



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Электротехника и электроника»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Сборник задач с контрольными тестами
для студентов неэлектротехнических специальностей*

Часть 5

Минск
БНТУ
2014

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Электротехника и электроника»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Сборник задач с контрольными тестами
для студентов неэлектротехнических специальностей*

В 6 частях

Часть 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Минск
БНТУ
2014

УДК [621.3+621.38]

ББК 31.2 я 7

Э 45

Составители:

*С.В. Домников, Т.Т. Розум, Ю.В. Бладыко, В.Д. Ежов,
Г.В. Згаевская, Ю.А. Куварзин, А.В. Куцыло*

Рецензенты:

Ю.В. Макошко, Р.Р. Мороз

Э 45 **Электротехника** и электроника : сборник задач с контрольными тестами для студентов неэлектротехнических специальностей : в 6 ч. / сост.: С.В. Домников [и др.]. – Минск: БНТУ, 2008 – 2013. – Ч. 5 : Электрические машины. – 2014. – 111 с.

ISBN 978–985–525–934–4 (Ч. 5)

978–985–479–911–7

Настоящий сборник задач предназначен для студентов неэлектротехнических специальностей по курсам «Электротехника», «Электротехника и электроника», «Электрические машины и аппараты».

Применяемая в пособии терминология соответствует рекомендациям ГОСТ 19880-74 «Электротехника. Основные понятия. Термины и определения».

Обозначение единиц величин соответствует ТР 2007/003/ВУ.

Часть 4 Магнитное поле, магнитные цепи с постоянными и переменными магнитодвижущими силами, трансформаторы, электрические измерения, сост.: Ю.В. Бладыко, Т.Т. Розум, Ю.А. Куварзин и др., вышла в БНТУ в 2011 г.

© БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, 2014

ГЛАВА 1. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Задачи с решениями

Задача 1.1. На разрезе асинхронного двигателя с трехфазной обмоткой статора, состоящей из трех одинаковых катушек, смещенных в пространстве относительно друг друга на угол $2\pi/3$ (рис. 1.1), показать картину результирующего магнитного поля для двух моментов времени: $\omega t_1 = 0$ и $\omega t_2 = \pi/2$ (рис. 1.2). Для упрощения обмотка статора изображена одновитковыми катушками $A - X$, $B - Y$, $C - Z$. Обмотка питается трехфазной системой токов частотой $f_1 = 50$ Гц.

Определить число пар полюсов, частоту и направление вращения магнитного поля.

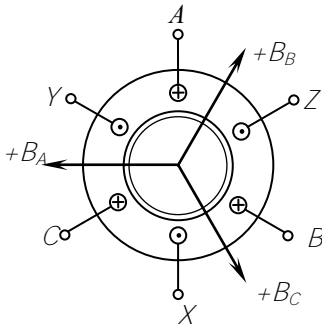


Рис. 1.1

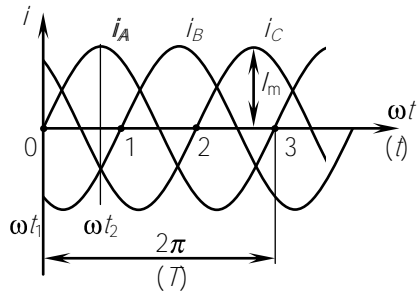


Рис. 1.2

Решение. Докажем, что неподвижные катушки статора асинхронного двигателя образуют круговое вращающееся магнитное поле. Для его возбуждения выполнены два условия: три одинаковых тока смещены в пространстве и во времени. Второе условие достигается благодаря тому, что катушки подключают к трехфазной системе токов, имеющих сдвиг во времени на $1/3$ периода (рис. 1.2):

$$i_A = I_m \sin \omega t, \quad i_B = I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \quad i_C = I_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

Условно примем, что ток фазы положителен, если он направлен от начала катушки (A, B, C) к ее концу (X, Y, Z), а отрицателен – от конца к началу (рис. 1.1). Ток каждой катушки создает собственное пульсирующее магнитное поле, магнитные индукции которого выражаются уравнениями:

$$\hat{A}_A = \hat{A}_m \sin \omega t, \quad \hat{A}_{\bar{A}} = \hat{A}_m \sin (\omega t - 2\pi/3), \quad \hat{A}_{\bar{N}} = \hat{A}_m \sin (\omega t + 2\pi/3)$$

Положительное направление векторов индукций магнитного поля каждой катушки определяется по правилу правого винта и показано на рис. 1.1.

