

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
Пермский институт железнодорожного транспорта
-филиал федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
(ПИЖТ УрГУПС)

С.Е. Колобов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Пермь
2016

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
Пермский институт железнодорожного транспорта
-филиал федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
(ПИЖТ УрГУПС)

С.Е. Колобов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методическое пособие

Допущено НМС ПИЖТ УрГУПС в качестве методического пособия для
студентов специальностей 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог», 23.05.05
«Системы обеспечения движения поездов» заочной формы обучения

Пермь
2016

УДК 67.05

ББК Ж30

К 61

Колобов С.Е. Электрические машины. Учебно-методическое пособие / ПИЖТ УрГУПС – Пермь, 2016. – 33 с.

Настоящее методическое пособие предназначено для студентов заочной формы обучения направлений подготовки 23.05.03 Подвижной состав железных дорог и 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов, изучающих курс «Электрические машины» для подготовки к экзамену, а так же при выполнении курсовых и контрольных работ.

В методическом пособии представлены теоретические сведения и задания по теории, принципу действия и анализу режимов работы трансформаторов, синхронных и асинхронных машин, приведены примеры решения задач, в конце каждого раздела расположены вопросы для самостоятельного контроля. Для решения представленных задач студенты должны быть предварительно знакомы с законами электродинамики и с методами расчета электрических и магнитных цепей.

Рекомендовано к изданию на заседании кафедры ОПД и СД ПИЖТ (УрГУПС), протокол №10 от 17 июня 2016 г.

Автор: Колобов С.Е., к.т.н., доцент факультета высшего образования Пермского института железнодорожного транспорта.

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электромеханики ПНИПУ Коротаев Александр Дмитриевич;

кандидат технических наук, доцент кафедры общепрофессиональных и специальных дисциплин Погудин Андрей Леонидович

УДК 67.05

ББК Ж 30

Печатается по решению научно-методического совета
Пермского института железнодорожного транспорта

© Колобов С. Е., 2016

© ПИЖТ – филиал ФГБОУ ВО «УрГУПС», 2016

Тема 1. Машины постоянного тока. Трансформатор

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции, поэтому для лучшего понимания необходимо предварительно рассмотреть электромагнитные процессы в катушке со стальным сердечником, включенной в цепь переменного тока. При этом следует выяснить причину наведения ЭДС в катушке и природу потерь мощности в стальном сердечнике, а также научиться пользоваться схемой замещения и векторной диаграммой катушки.

Здесь необходимо обратить особое внимание на формулу действующего значения ЭДС, которую индуцирует в катушке синусоидальный магнитный поток, $E = 4.44f\omega\Phi_m$. Эта формула используется при анализе работы трансформатора и других электрических машин.

При изучении рабочего процесса трансформатора весьма важно уяснить связь между намагничивающими силами (н. с.) первичной и вторичной обмоток и зависимость тока первичной обмотки от нагрузки трансформатора (т. е. от вторичного тока). Считают, что магнитный поток в сердечнике трансформатора, создаваемый обеими н. с. (первичной $I_1\omega_1$ и вторичной $I_2\omega_2$), остается практически постоянным при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной. Вследствие этого результирующая н. с. также остается постоянной и равной, с одной стороны, н. с. холостого хода $I_0\omega_1$ и, с другой стороны, геометрической сумме первичной и вторичной н. с. Именно отсюда следует, что при возрастании нагрузки (вторичного тока) увеличивается и первичный ток.

Остановимся на этом явлении более подробно. При холостом ходе

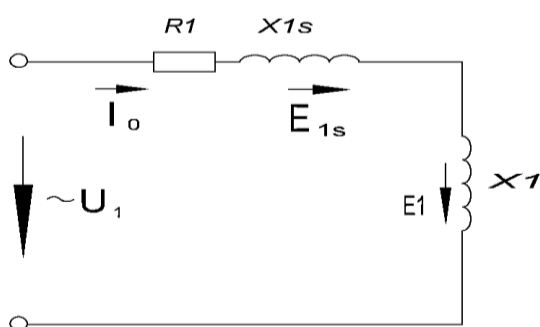


Рис.1

трансформатора (вторичная обмотка разомкнута, ток $I_2 = 0$) под действием приложенного к первичной обмотке напряжения U_1 в ней протекает ток холостого хода I_0 . Цепь первичной обмотки трансформатора обладает активным сопротивлением R_1 и индуктивными сопротивлениями x_1 и x_{1s} . Индуктивные сопротивления характеризуют действующие в первичной обмотке ЭДС E_1 и E_{1s} , возникающие благодаря наличию в сердечнике магнитных потоков Φ_1 и Φ_{1s} , обусловленных намагничивающей силой холостого хода $I_0\omega$.

Таким образом, схема замещения первичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода может быть представлена как последовательное соединение сопротивлений R_1, x_1, x_{1s} . (рис. 1.) При составлении схемы замещения x_1 и x_{1s} вводятся в нее как элементы, обуславливающие действия в них ЭДС самоиндукции, которые показаны на рис. 1 стрелками. Для составленной схемы замещения по второму закону Кирхгофа может быть написано следующие уравнение в векторной форме для действующих значений входящих в нее электрических величин:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_{1s} + \dot{E}_1 = \dot{I}_0 R.$$

ЭДС рассеяния $E_{1s} = 4.44f\omega\Phi_{1sm}$, создаваемая магнитным потоком рассеяния Φ_{1s} , будет несоизмеримо меньше E_1 , поскольку магнитный поток рассеяния при холостом ходе трансформатора составляет лишь примерно 0,25% от рабочего потока Φ . Активное сопротивление обмоток трансформатора, в частности первичной обмотки, так же составляет весьма малую величину, поэтому в уравнение второго закона Кирхгофа для схемы, изображенной на рис. 1, членами \dot{E}_{1s} и $\dot{I}_0 R$ можно пренебречь, тогда $\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = 0$ или $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$, т. е. при холостом ходе трансформатора подведенное к первичной напряжение U_1 уравновешивается ЭДС самоиндукции E_1 этой обмотки. Подчеркнем при этом, что ЭДС обусловлена н. с. $I_0\omega_1$.

При работе трансформатора в нагрузочном режиме под действием ЭДС E_2 во вторичной обмотке будет протекать ток I_2 , следовательно, будет действовать н. с. $I_2\omega_2$. В соответствии с принципом Ленца н. с. $I_2\omega_2$ будет направлена таким образом, чтобы препятствовать причине, ее вызывающей, т. е. будет стремиться ослабить магнитный поток. Реакция н. с. $I_2\omega_2$ будет скомпенсирована за счет возрастания тока в первичной обмотке трансформатора до величины, при которой будет восстановлена н. с. $I_0\omega_1$. Действительно, как было установлено выше, в режиме холостого хода $E_1 \approx U_1$, т. е. ЭДС E_1 полностью уравновешивает приложенное к трансформатору напряжение U_1 , которое не зависит от режима работы трансформатора и остается все время постоянным. Следовательно, и ЭДС E_1 также должна оставаться постоянной, а значит, и магнитный поток Φ , который создает эту ЭДС, должен оставаться постоянным. В свою очередь, постоянство магнитного потока требует сохранения неизменной по величине той н. с., которой этот поток поддерживается, т. е. $I_0\omega_1$. Таким образом, приходим к выводу, что вне зависимости от режима работы трансформатора должно соблюдаться равенство $I_0\omega_1 = \text{const}$.

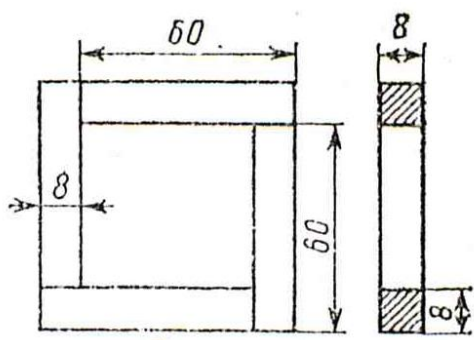


Рис.2

Если учесть, что в нагрузочном режиме трансформатора по первичной обмотке протекает ток I_1 и, следовательно, действует н. с. $I_1\omega_1$, то на основании выше сказанного, можно написать векторное равенство $I_1\omega_1 + I_2\omega_2 = I_0\omega_1 = \text{const}$, называемое уравнение намагничивающих сил.

