устойчивой работе АД, когда $M_{вр} \leq M_{max}$. На установившемся участке как бы ни изменялся тормозной момент рабочего механизма, АД может так изменить свой вращающий момент

($M_{вр}$), что условие его устойчивой работы сохраняется (свойство саморегулирования двигателя). Когда же тормозной момент рабочего механизма станет равным максимальному M_{max} , вращающий момент двигателя начинает уменьшаться и двигатель в конце концов останавливается, поэтому M_{max} иногда называют опрокидывающим моментом.

Механические характеристики могут быть жесткими и мягкими. Жесткая механическая характеристика та, при которой на большом значении изменения момента частота вращения ротора мало меняется.

Мягкая механическая характеристика, – это та при которой на небольшом значении изменения момента частота вращения ротора резко меняется. Жесткость механической характеристики определяется отношением изменения момента на определенном участке к изменению частоты вращения двигателя на этом же участке ($\beta = \frac{\Delta M}{\Delta n}$, рис. 15).

Для АД с фазным ротором наблюдают семейство механических характеристик, соответствующих различным значениям добавочных сопротивлений пускового реостата, включенного в цепь ротора (см. рис. 15). Механическая характеристика, соответствующая $R_g = 0$, называется **естественной** механической характеристикой. Она соответствует механической характеристике АД с короткозамк-

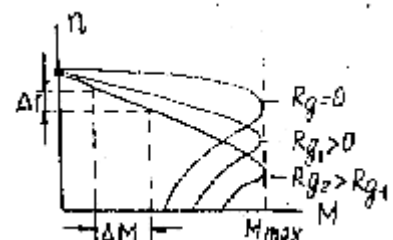


Рис. 15

нутым ротором и является достаточно жесткой. Механические характеристики, соответствующие $Rg > 0$ и $Rg_2 > Rg_1$ называются **искусственными** механическими характеристиками, причем, чем больше значение сопротивления Rg , тем они становятся более мягкими.

Рабочие характеристики АД

Рабочие характеристики двигателя – это зависимость его эксплуатационных параметров (n_2 , $\cos \varphi$, η , M , I_1 , S) от мощности по валу P_2 (полезной мощности). Рабочие характеристики снимаются при постоянном напряжении питания статорной обмотки и постоянной частоте тока в сети ($U_1 = \text{const}$, $f = \text{const}$). Они показаны на рис. 16.

$I_1 - f(P_2)$ – зависимость тока статорной обмотки от полезной мощности. По мере роста нагрузки на валу увеличивается ток статора за счет увеличения его активной составляющей. В режиме холостого хода, когда момент практически равен нулю, ток равен току холостого хода $I_{1xх}$, значение которого зависит от магнитного сопротивления магнитопровода и, в первую очередь, от сопротивления воздушного зазора между статором и ротором, поэтому зазор делается небольшим – десятые доли мм, тем не менее $I_{1xх} \approx (0,2 \div 0,5) I_{1ном}$ в зависимости от мощности АД.

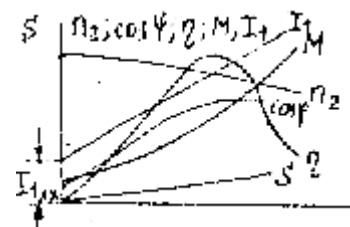


Рис. 16

$\cos \varphi_1 = f(P_2)$; $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{P_1^0 + Q_1^2}$ – зависимость коэффициента мощности статорной обмотки от полезной мощности. При холостом ходе $\cos \varphi_1$ определяется мощностью потерь в магнитопроводе, обычно в этом режиме $\cos \varphi$ достаточно мал (0,2–0,3), поэтому длительная работа АД без нагрузки недопустима. Однако при нагрузке, близкой к номинальной рост $\cos \varphi_1$, замедляется вследствие увеличения реактивной мощности полей рассеяния. Обычно при номинальном режиме $\cos \varphi_1$ АД равен 0,7–0,85.

$n_2 = f(P_2)$ – зависимость частоты вращения ротора от полезной мощности. Характеристика достаточно жесткая и мало отличается от механической характеристики двигателя.

$\eta = f(P_2)$ – зависимость коэффициента полезного действия АД от полезной мощности.

$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{эл.} + \Delta P_{магн.} + \Delta P_{мех}}$

где P_2 – полезная мощность, $\Delta P_{\text{магн.}}$ – потери в стали статора, $\Delta P_{\text{эл.}}$ – электрические потери в меди обмоток, $\Delta P_{\text{мех.}}$ – механические потери, обусловленные трением в подшипниках, несоосностью ротора и статора и т.д. При отсутствии нагрузки $\eta = 0$, с увеличением P_2 η увеличивается, однако при больших нагрузках рост к.п.д. замедляется, затем η начинает уменьшаться за счет увеличения потерь в обмотках, пропорциональных квадрату токов. Асинхронные двигатели рассчитывают так, чтобы максимальный η находился в пределах $0,7-0,8 P_{2н}$;

$M = f(P_2)$ – зависимость вращающего момента АД от полезной мощности. Вращающий момент складывается из полезного момента M_2 и момента холостого хода $M_{х.х.}$, последний затрачивается на покрытие механических потерь, его можно считать постоянным и не зависящим от нагрузки двигателя. Полезный момент $M_2 = \frac{P_2}{\omega_p}$, где ω_p – угловая частота ротора, которая

уменьшается с увеличением полезной мощности P_2 , поэтому M_2 – нелинейна и характеристика $M = f(P_2)$ несколько отклоняется вверх;

$S = f(P_2)$ – зависимость скольжения АД от полезной мощности.

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 1 - \frac{n_2}{n_1}.$$

При холостом ходе, когда $P_2 = 0$, $n_2 \approx n_1$ и скольжение мало отличается от нуля. С увеличением полезной мощности P_2 , частота вращения ротора n_2 несколько уменьшается, а скольжение S увеличивается. При $P_2 = P_{2н о м}$ скольжение $S = 0,03 \div 0,06$.

2.6. Способы пуска асинхронных двигателей

Пусковые свойства АД определяются пусковым током, начальным пусковым моментом, а также плавностью, экономичностью пускового процесса и длительностью пуска.

Для АД с короткозамкнутым ротором существуют следующие способы пуска.