Сумма векторов магнитных индукций катушек образует результирующее магнитное поле

$$\vec{A}_{\Sigma} = \vec{A}_{\bar{A}} + \vec{A}_{\bar{A}} + \vec{A}_{\bar{N}}.$$

Построим картины результирующего магнитного поля и векторные диаграммы магнитных индукций для моментов времени $\omega t_1 = 0$ (рис. 1.3, а) и $\omega t_2 = \pi/2$ (рис. 1.3, б).

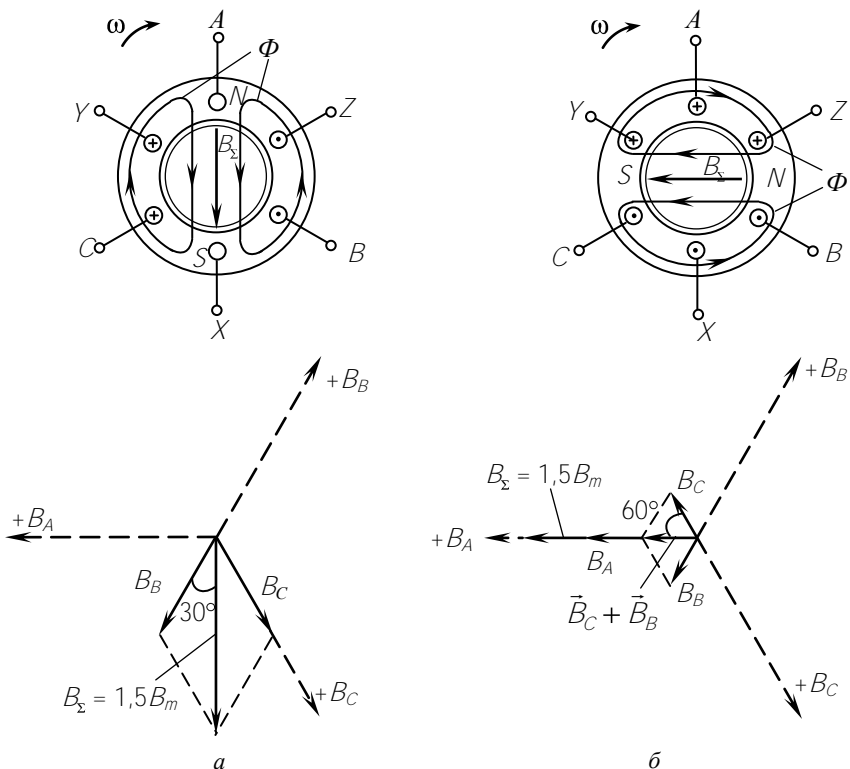


Рис. 1.3

В момент времени $\omega t_1 = 0$ ток фазы A равен нулю и индукция магнитного поля $B_A = 0$. Ток фазы B отрицателен, т. е. направлен от конца Y к началу B катушки. Индукция поля

$$\hat{A}_{\hat{A}} = B_m \sin\left(-2\frac{\pi}{3}\right) = -\frac{\sqrt{3}}{2} B_m.$$

Ток фазы C положителен и направлен от начала C к концу Z катушки, индукция магнитного поля

$$\hat{A}_C = B_m \sin\frac{2\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}}{2} B_m.$$

Результирующая индукция магнитного поля (рис. 1.3, *a*)

$$\hat{A}_{\Sigma} = 2B_{\hat{A}} \cos 30^\circ = 2\frac{\sqrt{3}}{2} B_m \cos 30^\circ = 1,5 B_m.$$

На рис. 1.3, *б* изображена картина магнитного поля и векторная диаграмма магнитных индукций для момента времени $\omega t_2 = \pi/2$, где:

$$\hat{A}_{\hat{A}} = \hat{A}_m, \quad \hat{A}_{\hat{B}} = \hat{A}_m \sin\left(\left\langle 30^\circ \right\rangle\right) = -\frac{1}{2} \hat{A}_m,$$

$$\hat{A}_{\hat{V}} = \hat{A}_m \sin 210^\circ = -\frac{1}{2} \hat{A}_m, \quad \hat{A}_{\Sigma} = \hat{A}_m + \frac{1}{2} \hat{A}_m = 1,5 \hat{A}_m.$$