Важное значение имеют векторная диаграмма и схема замещения трансформатора, позволяющие проследить, в частности, влияние характера нагрузки (т. е. угла сдвига между вторичным напряжением и током, зависящего от

того, является ли цепь нагрузки активной, активно-индуктивной или активно-емкостной) на величину вторичного напряжения трансформатора и на угол сдвига между первичным напряжением и током.

Следует обратить внимание на вопросы, имеющие особое значение с точки зрения практического применения трансформаторов: внешнюю характеристику, КПД, схемы соединения обмоток (для трехфазных трансформаторов), нагрев и охлаждение трансформатора.

Пример 1. На сердечнике (рис. 2), собранный из листовой электротехнической стали с толщиной пластин 0,5 мм, плотностью 7,8 г/см³, надета катушка, состоящая из 280 витков. Катушку включили в сеть переменного тока напряжением 250 В с частотой $f = 50$ Гц. Определить величину тока и коэффициент мощности катушки.

Решение. При решении подобных задач следует пренебрегать активным сопротивлением и потоком рассеяния катушки. При этих условиях можно приближенно считать, что приложенное к катушке напряжение полностью уравновешивается ее ЭДС, т. е.

$$U = E = 4,44f\omega\Phi_M, \text{ откуда}$$

$$\Phi_M = \frac{U}{4,44f\omega} = \frac{250}{4,44 \cdot 50 \cdot 280} = 0,00403 \text{ В} \cdot \text{с} = 40,3 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

При определении максимальной величины индукции в сердечнике следует помнить, что пластины сердечника изолированы друг от друга (при вычислении сечения сердечника это необходимо учитывать). Предположим, что в нашем случае изоляция занимает 10% от площади поперечного сечения сердечника, тогда

$$B_M = \frac{\Phi_M}{0,9S} = \frac{40,3 \cdot 10^{-4}}{0,9 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = 0,7 \text{ Тл}.$$

По кривой намагничивания для электротехнической листовой стали (рис. 3)

находим $H_M = 137 \text{ А/м}$, принимаем $H_M = H_{ст}$.

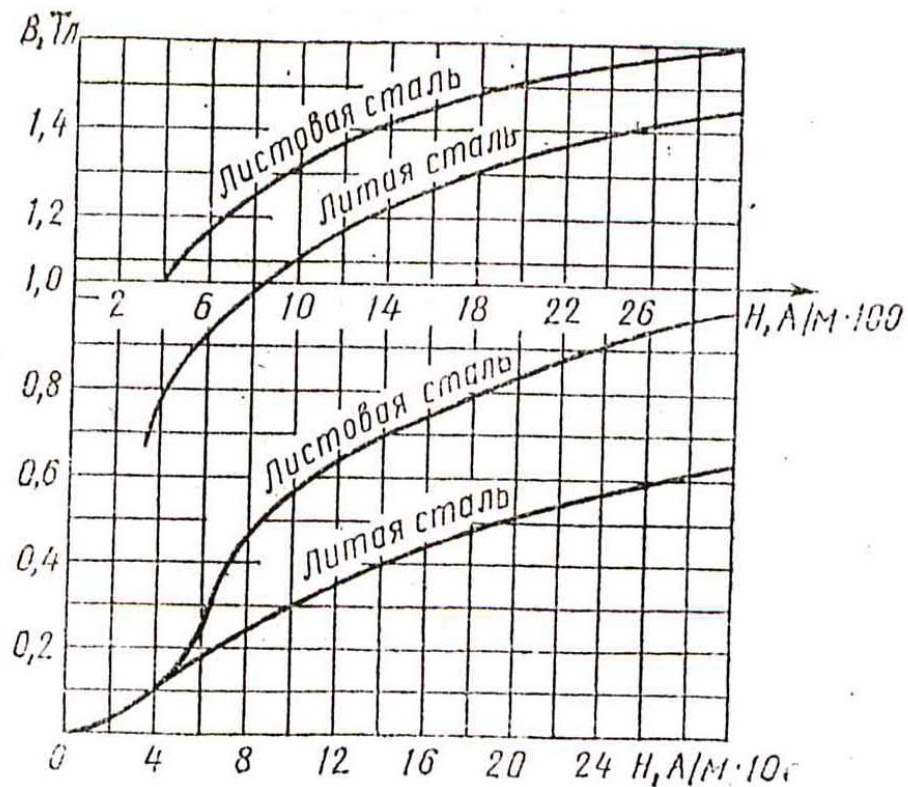


Рис.3

Составим далее уравнение закона полного тока для магнитной цепи:

$$I_{\mu\text{м}}\omega = \sum Hl = H_{ст}l_{ср} + H_0l_0,$$

где $l_{ср}$ - средняя длина линии магнитного поля по сердечнику, l_0 - длина воздушного зазора.

Как видно из рис. 2, сердечник имеет четыре стыка, и несмотря на плотное прилегание пакетов стали сердечника друг к другу, существует воздушный зазор. Величину зазора в каждом стыке примем равной $\delta=0,05 \text{ мм}$, тогда $l_0 = 4\delta = 0,2 \text{ мм}$. Из уравнения закона полного тока определим значение намагничивающего тока в катушке:

$$I_{\mu\text{м}} = \frac{H_{ст}l_{ср} + H_0l_0}{\omega}.$$

Значение H_0 определим из известного соотношения $H_0 = 8 \cdot 10^5 B_0 = 8 \cdot 10^5 \cdot 0,7 = 5,6 \cdot 10^5 \text{ А/м}$, где $B_0 = B_M$. Тогда

$$I_{\mu M} = \frac{137 \cdot 2,4 + 5,6 \cdot 10^5 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{280} = 1,57 \text{ A.}$$

Действующее значение намагничивающего тока

$$I_{\mu} = \frac{I_{\mu M}}{\sqrt{2}} = 1,1 \text{ A}$$

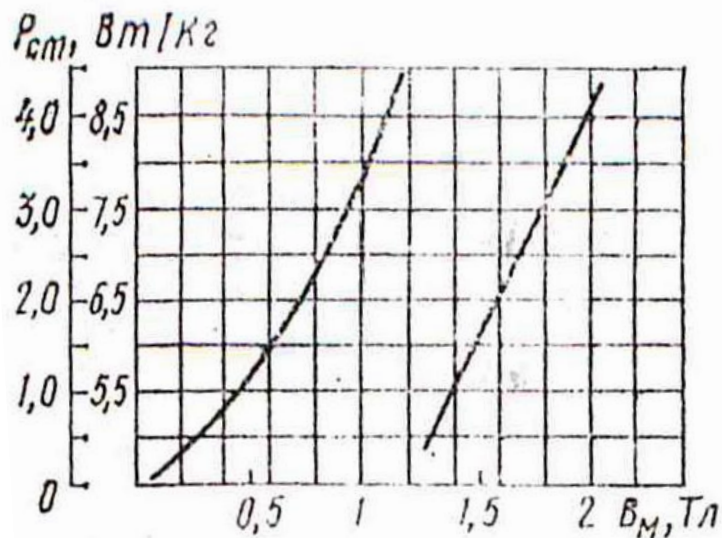


Рис.4

Величина потерь в стали сердечника пропорциональна его массе и зависит от величины индукции. На рис. 4 показаны кривые удельных потерь в электротехнической стали.

Масса стали сердечника

$$m = \frac{0,9 \cdot 64 \cdot 240 \cdot 7,8}{1000} = 107 \text{ кг.}$$

По кривой удельных потерь находим $P_{ст.уд} = 2 \text{ Вт/кг}$, тогда $P_{ст} = 2 \cdot 107 = 214 \text{ Вт}$, так как $P_{ст} = P_{ст.уд} \cdot m$.