1. Прямой пуск – включение в сеть трехфазного тока обмотки статора. Этот способ простой и быстрый, но применяется только для двигателей, мощность которых относительно невелика сравнительно с мощностью электрической сети. Способ применения в тех случаях, когда не требуется плавности пуска, если же мощность АД соизмерима с мощностью питающей сети, то применяются различные схемы понижения напряжения, подводимого к двигателю при пуске. При этом пусковой ток уменьшается, но понижение напряжения вызывает нежелательное уменьшение пускового момента. При прямом способе пуска АД уменьшение питающего напряжения осуществляется за счет включения в обмотку статора автотрансформатора (рис. 17).

При пуске автотрансформатор полностью введен, по мере разгона двигателя автотрансформатор выводится вручную или автоматически. Это способ имеет существенные недостатки:

- 1) наличие громоздкого автотрансформатора;
- 2) пусковой момент снижается во столько же раз во сколько снижается и пусковой ток.

2. Переключение АД со звезды на треугольник. При этом пусковой ток уменьшается в три раза, так как уровень снижения напряжения составляет $\sqrt{3}$, а пусковой момент пропорционален квадрату напряжения. После разгона двигателя, обмотку статора необходимо снова переключить на треугольник для увеличения вращающего момента АД. Способ применим для двигателей малой мощности (до 20 кВт).

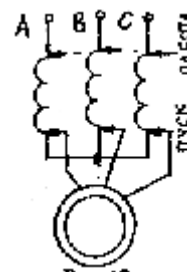


Рис. 17

$$I_{\phi} = \frac{V_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{V_{л}}{\sqrt{3}Z_{\phi}}; \quad I_{\phi\Delta} = \frac{V_{\phi\Delta}}{Z_{\phi}} = \frac{V_{л\Delta}}{Z_{\phi}}.$$

$$I_{л} = I_{\phi}; \quad V_{л\lambda} = V_{л\Delta}; \quad I_{л\Delta} = \sqrt{3} I_{\phi\Delta}; \quad I_{сети} = I_{л};$$

$$\frac{I_{л}}{I_{л\Delta}} = \frac{V_{\Delta} \cdot Z_{\phi}}{\sqrt{3} Z_{\phi} \sqrt{3} V_{л\Delta}} = \frac{1}{3}.$$

3. Включение в обмотку статора элементов с активным или индуктивным сопротивлением (рис. 18). В момент пуска R или L введены полностью, а после окончания пуска они шунтируются вручную или автоматически. Эта схема дешевле и проще, чем пуск с помощью автотрансформаторов.

Для пуска асинхронных двигателей с фазным ротором применяется способ введения в цепь ротора пусковых реостатов (рис. 19).

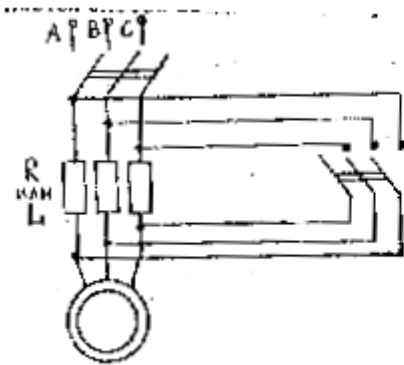


Рис. 18

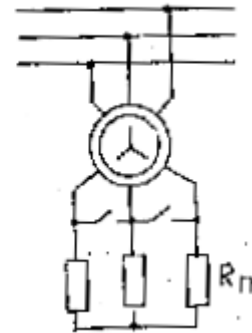


Рис. 19

Пусковой реостат R_n подключается через меднографитовые щетки к контактному кольцам, расположенным на валу ротора. При этом пусковой ток уменьшается, а пусковой момент возрастает. По мере разгона АД пусковой реостат закорачивается вручную или автоматически, двигатель переходит на работу по естественной механической характеристике. Преимущества этого способа пуска – плавный и быстрый пуск при достаточно большом моменте и малом пусковом токе, поэтому АД с фазным ротором применяются в установках с тяжелыми условиями пуска (например: подъемные краны, лебедка, лифты).

Реверсирование АД – изменение направления вращения. Реверсирование осуществляется путем изменения порядка следования двух фаз, в обмотках статора, при этом меняется порядок чередования тока в фазах, что вызывает изменение направления вращения поля статора, приводящего к изменению вращения АД (рис. 20).

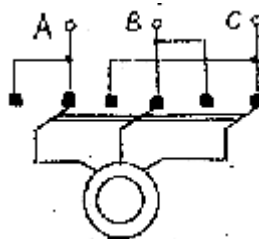


Рис. 20

2.7. Регулирование частоты вращения АД

Частота вращения ротора АД определяется выражением: $n_2 = (1-S) n_1$. Исходя из этого выражения можно осуществить три вида регулирования частоты вращения АД ($n_1 = \frac{60f}{P}$).

1. Полюсное регулирование – изменение числа пар полюсов АД (P). Переключая катушки обмотки статора на каждой фазе (последовательно или параллельно), можно изменить число полюсов статорного поля. Двигатели, в которых технологически предусмотрено это переключение, называются многоскоростными, в них осуществляется ступенчатое регулирование частоты вращения.

2. Частотное регулирование – изменение частоты (f) питающего тока в обмотках статора. Этот вид регулирования осуществляется с помощью специальных преобразователей частоты, как правило, тиристорных.

3. Изменение скольжения (S). Изменение скольжения осуществляется изменением нагрузки на двигатель, а следовательно, и его частоты вращения.

4. Для асинхронных двигателей с фазовым ротором применяется **роторное** регулирование частоты вращения. Это достигается путем введения в цепь фазных обмоток ротора регулируемого трехфазного реостата, как при пуске.

3. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

3.1. Назначение и область применения синхронных машин

Синхронные машины – также машины переменного тока, у которых частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора, поэтому скольжение (S) у синхронных машин равно нулю. Синхронные машины обратимы, т.е. они могут быть как двигателями, так и генераторами. Синхронные генераторы являются основными источниками электрической энергии в промышленных сетях электроснабжения, на транспорте, передвижных электростанциях и т.д. Синхронные двигатели (СД) применяются в приводах большой мощности (несколько десятков мегаватт). Синхронные двигатели приводят во вращение насосы, компрессоры, вентиляторы и другие механизмы, работающие с неизменной скоростью. Кроме того, синхронные двигатели используются в качестве синхронных компенсаторов для улучшения коэффициента мощности предприятия, так как они могут работать в отличие

от асинхронных двигателей с различной реактивной мощностью – индуктивной или емкостной. Компенсаторы работают в режиме холостого хода и отдают в сеть только реактивную составляющую мощности, которая необходима для асинхронных двигателей. Специальные СД малой мощности используются в устройствах, где требуется строгое постоянство скорости – например электрочасы, автоматические самопишущие приборы, устройства с программным управлением. Тем не менее в изготовлении синхронные двигатели сложнее, и стоимость их выше.

3.2. Устройство, принцип действия и пуск синхронных двигателей

Синхронный двигатель преобразует электрическую энергию переменного типа в механическую энергию при неизменной частоте вращения ротора, равной частоте вращения магнитного поля статора и не зависящей от нагрузки. СД состоит из неподвижной части статора и подвижной ротора. Статор ничем не отличается от статора асинхронного двигателя, статорная обмотка также подключена к сети трехфазного тока, ротор же на время пуска приводится во вращение с помощью приводного двигателя. На роторе имеется обмотка, которая называется обмоткой возбуждения, она подключена через щетки и контактные кольца к независимому источнику постоянного тока. Ротор бывает явнополюсный и неявнополюсный. Синхронные машины проектируют так, чтобы количество полюсов магнитного поля ротора и магнитного поля статора было одинаковым. Электрическая схема синхронной машины показана на рис. 21.

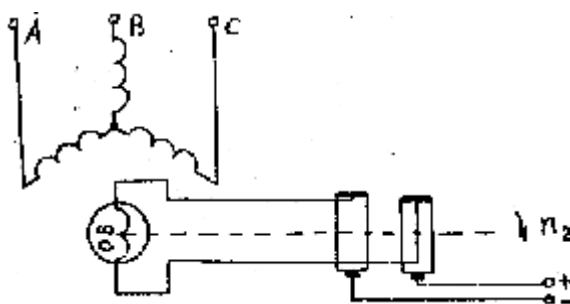


Рис. 21

Если обмотку возбуждения СД подключить к источнику постоянного тока, а статорную обмотку включить в сеть трехфазного тока, то ротор не сдвинется с места, так как возникающее магнитное поле статора будет вращаться с большей скоростью Ω_1 относительно неподвижного пока ротора ($\Omega_2 = 0$). Магнитная индукция статорного поля в точках на поверхности ро-

тора будет изменяться по синусоидальному закону, при этом среднее значение сил воздействия магнитного поля статора на постоянные токи в неподвижном роторе равны нулю. Необходимо заставить ротор вращаться. Существует два способа пуска СД:

1. Синхронный пуск – с помощью дополнительного разгонного двигателя, находящегося на одном валу с ротором СД, заставляют его вращаться. Этот способ осуществляется только при холостом ходе. Мощность разгонного двигателя невелика, она определяется мощностью, необходимой только для вращения ротора СД. Когда условия параллельной работы машины выполнены, обмотку статора СД подключают к сети трехфазного переменного тока. После этого разгонный двигатель отключается и СД вращается с синхронной скоростью.

2. Асинхронный пуск – в ротор СД укладывается специальная пусковая обмотка (короткозамкнутый виток). При пуске обмотку возбуждения СД, находящуюся на роторе, отключают от источника постоянного тока и для безопасности замыкают на резистор ($R = (6-10) R_B$, где R_B – сопротивление обмотки возбуждения). Двигатель становится как бы асинхронным и под действием асинхронного момента скорость ротора удается довести примерно до $0,95 \Omega_1$. После того, как ротор разогнался, обмотку возбуждения снова подключают к источнику постоянного тока. Возникает синхронный электромагнитный момент, машина втягивается в синхронизм, т.е. ротор и поле статора вращаются синхронно ($\Omega_1 = \Omega_2$). При нагрузке на валу в статорной обмотке возникают активные составляющие тока i_{1a} , которые имеют направление, противоположное направлению э.д.с. в роторе. Эти токи создают свое вращающее магнитное поле. В результате воздействия магнитного поля токов i_{1a} на постоянные токи обмотки возбуждения ротора возникает электромагнитный момент, вращающий ротор. Иначе говоря, образование вращающего электромагнитного момента синхронного двигателя, можно рассматривать как результат взаимодействия полюсов двух намагниченных тел – статора и ротора, причем ведущий элемент – полюсы статора, а ведомый – полюсы ротора. Этот вращающий момент уравнивает противодействующий момент рабочего механизма. Равенство моментов двигателя и нагрузки не превышает наибольшего значения момента, который в состоянии развить синхронный двигатель. Если равновесие моментов будет невозможно, то поддержание синхронной скорости вращения ротора нарушается и машина выпадает из синхронизма, скорость машины начинает падать, возникают недопустимые колебания тока и вращающего момента, при этом двигатель надо немедленно отключить.

Уменьшение напряжения в сети, питающей статор, приводит к уменьшению максимального момента, развиваемого двигателем, и к снижению его запаса устойчивости, но соответствующим регулированием тока возбуждения ротора можно восстановить прежнее значение момента M_{\max} . Этим СД выгодно отличается от АД. Недостатки синхронных двигателей – сложность конструкции ротора; необходимость наличия источника постоянного тока; сложность пуска. Поэтому СД целесообразно применять для установок большой мощности $\gg 100$ кВт, работающих в условиях редких пусков.

3.3. V-образная характеристика СД, синхронный компенсатор

Можно рассмотреть режим работы синхронного двигателя, когда тормозной момент на валу M_2 постоянен, а ток возбуждения I_B на роторе меняется. Для СД, у которого частота вращения const, постоянство тормозного момента M_2 означает, что полезная мощность P_2 постоянная, а следовательно, потребляемая из сети мощность P_1 и электромагнитная мощность также постоянные. На этом основании можно построить V-образные характеристики – это зависимость тока статора и коэффициента мощности ($I_1, \cos \varphi$) от тока возбуждения I_B при $M_2 = \text{const}$ и V сети- const. На рис. 22 представлено семейство таких характеристик для разных значений моментов M_2 .