Из рис. 1.3 видно, что результирующее магнитное поле, не изменяясь по величине ($B_{\Sigma} = 1,5 B_m$), вращается по часовой стрелке и за $1/4$ периода синусоидального тока поворачивается в пространстве на угол 90° , за период T совершит полный оборот на 360° , за 1 секунду — $1/T = f_1$ оборотов, а за 1 минуту — $60f_1$ оборотов. Рассмотренное поле является двухполюсным, т. е. имеет одну пару полюсов ($p = 1$), и частота его вращения $n_1 = 60f_1 \text{ мин}^{-1}$.

При промышленной частоте синусоидального тока $f_1 = 50 \text{ Гц}$ частота вращения двухполюсного магнитного поля $n_1 = 3000 \text{ мин}^{-1}$. Она постоянна и называется *синхронной*.

Задача 1.2. Как изменится магнитное поле трех одинаковых катушек, рассмотренное в задаче 1.1, если при включении трехфазной обмотки ошибочно поменяли местами начало A и конец X катушки фазы A ?

Решение. В данном случае изменится направление тока в катушке фазы A . Построим векторные диаграммы магнитных индукций трех катушек и результирующей индукции магнитного поля для моментов времени $\omega t_1 = 0$ и $\omega t_2 = \pi / 2$. Воспользуемся рис. 1.1 и рис. 1.2 задачи 1.1.

Для момента времени ωt_1 : $i_A = 0$, $B_A = 0$; $i_B = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_m$,
 $B_B = -\frac{\sqrt{3}}{2} B_m$; $i_{\bar{N}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m$, $B_{\bar{N}} = \frac{\sqrt{3}}{2} B_m$; $\vec{B}_{\Sigma} = \vec{B}_A + \vec{B}_B + \vec{B}_{\bar{N}}$,
 $B_{\Sigma} = 2B_A \cos 30^\circ = 1,5B_m$ (рис. 1.4, а).

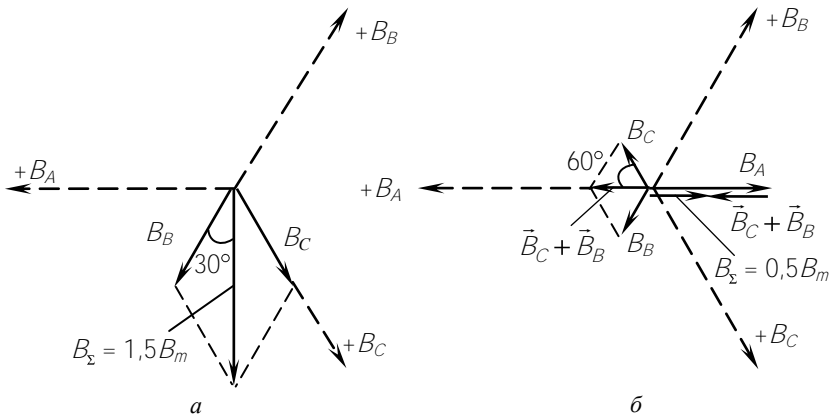


Рис. 1.4

Для момента времени $\omega t_2 = \frac{\pi}{2}$: $i_A = -I_m$, $B_A = -B_m$;
 $i_{\bar{A}} = i_{\bar{N}} = -\frac{1}{2} I_m$, $B_{\bar{A}} = B_{\bar{N}} = -\frac{1}{2} B_m$; $B_{\Sigma} = B_m - 0,5B_m = 0,5B_m$
(рис. 1.4, б).

Таким образом, при неправильном включении одной катушки, т. е. при изменении направления тока в катушке, возникает неравномерное (эллиптическое) магнитное поле. В момент времени, когда ток этой катушки равен нулю, индукция поля максимальна и равна $1,5B_m$ (рис. 1.4, *a*), а при максимальном отрицательном токе – только $0,5B_m$ (рис. 1.4, *б*). Направление вращения поля при этом изменяется на противоположное в сравнении с тем, каким оно было при правильном включении катушек (см. рис. 1.3).

Задача 1.3. Начертить эскиз торца статора четырехполюсного асинхронного двигателя с лобовыми частями обмотки. Показать изменение картины результирующего магнитного поля статора в течение периода питающего обмотку синусоидального тока.