Величина тока, обусловленная потерями в стали сердечника,

$$I_{ст} = \frac{P_{ст}}{U} = \frac{214}{250} = 0,85 \text{ A.}$$

Полный ток катушки

$$I = \sqrt{I_{\mu}^2 + I_{\text{CT}}^2} = \sqrt{1,1^2 + 0,85^2} = 1,38\text{А.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{I_{\text{CT}}}{I} = \frac{0,85}{1,38} = 0,615.$$

Пример 2. Трехфазный трансформатор номинальной мощности $S_{\text{H}} = 180 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, Номинальным напряжением $U_{\text{H}} = 6/0,4 \text{ кВ}$ загружен на полную мощность потребителем с коэффициентом мощности $\cos\varphi = 1$. Определить КПД трансформатора при этих условиях, если известны потери холостого хода и короткого замыкания трансформатора, которые равны $P_0 = 1,0 \text{ кВт}$ и $P_{\text{K}} = 4,0 \text{ кВт}$. Каким станет КПД трансформатора, если при номинальной его нагрузки коэффициент мощности потребителя снизится для величины $\cos\varphi=0,75$?

Решение. Величина КПД трансформатора определяется по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{H}} \cos\varphi}{\beta S_{\text{H}} \cos\varphi + P_0 + P_{\text{K}}}, \text{ где } \beta = \frac{S_{\text{нагр}}}{S_{\text{H}}} - \text{коэффициент загрузки трансформатора.}$$

Для нашего случая $S_{\text{нагр}} = S_{\text{H}}$, следовательно $\beta = 1$. Таким образом, КПД трансформатора при $\cos\varphi=1$ определяется следующим образом:

$$\eta_1 = \frac{180 \cdot 1}{180 \cdot 1 + 1 + 4} = 0,973.$$

При $\cos\varphi=0,75$

$$\eta_2 = \frac{180 \cdot 0,75}{180 \cdot 0,75 + 1 + 4} = 0,964.$$

Пример 3. Определить коэффициент трансформации и действующие значения ЭДС E_1 и E_2 обмоток однофазного трансформатора при частоте $f = 100 \text{ Гц}$, если площадь поперечного сечения магнитопровода $S_{\text{c}} = 4 \text{ см}^2$. Амплитудное значение магнитной индукции $B_m = 1 \text{ Тл}$, число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора: $\omega_1 = 250$ и $\omega_2 = 1250$.

Решение. Коэффициент трансформации трансформатора: $n = \omega_1/\omega_2 = E_1/E_2 = 250/1250 = 0,2$.

Амплитудное значение магнитного потока в сердечнике трансформатора:
 $\Phi_m = B_m S_c = 1 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ ($B_m = 1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб/м}^2$); $S_c = 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Действующие значения ЭДС, наводимых в обмотках трансформаторов:
 $E_1 = 4K_\phi f \omega_1 \Phi_m = 4 \cdot 1,11 \cdot 100 \cdot 1250 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 222 \text{ В}$, где K_ϕ - коэффициент формы кривой напряжения

(для синусоидального напряжения $K_\phi = 1,11$).

Пример 4. Трехфазный трансформатор типа ТМ-50/6 имеет номинальную мощность $S_{1\text{ном}} = 50 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, номинальные напряжения $U_{1\text{ном}} = 6000 \text{ В}$ и $U_{2\text{ном}} = 525 \text{ В}$, чистоту питающего напряжения $f = 50 \text{ Гц}$. Определить КПД η трансформатора при коэффициентах загрузки $\beta = 1; 0,75$ и $0,5$ от номинальной ($\cos \varphi_2 = 1,0$), а также коэффициент загрузки β_{max} , при котором КПД имеет максимальное значение η_{max} , если потери холостого хода при номинальном напряжении $P_0 = 350 \text{ Вт}$, а потери короткого замыкания $P_k = 1352 \text{ Вт}$. Построить зависимость изменения КПД от полезной мощности P_2 .

Решение: КПД трансформатора при номинальной нагрузке: $\beta_{\text{ном}} = 1$

$$\eta_{\text{ном}} = \frac{\beta S_{1\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{1\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_x} =$$

$$= \frac{1 \cdot 50 \cdot 1}{1 \cdot 50 \cdot 1 + 0,35 + 1^2 \cdot 1,325} = \frac{50}{51,675} = 0,967$$

или $\eta_{\text{ном}} \% = 96,7\%$;

при $\beta = 0,75$:

$$\eta_{0,75} = \frac{\beta S_{1\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{1\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_x} =$$

$$= \frac{0,75 \cdot 50 \cdot 1}{0,75 \cdot 50 \cdot 1 + 0,35 + 0,75^2 \cdot 1,325} = \frac{37,5}{38,59} = 0,974 \text{ или } \eta_{0,75} \% = 97,4\%$$

$$\eta_{0,5} = \frac{\beta S_{1\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{1\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_x} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot 50 \cdot 1}{0,5 \cdot 50 \cdot 1 + 0,35 + 0,5^2 \cdot 1,325} = \frac{25}{25,68} = 0,973 \text{ или } \eta_{0,5\%} \\ = 97,3\%$$

Нагрузка трансформатора, соответствующая максимальному значению КПД η_{max} трансформатора (принимаяем $P_0 = 2P_M$)

Так как $\cos \varphi_2 = 1$, активная мощность равна полной номинальной мощности трансформатора: $P_{2ном} = S_{1ном} \cos \varphi_2 = S_{ном}$.

Пример 5. Автотрансформатор включен в сеть с номинальным первичным напряжением $U_{1ном} = 127 \text{ В}$ при наличии активной R_H нагрузки ($\cos \varphi_2 = 1$), номинальный ток $I_{2ном} = 4 \text{ А}$ при напряжении $U_{2ном} = 220 \text{ В}$. Определить номинальный ток $I_{1ном}$ первичной цепи автотрансформатора и коэффициент трансформации n , если его КПД $\eta_{ном} = 0,95$, а $\cos \varphi_{1ном} = 0,9$.

Решение:

Активная мощность, отдаваемая автотрансформатором потребителю электроэнергии: $P_{2ном} = U_{2ном} I_{2ном} \cos \varphi_2 = 220 \cdot 4 \cdot 1 = 880 \text{ Вт}$.

Активная мощность, потребляемая автотрансформатором из сети:

$$P_{1ном} = \frac{P_{2ном}}{\eta_{ном}} = \frac{880}{0,95} = 925 \text{ Вт}$$

Номинальный ток в первичной цепи автотрансформатора:

$$I_{1ном} = \frac{P_{1ном}}{U_{1ном} \cos \varphi_{1ном}} = \frac{925}{127 \cdot 0,9} = 8,1 \text{ А},$$

Коэффициент трансформации трансформатора:

$$n = \frac{U_{2ном}}{U_{1ном}} = \frac{220}{127} = \sqrt{3} = 1,73$$

Ток на участке обмотки автотрансформатора, подключенной к нагрузке (влиянием тока холостого хода пренебрегаем): $I_{ном} = I_{1ном} - I_{2ном} \cong I_{1ном} - I_{2ном} = 8,1 - 4 = 4,1 \text{ А}$.

Пример 6. Определить мощность $P_{2ном}$, отдаваемую трансформатором потребителю электроэнергии, суммарные потери мощности $\sum P_{ном}$, электрические $P_{\varepsilon 1ном}$ и $P_{\varepsilon 2ном}$ и магнитные $P_{Mном}$ потери в трансформаторе при номинальном режиме работы. Номинальное линейное напряжение его вторичной обмотки $U_{2ном} = 400 \text{ В}$, линейный ток нагрузки $I_{2ном} = 10 \text{ А}$, линейный ток первичной обмотки $I_{1ном} = 0,2 \text{ А}$, коэффициент мощности $\cos \varphi_{2ном} = 1$, КПД

трансформатора $\eta_{\text{ном}} = 0,9$, активные сопротивления первичной обмотки $R_1 = 200 \text{ Ом}$, вторичной $R_2 = 0,1 \text{ Ом}$. Поток рассеяния и ток холостого хода пренебрегать

Ответ: $P_{2 \text{ ном}} = 4 \text{ кВт}$; $\sum P_{\text{ном}} = 210 \text{ Вт}$; $P_{\Sigma 1 \text{ ном}} = 8 \text{ Вт}$; $P_{\Sigma 2 \text{ ном}} = 10 \text{ Вт}$;
 $P_{\text{М ном}} = 192 \text{ Вт}$.