Величина и знак угла сдвига фаз φ между током и напряжением зависят от величины тока возбуждения I_B . Изменяя ток возбуждения синхронного двигателя, можно установить такой режим работы, при котором ток, потребляемый двигателем будет опережать напряжение. При недовозбуждении, т.е. когда $I_B < I_{Bн}$, СД ведет себя как индуктивная нагрузка для сети (потребляет из сети реактивную составляющую), а при перевозбуждении, т.е. когда $I_B > I_{Bн}$, СД ведет себя как емкостная нагрузка для сети (отдает в сеть реактивную составляющую). За счет опережающего емкостного тока осуществляется компенсация коэффициента мощности сети. Это свойство СД используется в синхронных компенсаторах.

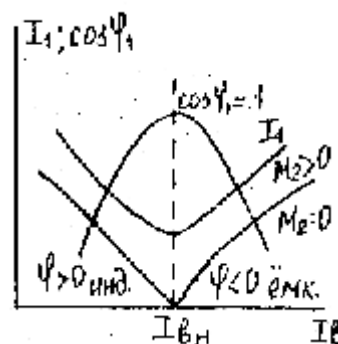


Рис. 22

Синхронный компенсатор

Синхронный компенсатор – это синхронный двигатель облегченной конструкции, работающий в режиме холостого хода при значительном перевозбуждении. Синхронный компенсатор является местным источником реактивной мощности для электроприемников, он освобождает линии передачи большой протяженности от передачи реактивной мощности; устанавливается на крупных подстанциях. Синхронный компенсатор также может стабилизировать напряжение сети: при повышении напряжения сети надо уменьшать ток возбуждения, при понижении напряжения сети – увеличивать ток возбуждения. На рис. 23 показана линия передачи электроэнергии с применением синхронного компенсатора (а) и приведена векторная диаграмма поясняющая его применение (б)

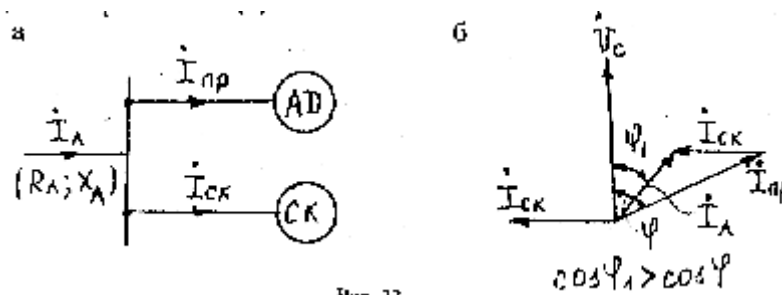


Рис. 23

Рис. 23

4. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1. Назначение и область применения машин постоянного тока

Машины постоянного тока обратимы, т.е. они могут быть как двигателями, так и генераторами. Машины постоянного тока широко применяются в качестве двигателей, реже – в качестве генераторов. Двигатели постоянного тока ДПТ обладают следующими преимуществами:

- 1) возможностью плавного регулирования частоты вращения;
- 2) лучшими пусковыми качествами, т.е. могут развивать большой пусковой момент при относительно небольшом токе.

Благодаря этому их широко используют в качестве тяговых двигателей на электротранспорте. Кроме того, ДПТ являются исполнительными звеньями систем автоматического регулирования. Генераторы напряжением 6–12 применяются для питания электролитических ванн, зарядки аккумуляторных батарей, а напряжением 20–70 В – для высококачественной сварки.

Машины постоянного тока входят в состав автомобильного, судового и самолетного электрооборудования, а также дорожно-строительных машин. Диапазон мощностей МПТ – от единиц ватт до 2000 кВт, частота вращения – от 550 до 2870 об/мин, напряжение – от 6 до 460 В.

4.2. Устройство и принцип действия двигателей постоянного тока

Двигатели постоянного тока состоят из трех основных частей: неподвижная часть – станина с индуктором; вращающаяся часть – якорь; и третья – коллектор, закрепленный на валу якоря и вращающийся вместе с ним.

ИНДУКТОР – система неподвижных электромагнитов (полюсов), установленных по окружности на станине машины, которая состоит из сердечников, полюсных наконечников и обмоток, называемых обмотками возбуждения. Сердечники и полюсные наконечники выполнены из листовой электротехнической стали толщиной 1 мм. Катушки возбуждения соединены последовательно, образуя обмотку возбуждения машины. Станина – литая или сварная – выполнена из чугуна или стали, на ней устанавливаются полюса и подшипниковые щиты, в которых закрепляются подшипники вала якоря. Станина также является ярмом машины, обеспечивающим замкнутость магнитопровода. Назначение индуктора – создавать магнитный поток при пропускании тока по обмотке возбуждения.

ЯКОРЬ состоит из сердечника, вала и обмоток, которые называются обмотками якоря. Сердечник якоря выполнен из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм, из которой штампуют диски с пазами. Диски покрыты изоляционным лаком для уменьшения потерь от вихревых токов. В пазы якоря укладывают обмотки, представляющие собой секции в виде катушек, выполненные из изолированного медного провода. Обмотки бывают петлевые или волновые, катушки могут быть соединены последовательно и параллельно. Назначение якоря – создавать электромагнитный вращающий момент путем взаимодействия тока в обмотке якоря с магнитным полем полюсов, создаваемым током возбуждения.

КОЛЛЕКТОР – цилиндр, состоящий из медных пластин трапециевидальной формы (в виде “ласточкина хвоста”), изолированных друг от друга и от корпуса. Коллектор в собранном виде насаживается на вал якоря. К пластинам коллектора припаивают начала и концы секций обмотки якоря. На коллекторе имеются неподвижные электрографитовые щетки, которые осуществляют соединение обмотки якоря с внешней цепью. Щетки делят замкнутую обмотку якоря на параллельные ветви, число параллельных ветвей равно числу щеток, таким образом, э.д.с. на щетках (э.д.с. машины) равна э.д.с.

одной параллельной ветви. Коллектор является механическим выпрямителем и обеспечивает создание постоянного по знаку вращающего момента путем изменения направления тока в проводниках якорной обмотки, перемещающихся из зоны одного полюса в зону другого.