Определить частоту вращения магнитного поля, если частота питающего обмотку тока $f_1 = 50$ Гц.

Решение. Для возбуждения многополюсного вращающегося магнитного поля увеличивают число катушек в каждой фазе статора в p раз. Для создания четырехполюсного поля ($p = 2$) в каждую фазу статора включают по две последовательно соединенные катушки. Оси катушек смещены на угол $120^\circ/p$. Геометрические размеры катушек уменьшаются в p раз, т. е. будут равны $180^\circ/p$.

Эскиз торца статора четырехполюсного асинхронного двигателя с лобовыми частями обмотки дан на рис. 1.5. На рис. 1.6, *a – z* изображены картины результирующего поля статора для моментов времени, отмеченных точками соответственно 0, 1, 2, 3 на диаграмме, приведенной на рис. 1.2. Точками и крестиками обозначены направления токов для указанных моментов времени.

Из рис. 1.6, *a – z* следует, что магнитное поле имеет четыре полюса (две пары полюсов $p = 2$) и за время одного периода поле поворачивается в пространстве на угол 180° , а в общем случае – на $360^\circ/p$.

В начале периода (точка 0 на рис. 1.2) полюс *M* находился вверху (рис. 1.6, *a*), а в конце периода (точка

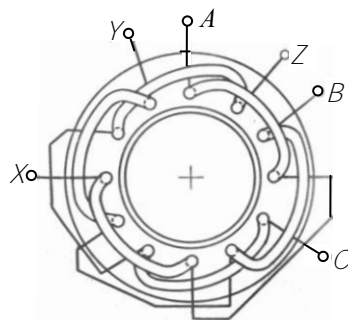


Рис. 1.5

З на рис. 1.2), он сместился вниз (рис. 1.6, з).

Таким образом, частота вращения четырехполюсного поля вдвое меньше, чем двухполюсного $n_1 = \frac{60 f_1}{2} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ мин}^{-1}$.

В общем случае частота вращения многополюсного магнитного поля $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$.

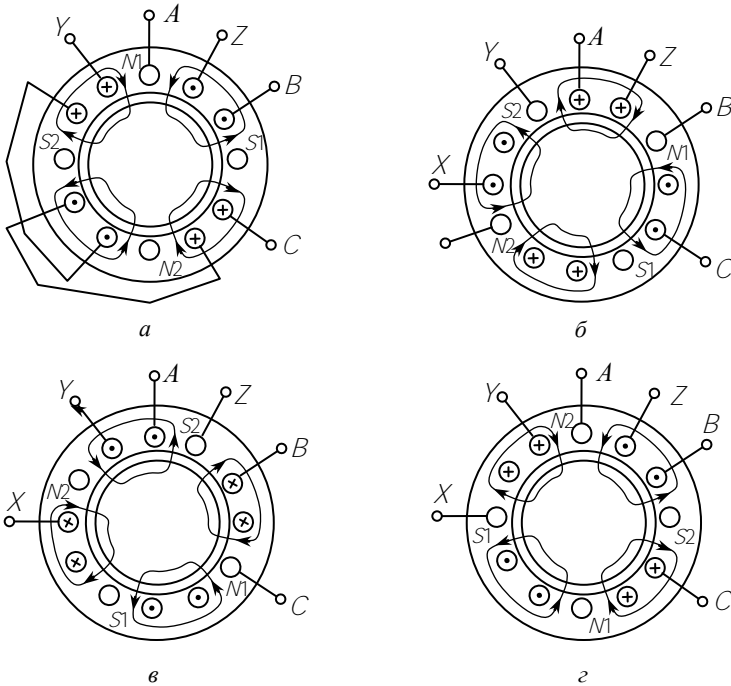


Рис. 1.6

Задача 1.4. Четырехполюсный двигатель при номинальной нагрузке работает со скольжением $s = 0,03$.

Найти частоту вращения ротора и частоту тока ротора, если частота напряжения питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

Решение. Синхронная частота вращающегося магнитного поля $n_1 = 60 f_1 / p = 60 \cdot 50 / 2 = 1500 \text{ мин}^{-1}$.