Пример 7. Обмотки трехфазного трансформатора типа ТМ-100/6 с номинальной мощностью $S_{1 \text{ ном}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ включены по схеме «звезда». Определить коэффициент трансформации n и КПД $\eta_{\text{ном}}$ трансформатора при номинальной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 0,8$). Номинальные линейные напряжения $U_{1 \text{ ном}} = 6 \text{ кВ}$, $U_{2 \text{ ном}} = 0,525 \text{ кВ}$, потери холостого хода при номинальном напряжении $P_0 = 600 \text{ Вт}$, потери короткого замыкания при номинальном токе $P_{\text{к}} = 2400 \text{ Вт}$.

Ответ: $n = 11,4$; $\eta_{\text{ном}} \% = 96,38 \%$.

Пример 8. Определить ток I_1 в линии, если амперметр, включенный в цепь вторичной обмотки трансформатора тока, показывает $I_2 = 4 \text{ А}$, номинальные первичный и вторичный токи трансформатора тока $I_{1 \text{ ном}} = 5 \text{ А}$, $I_{2 \text{ ном}} = 5 \text{ А}$.

Ответ: $I_1 = 40 \text{ А}$.

Вопросы для самоконтроля.

1. Каково назначение трансформаторов?
2. Объясните принцип действия трансформатора.
3. Для чего предназначен опыт холостого хода трансформатора?
4. Выведите соотношение, связывающее коэффициент трансформации с первичной и вторичной ЭДС, напряжениями, токами однофазного трансформатора.
5. Покажите, пользуясь векторной диаграммой, как изменится вторичное напряжение трансформатора при замене индуктивной нагрузки емкостной.

6. Что называется процентным изменением напряжения трансформатора?

7. Пользуясь векторной диаграммой, убедитесь в том, что первичный ток трансформатора возрастает при увеличении вторичного тока. Дайте этому объяснение.

8. Для чего предназначен опыт короткого замыкания трансформатора?

9. Какую наибольшую величину может иметь КПД трансформатора при номинальной нагрузке?

10. Перечислите номинальные данные трансформатора.

11. Перечислите схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора.

12. В каких случаях целесообразно применение автотрансформатора?

Раздел 2. Трансформатор. Асинхронные двигатели

Асинхронные двигатели необходимо изучить с точки зрения правильного их выбора и эксплуатации. Для этого следует знать свойства асинхронных двигателей при различных условиях работы. Эти свойства видны из электромеханических (рабочих) и пусковых характеристик асинхронных двигателей. Для увеличения пускового момента у асинхронных двигателей с фазным ротором применяется включение в цепь ротора добавочных сопротивлений, а короткозамкнутые двигатели чаще всего изготавливаются с глубокопазым или двухклеточным ротором. Изучая механические характеристики асинхронных двигателей и их пусковые свойства, следует выяснить причины, вследствие которых двигатели с добавочным сопротивлением в роторе и двигатели с глубоким пазом или с двойной «беличьей клеткой» имеют при пуске значительно больший момент, чем обычный одноклеточный асинхронный двигатель.

В настоящее время асинхронные двигатели все больше используются для механизмов, требующих регулирования скорости вращения. При изучении способов регулирования скорости вращения асинхронных двигателей следует проанализировать формулу механической характеристики двигателя, из которых вытекают те или иные способы регулирования.

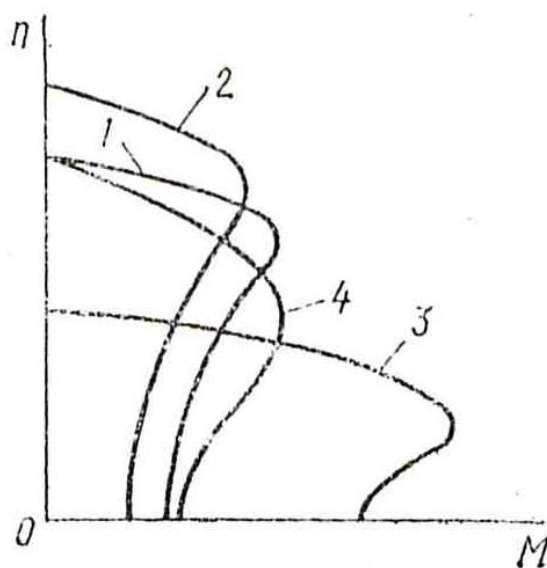


Рис. 5

Изучая способы регулирования скорости вращения ротора, нужно представлять себе вид механических характеристик, соответствующих различным способам регулирования. На рис. 5 изображены такие характеристики: кривая 1 представляет собой основную (естественную) характеристику относительно которой рассматриваются характеристики 2, 3 и 4; характеристика 2 соответствует увеличению частоты напряжения в питающей сети, 3-удвоению числа пар полюсов статора и 4- увеличению сопротивления цепи ротора, что вызывает увеличение скольжения. Изменение величины критического вращающего момента на характеристиках 2 и 3 обусловлено тем, что регулирование скорости предполагается происходящим при постоянстве мощности двигателя. При изучении однофазного асинхронного двигателя надо обратить внимание на получение пускового момента путем создания вращающего магнитного поля с помощью двухфазной системы токов.

После ознакомления с темой «Асинхронные машины» рекомендуется разобрать решение типовых задач.

Пример 1. Определить значения ЭДС E_1 и E_2 , индуцируемых в фазах статора и ротора трехфазного асинхронного электродвигателя, и частоту тока f_2 в роторе при номинальной нагрузке и неподвижном его состоянии. Амплитудное значение магнитного потока двигателя $\Phi_m = 15 \cdot 10^5$ Мкс, числа витков обмоток статора и ротора: $\omega_1 = 200$ и $\omega_2 = 20$, номинальное скольжение ротора $S_{ном} = 0.05$, частота напряжения питающей сети $f_1 = 50$ Гц, числа фаз обмотки статора и ротора: $m_1, m_2 = 3$

Решение:

ЭДС, индуцируемые в обмотках статора двигателя:

$$E_1 = 4.44K_1f\omega_1\Phi_m = 4.44 \cdot 0.94 \cdot 200 \cdot 50 \cdot 15 \cdot 10^5 \cdot 10^{-8} = 625 \text{ В}$$

,где K_1 - обмоточный коэффициент обмотки статора (принимаяем $K_1 = 0,94$; 10^{-8} Мкс = 1 Вб)

ЭДС, индуцируемая в неподвижном роторе двигателя:

$$E_2 = E_1 \frac{m_2 \omega_2 K_2}{m_1 \omega_1 K_1} = 625 \frac{3 \cdot 20 \cdot 0,96}{3 \cdot 200 \cdot 0,94} = 63,8 \text{ В, где } K_2 - \text{ обмоточный}$$

коэффициент обмотки ротора асинхронного двигателя (принимаем $K_2 = 0,96$)

ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора асинхронного двигателя при номинальной нагрузке (при номинальном скольжении ротора $S_{\text{ном}}$) $E_2 = S_{\text{ном}} E_2 = 0,05 \cdot 63,8 = 3,19 \text{ В}$

Частота тока в роторе двигателя при номинальной нагрузке (при $S = S_{\text{ном}}$):
 $f_{2s} = f_1 S_{\text{ном}} = 50 \cdot 0,05 = 2,5 \text{ Гц};$

при неподвижном состоянии ротора (при пуске, т.е. при $S = 1$) $f_{2\text{пуск}} = f_1 S_{\text{пуск}} = 50 \cdot 1 = 50 \text{ Гц}.$

Пример 2 Определить пусковой $M_{\text{пуск}}$ и максимальный M_{max} моменты, а также пусковой ток $I_{1\text{пуск}}$ асинхронного электродвигателя при напряжении на его зажимах, пониженном на 20% от номинального линейного напряжения $U_{1\text{ном}} = 380 \text{ В}$. Номинальная мощность двигателя $P_{2\text{ном}} = 13 \text{ кВт}$, номинальная частота вращения $n_{2\text{ном}} = 1450 \text{ об/мин}$, кратность пускового $M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}} = 1,3$ и максимального $M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}} = 2$ моментов, кратность пускового тока при номинальном напряжении $I_{1\text{пуск}} / I_{1\text{ном}} = 7$, номинальные значения: КПД $\eta_{\text{ном}} = 0,885$ и коэффициент мощности $\varphi_{1\text{ном}} = 0,88$.