Обозначение ДПТ на электрических схемах и принцип его действия поясняет рис. 24.

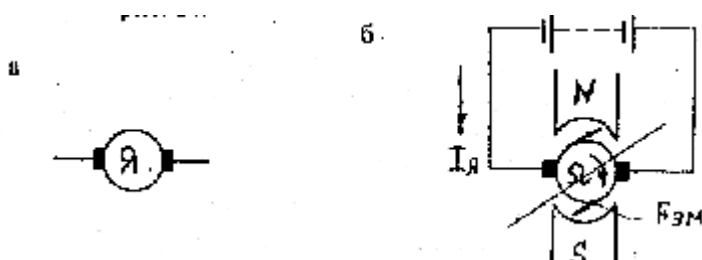


Рис. 24

Напряжение от источника постоянного тока подается на зажимы неподвижного якоря. Пусть направление тока в якоре будет таким, как показано на рис. 24. В обмотку возбуждения, находящуюся на полюсах индуктора также подается постоянный ток, который создает магнитное поле, пронизывающее якорь. Если полюса индуктора выполнены из магнитного материала, то обмотки возбуждения на них может и не быть, магнитное поле все равно будет создаваться противоположно намагниченными полюсами. За счет взаимодействия магнитного поля полюсов и тока ротора образуются электромагнитные силы $F_{эм}$, которые создают вращающий момент:

$$M = C_M \Phi I_a,$$

где C_M – коэффициент пропорциональности; Φ – поток возбуждения ДПТ; I_a – ток якоря ДПТ.

Во вращающемся в магнитном поле якоре ДПТ наводится э.д.с., которая противоположна направлению тока якоря, поэтому эта э.д.с. называется обратной или противоэ.д.с.

$$E = C_E \Phi n,$$

где C_E – коэффициент пропорциональности; Φ – поток возбуждения ДПТ; n – частота вращения ДПТ.

Величина тока якоря определяется разностью между приложенным напряжением сети V_c и э.д.с. E , деленной на сопротивление якорной цепи:

$$I_a = \frac{V - E}{R_a},$$

отсюда можно вывести основное уравнение двигателя

$$V = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}.$$

Подставив в это выражение значение E , получим

$$n = V_{\text{л}\Delta} ;$$

Из этого выражения видно, что частота вращения ДПТ зависит от величины подводимого напряжения, тока возбуждения (потока Φ), сопротивления якорной цепи $R_{\text{я}}$ и нагрузки на валу $I_{\text{я}}$.

4.3. Типы двигателей постоянного тока

По способу соединения обмотки возбуждения и обмотки якоря ДПТ подразделяются на следующие типы:

- ДПТ с независимым возбуждением;
- ДПТ с самовозбуждением.

Последние разделяются на 3 вида:

- ДПТ с последовательным возбуждением;
- ДПТ с параллельным возбуждением;
- ДПТ со смешанным возбуждением.

У ДПТ с независимым возбуждением обмотка возбуждения и обмотка якоря питаются от разных источников (рис. 25, а). У ДПТ с самовозбуждением обмотка возбуждения и обмотка якоря питаются от одного источника. Обмотка возбуждения подсоединенная последовательно к обмотке якоря, называется серийной ($C_1 = C_2$, см. рис. 25, б); обмотка возбуждения, соединенная параллельно с обмоткой якоря, называется шунтовой ($\text{Ш}_1 - \text{Ш}_2$), рис. 25, в); в случае смешанного возбуждения на полюсе имеются две обмотки возбуждения, одна из которых подсоединяется последовательно к обмотке якоря, а другая – параллельно (рис. 25, г)

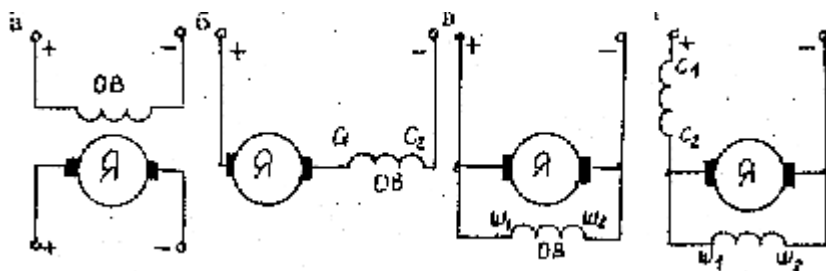


Рис. 25

Двигатели большой мощности обычно выполняют с независимым возбуждением. У двигателей с последовательным возбуждением вращающий момент при нагрузке возрастает больше, чем у двигателей с параллельным возбуждением, при этом частота вращения двигателя уменьшается. Это свойство определяет широкое применение ДПТ в машиностроительных электровозах, городском транспорте. Однако пуск двигателя без нагрузки недопустим, так как частота вращения двигателя может превысить допустимую, это может привести к аварии – двигатель идет “в разнос”. Двигатели с параллельным возбуждением обеспечивают устойчивую частоту вращения при различных нагрузках и возможность плавного регулирования этой частоты вращения. Поэтому ДПТ с параллельным возбуждением применяются для всякого электропривода, требующего постоянства частоты вращения при различных нагрузках и плавного широкого регулирования ее.

Двигатели со смешанным возбуждением устраняют некоторые недостатки, например такому двигателю не угрожает “разнос” по причине наличия параллельной обмотки возбуждения, которая обеспечивает перевод двигателя электропоезда в режим торможения с отдачей энергии в сеть при его движении по инерции (под уклон). ДПТ со смешанным возбуждением имеют наибольший пусковой момент и применяются там, где требуются значительные пусковые моменты или возможны кратковременные перегрузки и большие ускорения – например, для компрессоров. В зависимости от требований параллельная и последовательная обмотки возбуждения могут быть включены “согласно” или “встречно”. При “согласном” включении магнитные потоки обмоток направлены одинаково и складываются, при “встречном” – вычитаются.