Частота вращения ротора

$$n = (1 - s) n_1 = (1 - 0,03) \cdot 1500 = 1455 \text{ мин}^{-1}.$$

Частота тока ротора асинхронного двигателя

$$f_2 = f_1 \cdot s = 50 \cdot 0,03 = 1,5 \text{ Гц}.$$

Задача 1.5. Асинхронный двигатель 4А71В2 имеет магнитный поток на один полюс машины $\Phi = 45 \cdot 10^{-3}$ Вб; число витков обмоток статора $w_1 = 22$ и ротора $w_2 = 8$; обмоточные коэффициенты $K_1 = 0,943$ и $K_2 = 0,965$. Частота тока питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

Определить ЭДС, индуцируемые в обмотках статора и ротора двигателя при: а) пуске, б) работе с номинальным скольжением $s_{\text{ном}} = 7,7\%$.

Решение. а) При неподвижном роторе магнитное поле пересекает проводники обмоток статора и ротора с одинаковой частотой. Поэтому $f_1 = f_2$. Тогда ЭДС фазы статора и ротора

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 \hat{E}_1 \hat{O} = 4,44 \cdot 50 \cdot 22 \cdot 0,943 \cdot 45 \cdot 10^{-3} = 207 \text{ \AA};$$

$$E_{2f} = 4,44 f_1 w_2 \hat{E}_2 \hat{O} = 4,44 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 0,965 \cdot 45 \cdot 10^{-3} = 77 \text{ \AA}.$$

б) ЭДС в фазе вращающегося ротора

$$E_2 = E_{2f} \cdot s = 77 \cdot 0,077 = 6 \text{ \AA}.$$

Задача 1.6. В фазу ротора четырехполюсного асинхронного двигателя с контактными кольцами включен магнитоэлектрический амперметр с двусторонней шкалой. При работе двигателя под нагрузкой стрелка амперметра за время $t = 10$ с сделала 20 полных колебаний.

Определить скольжение, частоту вращения ротора и ЭДС между кольцами вращающегося ротора, если ЭДС между кольцами неподвижного ротора $E_{2н} = 290$ В.

Решение. Частота тока в роторе

$$f_2 = \frac{n}{t} = \frac{20}{10} = 2 \text{ \AA} \ddot{\text{O}}.$$

Частота вращения магнитного поля статора

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ в}^{-1}.$$

Скольжение

$$s = f_2 / f_1 = 2/50 = 0,04.$$

Частота вращения ротора

$$n = n_1 (1 - s) = 1500 (1 - 0,04) = 1440 \text{ в}^{-1}.$$

ЭДС между кольцами вращающегося ротора

$$E_2 = E_{2f} \cdot s = 290 \cdot 0,04 = 11,6 \text{ \AA}.$$

Задача 1.7. Для двигателя, рассмотренного в задаче 1.6, построить графики зависимостей тока ротора I_2 , и косинуса угла сдвига фаз между током I_2 и ЭДС E_2 от скольжения s , если сопротивления фазы ротора $R_2 = 0,32 \text{ Ом}$, $X_2 = 0,48 \text{ Ом}$.

Решение. Поскольку обмотка ротора соединяется звездой, то ЭДС в фазе неподвижного ротора

$$E_{20.f} = E_{2f} / \sqrt{3} = 290 / \sqrt{3} \approx 167 \text{ \AA}.$$

Ток ротора I_2 и косинус угла сдвига фаз между $E_{2ф}$ и I_2 определяются соотношениями:

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2/s^2 + X_2^2}}; \quad \cos \psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2 \cdot s^2}}.$$

Задаваясь значениями скольжения $s = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$, находим величины тока I_2 и $\cos\psi_2$. Результаты расчета сводим в табл. 1.1.

Таблица 1.1

s	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
I_2, A	0	100	179	233,6	267,2	290
$\cos\psi_2$	1	0,955	0,858	0,753	0,64	0,55

Графики зависимостей $I_2(s)$ и $\cos\psi_2(s)$ приведены на рис. 1.7.