Решение:

Номинальный момент на валу асинхронного двигателя: $M_{\text{ном}} = 9550 \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{2\text{ном}}} = 9550 \frac{13}{1450} = 85,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Пусковой момент двигателя: $M_{\text{пуск}} = 1,3 M_{\text{ном}} = 1,3 \cdot 85,6 = 113,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Максимальный момент двигателя: $M_{\text{max}} = 2 M_{\text{ном}} = 2 \cdot 85,6 = 171,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Начальный пусковой момент двигателя при пониженном напряжении (пропорционален квадрату приложенного напряжения U_1):

$$M_{\text{пуск}} = \left(\frac{0,8 U_{1\text{ном}}}{U_1} \right)^2 M_{\text{пуск}} = 0,64 \cdot 113,8 = 88,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Максимальный момент асинхронного двигателя при пониженном напряжении:

$$M_{max} = \left(\frac{0,8U_{1\text{ ном}}}{U_{1\text{ ном}}} \right)^2 M_{max} = 0,64 \cdot 171,2 = 109,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номинальный ток двигателя:

$$I_{1\text{ ном}} = \frac{P_{2\text{ ном}}}{\sqrt{3}U_{1\text{ ном}} \cos \varphi_{1\text{ ном}} \eta_{\text{ ном}}} = \frac{13 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,88 \cdot 0,885} = 25,4 \text{ А.}$$

Пусковой ток двигателя при номинальном напряжении: $I_{1\text{ пуск}} = 7I_{1\text{ ном}} = 7 \cdot 25,4 = 178 \text{ А.}$

Пусковой ток асинхронного двигателя при пониженном напряжении (ток пропорционален приложенному напряжению U_1) $\frac{I_{1\text{ пуск}}}{I_{1\text{ пуск}}} = \frac{0,8U_{1\text{ ном}}}{U_{1\text{ ном}}} = 0,8$, откуда $I_{1\text{ пуск}} = 0,8I_{1\text{ пуск}} = 0,8 \cdot 178 = 143 \text{ А.}$

Пример 3. Для водозаполненного трехфазного асинхронного электродвигателя АПД-136/2 с короткозамкнутым ротором, обмотки статора которого соединены “звездной”, определить в режиме холостого хода коэффициент мощности $\cos \varphi_0$, электрические потери $P_{\Sigma 1}$ в обмотках статора, а также суммарные P_{Σ} , магнитные P_M и механические $P_{\text{мех}}$ потери мощности в двигателе при номинальном напряжении $U_{1\text{ ном}} = 380 \text{ В}$. Ток и мощность холостого хода соответственно составляют $I_0 = 8,8 \text{ А}$, $P_0 = 1072 \text{ Вт}$, активное сопротивление обмотки статора $R_1 = 0,616 \text{ Ом}$.

Решение:

Коэффициент мощности при холостом ходе:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{1\text{ ном}} I_0} = \frac{1072}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 8,8} = 0,186.$$

Электрические потери мощности в обмотках статора при холостом ходе: $P_{\Sigma 1} = 3I_0^2 R_1 = 3 \cdot 8,8^2 \cdot 0,616 = 143 \text{ Вт}$

Суммарные магнитные и механические потери мощности при холостом ходе: $P_{\Sigma} = P_M + P_{\text{мех}} = P_0 - P_{\Sigma 1} = 1072 - 143 = 929 \text{ Вт.}$

Пример 4 По данным опытов холостого хода и короткого замыкания асинхронного электродвигателя АПД-136/2 определить приближенные значения КПД $\eta_{\text{ном}}$ при номинальной нагрузке. Потери мощности холостого хода при номинальном режиме $P_0 = 1072 \text{ Вт}$, мощность короткого замыкания при номинальном токе $P_{\text{к}} = 1700 \text{ Вт}$ (принимается равной суммарным электрическим потерям мощности), номинальная полезная мощность на валу $P_{2 \text{ ном}} = 8003 \text{ Вт}$.
Ответ: $\eta_{\text{ном}} = 74,5$

Пример 5 Определить синхронные частоту вращения n_1 и угловую частоту вращения вращающегося магнитного поля Ω_1 трехфазного асинхронного электродвигателя при частоте переменного тока $f_1 = 50 \text{ Гц}$ для числа пар полюсов $p = 1$. Ответ: $n_1 = 3000 \text{ об/мин}$; $\Omega_1 = 314 \text{ с}^{-1}$

Пример 6 Определить частоту вращения ротора $n_{2 \text{ ном}}$ четырехполюсного ($p = 2$) асинхронного электродвигателя при частоте питающего напряжения $f_1 = 50 \text{ Гц}$ и номинальном скольжении ротора $S_{1 \text{ ном}} = 0,05$. Ответ : $n_{2 \text{ ном}} = 1425 \text{ об/мин}$.

Вопросы для самопроверки

1. Какой формулой выражается зависимость скорости вращения магнитного поля токов статора асинхронного двигателя от числа пар полюсов и частоты напряжения сети?
2. Объясните принцип образования вращающегося магнитного поля с помощью трехфазной системы токов и трех катушек, сдвинутых в пространстве на 120° .
3. Объясните принцип образования вращающегося магнитного поля с помощью двухфазной системы токов и двух катушек, сдвинутых в пространстве на 90° .
4. Поясните, почему ротор асинхронного двигателя вращается со скоростью, меньшей скорости вращения магнитного поля.

5. Каков порядок величины скольжения асинхронного двигателя при его нормальной работе?

6. Как изменяет частота э. д. с. ротора и индуктивное сопротивление его обмотки при переходе от холостого хода к короткому замыканию.

7. Почему относительная величина тока холостого хода у асинхронных двигателей в несколько раз больше, чем у трансформаторов?

8. Какова величина КПД современных асинхронных двигателей?

9. Как изменяется КПД асинхронного двигателя при переходе о холостого хода к полной нагрузке?

10. Как изменяется коэффициент мощности асинхронного двигателя при изменении нагрузки?

11. Изобразите механическую характеристику асинхронного двигателя.

12. В каких случаях применяются двигатели с фазным ротором?

13. Чем объясняется увеличение пускового момента у двигателей с двойной клеткой и глубоким пазом по сравнению с двигателем, имеющим одноклеточный ротор?

14. Как осуществляется реверсирование асинхронных двигателей?

15. Перечислите способы регулирования скорости асинхронных двигателей.

16. В чем состоят недостатки регулирования скорости вращения асинхронного двигателя с фазным ротором путем введения реостата в цепь ротора?

17. Опишите последовательность пуска в ход однофазного асинхронного двигателя.

Синхронные машины

Синхронная машина, присоединенная к сети, может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. В обоих режимах вращения ротора синхронной машины происходит с постоянной скоростью.