4.4. Пуск, реверсирование и регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

ПУСК двигателей постоянного тока длится от долей секунд до нескольких десятков секунд. Пусковые качества характеризуются кратностью пускового тока $(\frac{I_n}{I_H})$ и пускового момента (I_ϕ) . Если не принять мер, то пуск ДПТ может сопровождаться недопустимым броском тока якоря и резким толчком на валу. Такой бросок вызовет искрение на коллекторе и чрезмерно большой пусковой момент $M_n = C_m \Phi I_n; I_n \sqrt{L \lambda} (10 \div 30) I_H$ создающий рывок или удар на валу. Для предотвращения этого давления пуск

ДПТ осуществляется с помощью пускового реостата R_n (см. рис. 25), который можно рассчитать исходя из условия: $I_n = I_{\text{Л}} (2 \div 2,5) I_n$. Бросок

пускового тока в этом случае длится недолго, так как при вращении якоря, появляющаяся противоэ.д.с. уменьшает ток якоря. После осуществления пуска, пусковой реостат должен быть выведен вручную или автоматически. ДПТ малой мощности (до 1 кВт) можно пускать и без пускового реостата, так как они обладают достаточно большим сопротивлением якоря, среди всех других двигателей ДПТ имеют самые лучшие пусковые качества. Они могут развивать пусковой момент $M_n = (2 \div 4) M_n$ при пусковом токе $I_n = (2 \div 2,5) I_n$. Это обеспечивает быстрый разгон приводимых двигателями постоянного тока механизмов. Пусковой реостат выполняется из провода или ленты с высоким удельным сопротивлением, разделенных на секции. Провода присоединяются к медным кнопочным или плоским контактам в местах перехода от одной секции обмотки якоря к другой. По контактам перемещается медная щетка поворотного рычага реостата. Пуск производится при последовательном уменьшении сопротивления реостата путем перевода рычага реостата с одного неподвижного контакта на другой и выключения секций.

На рис. 26 показана схема пуска ДПТ с параллельным возбуждением. В начальный момент пуска пусковой реостат должен быть введен ($R_n = \max$), а реостат в цепи возбуждения выведен ($R_p = 0$). Это необходимо для создания наибольшего магнитного потока при пуске. Пусковые реостаты рассчитаны на 4–6 пусков подряд поэтому необходимо следить, чтобы в конце пуска пусковой реостат R_n был полностью **выведен**.

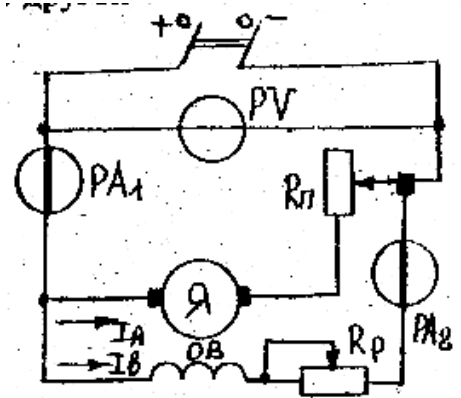


Рис. 26

РЕВЕРСИРОВАНИЕ ДПТ осуществляется путем изменения направления вращающего момента. Это достигается или посредством изменения направления тока якоря, или направления потока полюсов, т.е. тока возбуждения I_b . Обычно реверс ДПТ осуществляется путем переключения концов обмоток якоря.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДПТ. Исходя из основной формулы ДПТ

$$n = \frac{V - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_E \Phi}$$

имеем три способа регулирования.

1. Реостатное регулирование – осуществляется путем изменения суммарного сопротивления цепи якоря и пускового реостата; однако это регулирование неэкономично и применяется для двигателей малой мощности.

2. Полюсное регулирование – осуществляется посредством изменения магнитного потока полюсов Φ с помощью реостата в цепи возбуждения.

3. Якорное регулирование – осуществляется путем изменения напряжения, подводимого к якорю двигателя. Применяется в основном для двигателей с независимым возбуждением и требует наличия специального источника регулируемого напряжения, при этом пускового реостата не требуется, так как пуск осуществляется при малом напряжении. Широко используется в системах автоматического управления.

5. ЭЛЕКТРОПРИВОД

5.1. Понятие об электроприводе. Назначение и область применения

Электропривод – совокупность устройств, приводящих в движение производственные механизмы и установки при помощи электрических двигателей. Даже если для привода применяются неэлектрические двигатели, то все равно энергия для них получается путем преобразования электрической энергии. Это объясняется простотой и легкостью передачи и распределения электрической энергии. Современный электропривод – это электромеханический комплекс, в который кроме электродвигателей и рабочих машин входят устройства передачи движения от двигателя к машине (например, редуктор), преобразователи электроэнергии, а также электрическая аппаратура управления пуском, остановкой и регулирования работы привода. Кроме того, аппаратура управления выполняет защиту электродвигателей от перегрева или отключение их при отклонении условий работы от нормальных. Решение задач электропривода сводится к анализу работы будущего электропривода, технико-экономическому обоснованию выбора типа двигателя, системы управления им, расчету пусковых реостатов, если они есть, и составлению заявки на электрооборудование.

5.2. Механические характеристики и нагрузочные диаграммы

Для выражения заданного технологического процесса необходимо, чтобы вращающий момент двигателя преодолевал бы момент сопротивления производственного механизма, при определенной скорости вращения ($M_{вр} =$

$M_{\text{сопр}}$). Выполнение этого требования возможно только при согласовании механической характеристики электродвигателя и механической характеристики рабочей машины. Механическая характеристика двигателя – это зависимость его частоты вращения от момента, а механическая характеристика производственного механизма (рабочей машины – это зависимость его скорости вращения от значения нагрузочного момента. По виду механической характеристики можно оценить электромеханические свойства электродвигателя, т.е. его пригодность в качестве привода той или иной рабочей машины, так как равенство моментов должно быть при определенной скорости вращения рабочей машины. Такой режим называется установившимся режимом работы. Когда равенство моментов нарушается, агрегат может работать в новом установившемся режиме, но уже при другой скорости, изменение которой допускается в определенных заранее заданных пределах. Для правильной работы электропривода необходимо построить совместную механическую характеристику двигателя и рабочей машины, которая позволяет определить не только скорость, момент и мощность электропривода, но и диапазон регулирования скорости, а также время перехода от одной скорости к другой при пуске, остановке или работе. Механические характеристики производственных механизмов используются для построения нагрузочных диаграмм, которые отражают изменение момента и мощности электропривода во времени. Таким образом, нагрузочная диаграмма – это графическая зависимость момента и мощности от времени работы электропривода. Нагрузочные диаграммы обычно задаются в технической инструкции. Они имеют разнообразный характер, по ним определяют номинальную мощность выбираемого двигателя, сравнивают его пусковой и максимальный моменты с заданными на диаграмме, определяют перегрузочную способность двигателя.

5.3. Основные режимы работы электропривода. Выбор электродвигателей

Различают три основных режима работы электропривода:

- 1) длительный режим с постоянной и переменной нагрузками;
- 2) кратковременный режим;

3) повторно-кратковременный режим. Правильный выбор электродвигателя существенно зависит от режима работы электропривода. Кроме того, надо учитывать что при росте нагрузки температура двигателя, и особенно его изоляции, возрастает и может достигнуть опасных значений, превышающих допустимые, что приведет к перегреву двигателя и даже к его разрушению. Нагрев и охлаждение двигателей тоже зависит от различных ре-

жимов работы электропривода. Для того, чтобы определить номинальную мощность электродвигателя, по которой он выбирается из каталога, надо знать нагрузочную диаграмму для различных режимов, учитывать то, что двигатель должен удовлетворять условиям допустимого нагрева, обладать максимальным моментом, достаточным для преодоления кратковременных перегрузок, а при пуске двигатель должен иметь избыточный пусковой момент для обеспечения разгона.

Длительный режим с постоянной нагрузкой – такой режим, при котором электродвигатель работает достаточно длительное время, при этом нагрузка его не меняется. При этом температура нагрева электродвигателя достигает установившегося значения. Нагрузочная диаграмма этого режима показана на рис. 27.

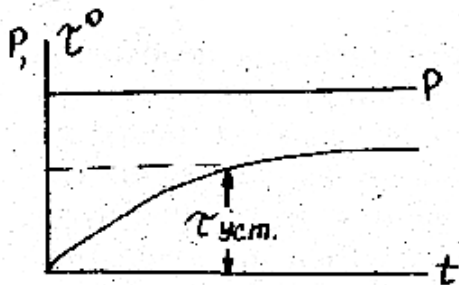


Рис. 27

P – мощность ЭД; τ° – температура нагрева; t – время работы

При этом режиме выбор двигателя сводится к следующему:

1) подсчитывается мощность P_c исполнительного механизма, приведенная к валу электродвигателя с учетом коэффициента полезного действия η ,

$$P_c = P/\eta;$$

2) по полученной мощности P_c в каталогах выбирают двигатель с номинальной мощностью $P_{ном} \geq P_c$. Предполагается, что

предварительно выбраны: род тока, питающего двигатель, напряжение сети, частота вращения и конструктивное исполнение.

Специально тепловой проверки в этом случае не требуется, так как нагрузка постоянная.

Длительный режим с переменной нагрузкой. При этом режиме электродвигатели так же, как и в предыдущем случае, должны работать длительное время, но с переменной во времени нагрузкой. Нагрузочная диаграмма показана на рис. 28.

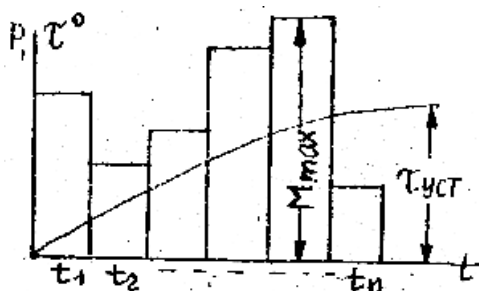


Рис. 28

При этом режиме работают компрессоры, токарные, сверлильные, фрезерные станки и т.д.

На щитке электродвигателей, работающих в этом режиме обычно указывается символом "S₁". Определение номинальной мощности двигателя при этом режиме определяют по методу средних потерь, но чаще всего по методу эквивалентных величин. Нагрузочная диа-

грамма может быть задана не только зависимостью $P = f(t)$, но и зависимостью момента от времени $M = f(t)$. В этом случае подсчитывается эквивалентный момент по следующей формуле:

$$M_{\text{эк}} = \frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i}$$

где $M_1; M_2; \dots M_n$ – значения моментов, взятые из нагрузочной диаграммы, а $t_1 \dots t_n$ – соответствующее этим моментам время.

Аналогичной формулой можно пользоваться при подсчете эквивалентной мощности

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

где $P_1, \dots P_n$ и $t_1 \dots t_2$ – значения мощности и времени, взятые из соответствующей нагрузочной диаграммы. По каталогу выбирается двигатель со значением номинальной мощности $P_n \geq P_{\text{эк}}$. В случае определения эквивалентного момента по его значению определяется расчетная мощность

$$P_p = \frac{M_{\text{эк}} n}{9550}$$

где n – частота вращения (об/мин), взятая из технического задания, 9550 – постоянный переводной коэффициент. Далее по каталогу выбирают двигатель так, чтобы $P_n \geq P_p$, выписывают его номинальные данные: $P_n; n_n; K_M = \frac{M_{\text{max}}}{M_n}$ – коэффициент перегрузки.

Кроме того, надо стараться, чтобы частота вращения n , взятая из технического задания соответствовала бы по значению номинальной частоте вращения двигателя (n_n). Если по тем или иным причинам невозможно вы-

брать $n = n_n$, то приходится ставить редуктор. Далее подсчитывается номинальный момент двигателя по формуле

$$M_n = \frac{P_n 9550}{n_n}.$$

Выбранный для этого режима двигатель обязательно подлежит проверке на перегрузочную способность. Для этого по заданной нагрузочной диаграмме определяют максимальный момент (M_{\max} на рис. 28) и определяют отношение этого момента к номинальному. Полученный коэффициент перегрузки $K_M = \frac{M_{\max}}{M_n}$ должен быть меньше K_{Mn} определенного по каталогу для выбранного двигателя ($K_M \leq K_{Mn}$). Если это условие соблюдается, можно считать, что двигатель выбран правильно, если нет – то приходится выбрать другой, близкий по значению двигатель, и снова делать проверку на перегрузочную способность.