Понимание процессов, происходящих в синхронной машине, существенно облегчается, если воспользоваться своего рода механической моделью. Трехфазная система токов в обмотке якоря, вызываемых совместным действием

напряжения в сети и электродвижущей силой, создает вращающееся магнитное поле. Это поле может быть заменено полюсной системой, скользящей вдоль внутренней поверхности статора с постоянной скоростью, равной скорости вращения магнитного поля. Две вращающиеся полюсные системы-ротора и воображаемая, эквивалентная вращающемуся магнитному полю, - неподвижны одна относительно другой. Между ними возникают силы магнитного притяжения, которые могут быть уподоблены упругим связям, соединяющим обе системы. Благодаря этим связям достигается синхронность вращения ротора и магнитного поля. При идеальном холостом ходе синхронной машины оси полюсов обеих полюсных систем лежат на одной прямой. При нагрузке машины оси полюсов расходятся и притом на угол тем больший, чем больше нагрузка машины, воспринимаемая упругими силами. В генераторном режиме ведущим звеном является полюсная система ротора, а ведомым- полюсная система на статоре; в двигательном режиме имеет место обратное. Если будет превышен известный предел нагрузки, то произойдет разрыв упругих связей. После этого скорость вращения ротора становится уже не зависящей от скорости вращения магнитного поля. Это явление называется выпадением из синхронизма. Работа синхронной машины в таком режиме невозможна. Упругие связи между двумя вращающимися полюсными системами могут появиться только в том случае, если обе системы вращаются синхронно, а их полюса расположены надлежащим образом: полюс N одной системы против полюса S другой системы. По этой причине пуск синхронного двигателя не может быть произведен прямым включением в сеть (подобно асинхронному двигателю). Синхронный двигатель пускается, как асинхронный с невозбужденным ротором, и только после достижения ротором скорости, близкой к синхронной, переводится в синхронный режим. Усложнение процесса пуска является существенным недостатком синхронного двигателя.

Очень важную роль в синхронной машине играет реакция якоря, т. е. воздействие намагничивающей силы якоря на основное магнитное поле, создаваемое намагничивающей силой обмотки возбуждения ротора. Как в

трансформаторе, так и в асинхронном двигателе амплитудное значение магнитного потока в синхронной машине задается величиной напряжения в сети. Магнитный поток создается намагничивающей силой, которая складывается из намагничивающей силы обмотки возбуждения и намагничивающей силы обмотки якоря. Для неизменности амплитудного значения магнитного потока необходимо, чтобы результирующая намагничивающая сила также оставалась неизменной. Всякое изменение тока в обмотке возбуждения ротора влечет за собой изменение величины и фазы тока в якоре и соответственное изменение намагничивающей силы якоря. В частности, если вследствие увеличения тока в обмотке возбуждения ЭДС якоря станет (по модулю) больше, чем напряжение в сети (перевозбуждение), то синхронная машина, работающая в режиме двигателя, принуждается к потреблению из сети тока, опережающего по фазе напряжения в сети, иначе говоря, синхронный двигатель в этих условиях представляет собой активно-емкостную нагрузку.

Пример 1. Трехфазный синхронный электродвигатель типа СДН 14-49-6 имеет следующие номинальные данные: активную мощность на валу $P_{2\text{ ном}} = 1000$ кВт, число пар полюсов $p = 3$, отношение максимального момента к номинальному моменту $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,0$, частоту питающего напряжения $f = 50$ Гц. Определить номинальные значения угловой частоты вращения $\Omega_{\text{ном}}$, моменты электродвигателя $M_{\text{ном}}$ и M_{max} , угол рассогласования (нагрузки) $\theta_{\text{ном}}$.

Решение:

Номинальная угловая частота вращения электродвигателя

$$\Omega_{\text{ном}} = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p} = 2 \cdot 3,14 \frac{50}{3} = 104,7 \text{ рад/с}$$

Номинальный момент электродвигателя:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ ном}}}{\Omega_{\text{ном}}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{104,7} = 9,55 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Максимальный момент электродвигателя:

$$M_{\text{max}} = 2M_{\text{ном}} = 2 \cdot 9,55 \cdot 10^3 = 19,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Угол рассогласования при номинальной нагрузке

$$\sin \theta_{\text{НОМ}} = \frac{M_{\text{НОМ}}}{M_{\text{max}}} = \frac{1}{2} = 0,5, \text{ откуда } \theta_{\text{НОМ}} = 30^\circ = \pi/6$$

Пример 2. В электрическую сеть с номинальным напряжением $U_{\text{НОМ}} = 380\text{В}$ включены параллельно три синхронные трехфазные электрические машины типа СМ114-6 с номинальными значениями: полной мощности $S_{\text{НОМ}} = 80 \text{кВ}\cdot\text{А}$, ток якоря $I_{\text{НОМ}} = 122\text{А}$, коэффициента мощности $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$, работающие в режиме генератора. Определить суммарную активную мощность $P_{\Sigma \text{НОМ}}$ отдаваемую синхронными генераторами в сеть в номинальном режиме работы, а также мощности P'_1 и P'_2 отдаваемые в питающую сеть генераторами в случае, если с изменением тока возбуждения и вращающего момента первичного двигателя ток якоря одного генератора возрос на 10% при $\cos \varphi_1 = 0,96$, а ток якоря I_1 другого генератора снизился на 10% при $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Решение.

Мощности, отдаваемые генераторами в питающую сеть в нормальном режиме работы:

$$P_{1 \text{НОМ}} = P_{2 \text{НОМ}} = P_{3 \text{НОМ}} = \sqrt{3} U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 122 \cdot 0,9 = 72,3 \text{ кВт}$$

Суммарная активная мощность, отдаваемая генераторами в питающую сеть в нормальном режиме работы:

$$P_{\Sigma \text{НОМ}} = P_{1 \text{НОМ}} + P_{2 \text{НОМ}} + P_{3 \text{НОМ}} = 3 \cdot 72,3 = 216,9 \text{ кВт}$$

Ток якоря генераторов в режимах, отличающихся от номинального:

$$\text{Первого } I_1 = 1,1 I_{\text{НОМ}} = 1,1 \cdot 122 = 134,1 \text{ А}$$

$$\text{Второго } I_2 = 0,9 I_{\text{НОМ}} = 0,9 \cdot 122 = 109,8 \text{ А}$$

Активная мощность, отдаваемая в питающую сеть перегруженным генератором:

$$P'_1 = \sqrt{3} U_{\text{НОМ}} I_1 \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 134,1 \cdot 0,96 = 86,8 \text{ кВт}$$

Активная мощность, отдаваемая в питающую сеть недогруженным генератором:

$$P'_2 = \sqrt{3}U_{\text{НОМ}}I_2 \cos \varphi_2 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 109,8 \cdot 0,8 = 57,8 \text{ кВт}$$

Пример 3. Определить номинальное значение угловой частоты вращения ротора $\Omega_{1 \text{НОМ}}$, момента на валу $M_{\text{НОМ}}$ и тока $I_{\text{НОМ}}$, потребляемого из питающей сети синхронным электродвигателем типа СД12-24-6, имеющим следующие номинальные данные: активную мощность на валу $P_{2 \text{НОМ}} = 250 \text{ кВт}$, линейное напряжение $U_{\text{НОМ}} = 380 \text{ В}$, коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$, частоту вращения $n_{\text{НОМ}} = 1000 \text{ об/мин}$, КПД $\eta_{\text{НОМ}} = 0,92$. Ответ. $\Omega_{2 \text{НОМ}} = 105 \text{ рад/с}$; $M_{\text{НОМ}} = 2,38 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $I_{\text{НОМ}} = 458 \text{ А}$.

Пример 4. Синхронный электродвигатель типа СД312-46-10А имеет следующие номинальные данные: полную мощность $S_{\text{НОМ}} = 380 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, активную мощность на валу $P_{2 \text{НОМ}} = 320 \text{ кВт}$, КПД $\eta_{\text{НОМ}} = 0,93$, частоту вращения $n_{\text{НОМ}} = 600 \text{ об/мин}$. Определить номинальное значение мощности $P_{1 \text{НОМ}}$, потребляемой двигателем из питающей сети, момента нагрузки на валу $M_{\text{НОМ}}$ и коэффициента мощности $\cos \varphi_{\text{НОМ}}$. Ответ. $P_{1 \text{НОМ}} = 346 \text{ кВт}$; $M_{\text{НОМ}} = 5,1 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$.