Кратковременный режим – такой режим, при котором двигатель работает ограниченное время с достаточно большими паузами. При этом за время работы двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а во время паузы успевает полностью охладиться. В режиме кратковременной нагрузки работают вспомогательные приводы станков, разводных мостов, шлюзов, задвижек турбо и газопроводов и пр. Крупными сериями эти двигатели не выпускаются. На щитках таких электродвигателей указывается время работы: 15, 30, 60, 90 мин., но чаще всего символ “ S_2 ”. Нагрузочная диаграмма этого режима показана на рисунке 29.

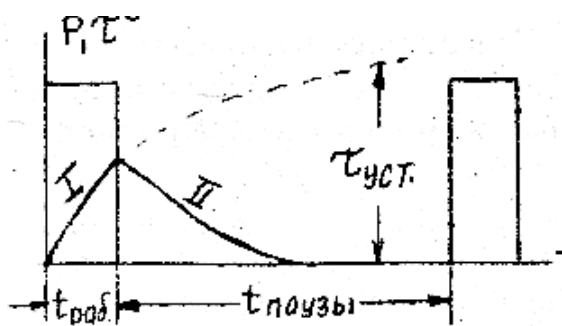


Рис. 29

I – нагрев; II – охлаждение
шала допустимой.

Для этого режима мощность электродвигателя определяют по методу эквивалентных величин с последующим выбором двигателя в специальном каталоге. Иногда можно использовать двигатели длительного режима, которые в течение короткого времени можно перегружать, но так, чтобы температура нагрева не превышала допустимой.

Повторно кратковременный режим – это такой режим, при котором двигатель работает примерно столько же времени, сколько и стоит. Регулярно чередуются кратковременные периоды работы с кратковременными периодами пауз ($t_p = t_n$). При этом в период работы двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а во время

паузы не успевает охладиться до температуры окружающей среды. Перегрев двигателя изменяется по пилообразной ломанной линии, состоящей из отрезков нагревания и охлаждения. Продолжительность цикла ($t_{\text{цикла}} = t_{\text{работы}} + t_{\text{паузы}}$) по ГОСТу не должно превышать 10 мин. При многократном повторении цикла перегрев колеблется около некоторого среднего значения температуры – $\tau_{\text{ср}}$. Нагрузочная диаграмма для этого режима показана на рис. 30.

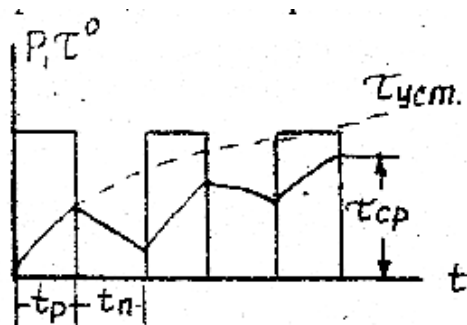


Рис. 30

В этом режиме работают электроприводы подъемных кранов, а также большинство металлорежущих станков. На щитке двигателей для этого режима указывается символ “S₃” и относительная продолжительность включений, выраженная в процентах – ПВ%.

$$\text{ПВ}\% = \frac{t_p}{t_p + t_n} 100 = \frac{t_p}{t_{\text{цикла}}} 100,$$

где t_p – продолжительность работы, t_n – продолжительность паузы. Значения ПВ стандартизированы: 15; 25; 40; 60%. Расчет и выбор электродвигателя производится следующим образом:

- по методу эквивалентных величин определяют $P_{\text{эк}}$ или $M_{\text{эк}}$;
- определяют действительное значение ПВ%.

Если значение ПВ% близко к стандартному, то выбирают двигатель исходя из условия $P_{\text{н}} \geq P_{\text{эк}}$. Если же значение ПВ% сильно отличается от стандартного, то надо пересчитать мощность выбираемого двигателя для ближайшего стандартного ПВ%

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{эк}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{ст}}}}; \quad M_{\text{р}} = M_{\text{эк}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{ст}}}};$$

– далее по каталогу выбирают двигатель с номинальной мощностью при ПВ% стандартном так, чтобы $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{расч}}$. Существуют специальные каталоги для двигателей, используемых в этом режиме, где указываются и стандартные ПВ%.

– выбранный двигатель проверяют на перегрузочную способность так же, как и для длительного режима.

Список литературы

1. **Иванов И. И., Равдоник В. С.** Электроника. М.: Высш. шк., 1984 – 376 с.
2. **Касаткин А. С., Немцов М. В.** Электротехника. М.: Энерго- атом-издат, 1983. – 440 с.
3. **Общая электротехника /Под ред. А. Т. Блажкина.** М.: Энергоатомиздат. Ленигр. отд-ние, 1986. – 592 с.

Содержание

1. ТРАНСФОРМАТОРЫ.....	3
1.1. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ	3
1.2. УРАВНЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИВЕДЕННЫЙ ТРАНСФОРМАТОР.....	5
1.3. РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА	6
1.4. РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА.....	8
1.5. РЕЖИМ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ	9
1.6. ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСФОРМАТОРА. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА	11
2. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ	13
2.1. ПРИНЦИП ПОЛУЧЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СТАТОРЕ АД.....	13
2.2. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ.....	15
2.3. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ	16
2.4. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	17
2.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	19
2.6. СПОСОБЫ ПУСКА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	22
2.7. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АД.....	25
3. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ.....	25
3.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН	25
3.2. УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ПУСК СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	26
3.3. V-ОБРАЗНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СД, СИНХРОННЫЙ КОМПЕНСАТОР.....	28
4. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	29
4.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА	30
4.2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	30
4.3. ТИПЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	32
4.4. ПУСК, РЕВЕРСИРОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	33
5. ЭЛЕКТРОПРИВОД.....	35
5.1. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ.....	35
5.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И НАГРУЗОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ	35
5.3. ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	36
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	41

Афанасьева Наталия Александровна
Барщевский Григорий Григорьевич

Методические указания
для самостоятельного изучения
дисциплины “Электротехника”
для студентов технологического факультета

Часть III

Редактор Т. Г. Смирнова

Корректор Н. И. Михайлова

ЛР № 020414 от 12.02.97

Подписано в печать 31.12.98. Формат 60x84 1/16. Бум. писчая
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,75. Печ. л. 2,56. Уч. -изд. л. 2,5.

Тираж 500 экз. Заказ № С 43

СПбГАХПТ, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9
ИПЦ СПбГАХПТ, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9