Вопросы для самопроверки

1. Какие скорости вращения может иметь ротор синхронной машины при частоте напряжения сети 50 Гц в зависимости от числа пар полюсов статора?
2. Назовите условия, необходимые для получения синусоидальной ЭДС в обмотке якоря синхронного генератора.
3. Объясните, какой будет реакция якоря в синхронном генераторе при активной нагрузке.
4. Объясните, какой будет реакция якоря в синхронном генераторе при индуктивной нагрузке и как она скажется на величине напряжения на зажимах якоря генератора при этой нагрузке по сравнению с ЭДС холостого хода.
5. Как используется синхронный двигатель для улучшения коэффициента мощности потребителя?
6. Опишите способ пуска синхронных двигателей.

Тема 3. Машины постоянного тока

Изучение машины постоянного тока следует начать с устройства и принципа работы. Отличительной частью машины постоянного тока является коллектор. Необходимо усвоить принцип построения обмоток машин постоянного тока, их связь с коллектором и роль коллектора. При изучении реакции якоря машин постоянного тока нужно учесть, что её характер зависит от положения щеток на коллекторе по отношению к геометрической нейтрали. При рассмотрении характеристик генераторов постоянного тока нужно обратить внимание на способы их возбуждения.

Изучая свойства двигателей постоянного тока, надо прежде всего уяснить их отличие от электродвигателей других типов. При этом нужно рассмотреть способы пуска двигателей постоянного тока и методы регулирования их скорости вращения, механические характеристики. Здесь особое внимание следует обратить на механические свойства двигателей постоянного тока. Только понимая эти свойства, можно решить вопрос о пригодности того или иного двигателя постоянного тока для привода определенного механизма. Лишь на основе этих свойств станет понятно, почему для привода металлорежущего станка применяется двигатель с параллельным возбуждением, а для привода подъемного механизма – двигатель с последовательным возбуждением. В противоположность асинхронному двигателю двигатель постоянного тока всегда пускается в ход посредством пускового реостата, ограничивающего величину пускового тока. С другой стороны, двигатель постоянного тока допускает плавное регулирование скорости, а асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором практически допускает лишь ступенчатое регулирование скорости вращения. Эти различия должны учитываться при выборе приводного двигателя для рабочего механизма.

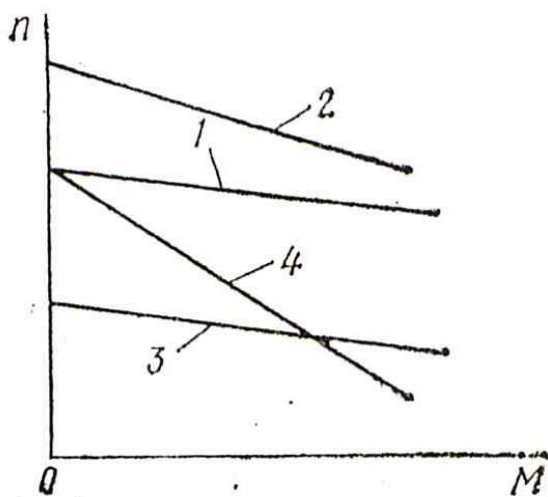


Рис.6

Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением обладает жесткой механической характеристикой, уравнение которой $n = n_0 - bM$, где n – текущее значение скорости, n_0 – скорость идеального холостого хода, M – момент двигателя, b – постоянный коэффициент. Это уравнение соответствует допущению, что магнитный поток остается неизменным при разных нагрузках. Однако при увеличении нагрузки вследствие реакции якоря магнитный поток уменьшается, поэтому механическая характеристика этого двигателя может считаться прямолинейной, если реакцией якоря можно пренебречь по малости ее или если реакция якоря компенсируется.

Двигатель с последовательным возбуждением обладает мягкой механической характеристикой. Если сделать допущение, что магнитный поток пропорционален току, то уравнение механической характеристики примет вид

$$n = \frac{A}{\sqrt{M}} - B,$$

где A и B – постоянные величины, независимые от нагрузки.

Поскольку двигатель постоянного тока допускает плавное регулирование скорости вращения, то возникает вопрос о диапазоне регулирования. Широкий диапазон позволил бы использовать двигатель без применения редуктора, что не только упростило бы передачу, но и улучшило бы работу приводимого механизма. Однако возможность расширения скорости вращения приводит к ухудшению условий коммутации, а уменьшение скорости вызывает увеличение

размеров двигателя, что ведет его к удорожанию. Поэтому обычно $n_{\text{макс}}:n_{\text{мин}} = 2 \div 3$.

Вид механических характеристик двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением при различных способах регулирования скорости изображен на рис. 6. На этом рисунке прямая 1- естественная характеристика; 2- характеристика при включении реостата в цепь обмотки возбуждения; 3- характеристика при уменьшении напряжения; 4- характеристика при включении реостата в цепь якоря.

Для закрепления материала разобрать решение типовых задач.

Пример 1. Электродвигатель постоянного тока типа П62 с параллельным возбуждением имеет номинальные данные: полезная мощность на валу $P_{2 \text{ ном}} = 8$ кВт, напряжение $U_{\text{ном}} = 220$ В, частота вращения $n_{\text{ном}} = 1000$ об/мин, ток, потребляемый из сети, $I_{\text{ном}} = 43$ А. Определить номинальный момент на валу $M_{\text{ном}}$, номинальные суммарные потери мощности $\sum P_{\text{ном}}$ и номинальный КПД $\eta_{\text{ном}}$ электродвигателя при номинальном режиме работы.

Решение: Номинальный момент на валу электродвигателя:

$$M_{\text{ном}} = 9550 \frac{P_{2 \text{ ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9550 \frac{8}{1000} = 76,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номинальная мощность, подведенная к электродвигателю из сети:

$$P_{1 \text{ ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = 220 \cdot 43 = 9460 \text{ Вт} = 9,46 \text{ кВт.}$$

Номинальные суммарные потери мощности электродвигателя:

$$\sum P_{\text{ном}} = P_{1 \text{ ном}} - P_{2 \text{ ном}} = 9,46 - 8,0 = 1,46 \text{ кВт.}$$

Номинальный КПД электродвигателя:

$$\eta_{\text{ном}} = \frac{P_{2 \text{ ном}}}{P_{1 \text{ ном}}} = \frac{8}{9,46} = 0,85 \text{ или } \eta_{\text{ном}} \% = 85\%.$$

Пример 2. Определить номинальное суммарное $\sum P_{\text{э ном}}$ и составляющие электрические потери мощности в электродвигатели типа МП-82 постоянного тока с параллельным возбуждением, имеющим номинальные данные: мощность на валу $P_{2 \text{ ном}} = 130$ кВт, напряжение $U_{\text{ном}} = 220$ В, частоту вращения $n_{\text{ном}} = 600$ об/мин, ток, потребляемый из сети, $I_{\text{ном}} = 640$ А, суммарное сопротивление якорной цепи, обмоток якоря и дополнительных полюсов, щеток и щеточных

контактов: $R'_я = 0,00565$ Ом и сопротивление обмотки возбуждения $R'_в = 34,6$ Ом при температуре 15°C .

Решение.

Сопротивление цепи обмотки якоря при температуре 75°C :
 $R_я = R'_я \frac{235+t_2}{235+t_1} = 0,00565 \frac{235+75}{235+15} = 0,007$ Ом, где $t_1 = 15^\circ\text{C}$ - температура, соответствующая холодному состоянию обмотки якоря; $t_2 = 75^\circ\text{C}$ - температура, соответствующая нагретому состоянию обмотки якоря.

Сопротивление обмотки возбуждения двигателя при температуре 75°C :

$$R_в = R'_в \frac{235+t_2}{235+t_1} = 34,6 \frac{235+75}{235+15} = 43 \text{ Ом.}$$

Номинальный ток в обмотке возбуждения электродвигателя при номинальном режиме работы:

$$I_{в \text{ ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_в} = \frac{220}{43} = 5,1 \text{ А.}$$

Номинальный ток якоря электродвигателя:

$$I_{я \text{ ном}} = I_{\text{ном}} - I_{в \text{ ном}} = 640 - 5,1 = 634,9 \text{ А.}$$

Электрические потери мощности электродвигателя при номинальном режиме работы: в цепи якоря $P_{эя \text{ ном}} = R_я I_{я}^2 = 0,007 \cdot 634,9^2 = 2820$ Вт = 2,82 кВт; в обмотке возбуждения $P_{эв \text{ ном}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{в \text{ ном}} = 220 \cdot 5,1 = 1122$ Вт = 1,122 кВт.

Суммарные номинальные электрические потери мощности: $\sum P_{э \text{ ном}} = P_{я \text{ ном}} + P_{эв \text{ ном}} = 2,82 + 1,122 = 3,942$ кВт.

Пример 3. Электродвигатель постоянного тока с параллельными возбуждениями имеет номинальные: полезную мощность на валу $P_{2 \text{ ном}} = 4,5$ кВт, питающее напряжение $U_{\text{ном}} = 220$ В, частоту вращения $n_{\text{ном}} = 1500$ об/мин, КПД $\eta_{\text{ном}} = 80,5\%$. Сопротивление цепи якоря $R_я = 0,43$ Ом, обмотки возбуждения $R_в = 200$ Ом, при номинальном режиме работы. Определить сопротивление пускового реостата $R_{\text{п}}$ исходя из условия, что

начальный пусковой ток двигателя равен двухкратному номинальному значению тока, потребляемому из сети: $I_{\text{пуск}} = 2I_{\text{ном}}$.

Решение.

Номинальный ток двигателя, потребляемый из сети:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{2 \text{ ном}} \cdot 10^3}{U_{\text{ном}} n_{\text{ном}}} = \frac{4,5 \cdot 10^3}{220 \cdot 0,805} =$$

25,4 А. Номинальный ток возбуждения электродвигателя:

$$I_{\text{в ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{в}}} = \frac{220}{200} = 1,1 \text{ А.}$$

Номинальный ток якоря двигателя: $I_{\text{я ном}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в ном}} = 25,4 - 1,1 = 24,3 \text{ А.}$

Пусковой ток двигателя: $I_{\text{пуск}} = 2I_{\text{ном}} = 2 \cdot 25,4 = 50,8 \text{ А}$

Ток якоря при пуске двигателя: $I_{\text{я}} = I_{\text{пуск}} - I_{\text{в ном}} = 50,8 - 1,1 = 49,7 \text{ А.}$

Сопротивление пускового реостата, включенного последовательно в цепь якоря двигателя при пуске: $R_{\text{п}} = R'_{\text{я}} - R_{\text{я}} = 4,43 - 0,43 = 4 \text{ Ом.}$

Сопротивление цепи якоря двигателя при пуске исходя из заданных условий:

$$R'_{\text{я}} = R_{\text{я}} + R_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{я}}} = \frac{220}{49,7} = 4,43 \text{ Ом}$$

Максимальный ток в цепи якоря электродвигателя при отсутствии пускового реостата:

$$I_{\text{я max}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{я}}} = \frac{220}{0,43} = 510 \text{ А}$$

Кратность пускового тока при прямом пуске (без пускового реостата):

$$K_1 = \frac{I_{\text{я max}}}{I_{\text{я ном}}} = \frac{510}{24,3} = 20,9.$$

Таким образом, начальный пусковой ток якоря электродвигателя без пускового реостата оказывается в 20,9 раз больше номинального его значения, поэтому в данном случае пуск двигателя без пускового реостата в цепи якоря недоступен.

Пример 4. Электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет номинальные данные: питающее напряжение $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, частоту вращения $n_{\text{ном}} = 1500 \text{ об/мин}$, КПД $\eta_{\text{ном}} \% = 80\%$, ток, потребляемый из сети, $I_{\text{ном}} = 25,4 \text{ А}$, противо ЭДС, наводимую в обмотке якоря при номинальном режиме работы, $E_{\text{я ном}} = 209,5 \text{ В}$, сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 200 \text{ Ом}$. Определить номинальные значения: момента $M_{\text{ном}}$ на валу двигателя, тока $I_{\text{я ном}}$ якоря, тока $I_{\text{в ном}}$ возбуждения и сопротивления обмотки якоря $R_{\text{я}}$.

Ответ: $M_{\text{ном}} = 28,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $I_{\text{я ном}} = 24,3 \text{ А}$; $I_{\text{в ном}} = 1,1 \text{ А}$; $R_{\text{я}} = 0,43 \text{ Ом}$.

Пример 5. Электрическая машина постоянного тока, параллельного возбуждения при работе в режиме генератора создает напряжение на зажимах $U_{\text{г}} = 230 \text{ В}$ при токе нагрузки $I_{\text{г}} = 34,8 \text{ А}$ и частоте вращения $n_{\text{г}} = 1950 \text{ об/мин}$. При работе в режиме двигателя при напряжении $U = 220 \text{ В}$ машина потребляет ток $I_{\text{д}} = 34,4 \text{ А}$, частота вращения в режиме двигателя $n_{\text{д}} = 1570 \text{ об/мин}$. Определить сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$ машины. Током возбуждения $I_{\text{в}}$ пренебречь.

Ответ: $R_{\text{я}} = 0,56 \text{ Ом}$.

Пример 6. Построить естественную скоростную характеристику $n(I)$ постоянного тока типа П52 с независимым возбуждением с номинальными: мощностью на валу $P_{2 \text{ ном}} = 14 \text{ кВт}$, питающим напряжением $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, током, потребляемым из сети, $I_{\text{ном}} = 74 \text{ А}$, частотой вращения $n_{\text{ном}} = 3000 \text{ об/мин}$, КПД $\eta_{\text{ном}} \% = 86\%$, сопротивлением якоря $R_{\text{я ном}} = 0,15 \text{ Ом}$.

Вопросы для самопроверки

1. Какое значение имеет коллектор в машине постоянного тока?
2. Что такое реакция якоря?
3. Какое явление оказывает реакция якоря на внешнюю характеристику генератора постоянного тока?
4. Опишите процесс самовозбуждения машин постоянного тока.

5. Перечислите способы возбуждения машин постоянного тока.
6. Сравните внешние характеристики генераторов независимого, параллельного и смешенного возбуждения.
7. Сравните механические характеристики двигателей параллельного и последовательного возбуждения.
8. Как должен быть включен пусковой реостат двигателя параллельного возбуждения?
9. Каким образом осуществляется реверсирование двигателей постоянного тока?
10. Какими способами можно регулировать скорость вращения двигателей параллельного и последовательного возбуждения?
11. Какие потери мощности имеют место в машине постоянного тока?

Рекомендованная литература

Основная

1. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. – СПб.: Питер. Ч1,2. 2008
2. Бунзя А. В., Григорьев В. Ф. Трехфазный трансформатор: Методические указания. – Екатеринбург: УрГУПС, 2011
3. Бондаренко А. В., Бунзя А. В., Григорьев В. Ф. Асинхронные машины: Методические рекомендации. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012
4. Азарова Е. М., Бондаренко А. В., Бунзя А. В., Григорьев В. Ф., Лившиц А. А. Электрические машины: Учебное - методическое пособие. Екатеринбург: УрГУПС, 2012

Дополнительная

1. Григорьев В. Ф. и др. Обмотка якоря (статора) электрических машин. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012

Электронные образовательные ресурсы

1. Сайт кафедры «Электрические машины» - <http://em.usurt.ru/>
2. Электронно-библиотечная система «Лань» - <http://e.lanbook.com/>
3. База данных WEB ИРБИС – <http://biblioserver.ru/>
4. Электронно-библиотечная система ZNANIUM.COM – <http://znanium.com/>

Содержание

Тема 1. Машины постоянного тока. Трансформатор	4
Тема 2. Трансформатор. Асинхронные двигатели.....	15
Тема 3. Машины постоянного тока.....	25
Библиографический список.....	32