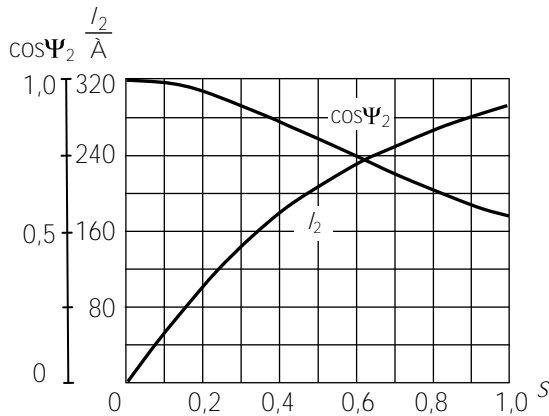


Рис. 1.7

Задача 1.8. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором единой серии АИР100L4 имеет следующие номинальные данные: $P_{\text{ном}} = 4 \text{ кВт}$, $s_{\text{ном}} = 0,0466$, $\eta_{\text{ном}} = 85 \%$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,84$. Кратности: пускового тока $I_{\text{п}} / I_{\text{ном}} = 7$; максимального момента $M_{\text{мах}} / M_{\text{ном}} = 2,4$; пускового момента $M_{\text{п}} / M_{\text{ном}} = 2$.

Определить частоту вращения ротора, номинальный момент $M_{\text{ном}}$, максимальный $M_{\text{мах}}$ и пусковой $M_{\text{п}}$ моменты, номинальный и пусковой токи двигателя при соединении обмоток статора звездой и треугольником, если двигатель рассчитан на напряжение $220 / 380 \text{ В}$ и частоту 50 Гц .

Решение. Если двигатель рассчитан на напряжение 220/380 В, это означает, что номинальное напряжение фазы обмотки статора равно 220 В. При линейном напряжении сети 380 В обмотки статора должны быть соединены звездой, а при линейном напряжении 220 В – треугольником.

Из обозначения типа двигателя следует, что машина четырех-полюсная, т. е. число пар полюсов $p = 2$. Тогда синхронная частота вращения поля

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ в}^{-1}.$$

Номинальная частота вращения ротора

$$n_{\text{н}} = n_1 (1 - s_{\text{н}}) \approx 1500 (1 - 0,0466) \approx 1430 \text{ в}^{-1}.$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\frac{2\pi n_{\text{н}}}{60}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = 9,55 \cdot \frac{4000}{1430} = 26,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Из заданных в условии кратностей моментов находим максимальный и пусковой моменты:

$$M_{\text{max}} = 2,4 \cdot M_{\text{н}} = 2,4 \cdot 26,7 = 64,1 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{п}} = 2 \cdot 26,7 = 53,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Мощность, потребляемая двигателем от сети,

$$P_{\text{н}} = P_{\text{м}} / \eta_{\text{н}} = \frac{4}{0,85} = 4,705 \text{ кВт}.$$

Из выражения $P_{\text{н}} = \sqrt{3} U_{\text{н}} I_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}$ определяем токи двигателя при различных соединениях обмоток статора:

Если обмотки статора соединены звездой, то номинальный ток

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}} = \frac{4705}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,84} = 8,51 \text{ А},$$

а пусковой ток

$$I_{\text{п}} = 7 \cdot I_{\text{н}} = 7 \cdot 8,51 = 59,57 \text{ А}.$$

Если обмотки статора соединены треугольником, то номинальный ток

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}} = \frac{4705}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,84} = 14,7 \text{ А},$$

а пусковой ток

$$I_{\text{п}} = 7 \cdot I_{\text{н}} = 7 \cdot 14,7 = 102,9 \text{ А}.$$

Задача 1.9. Для двигателя АИР112МВ6, у которого $P_{\text{ном}} = 4 \text{ кВт}$, $n_{\text{ном}} = 950 \text{ мин}^{-1}$, число пар полюсов $p = 3$, кратность максимального момента $K_{\text{м}} = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = 2,5$, построить зависимость $M(s)$ и механическую характеристику $n(M)$.

Решение. Механические характеристики асинхронных двигателей могут быть построены по каталожным данным с использованием уравнения Клосса

$$\lambda = \frac{2 \cdot \lambda_{\text{max}}}{s_{\text{к}}/s + s/s_{\text{к}}},$$

где M_{max} – максимальный (критический) момент двигателя;

$s_{\text{к}}$ – критическое скольжение, при котором двигатель развивает максимальный момент.

Синхронная частота вращения

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об}^{-1}.$$

Определяем номинальное и критическое скольжение:

$$s_{\text{нн}} = \frac{n_1 - n_{\text{нн}}}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05;$$

$$s_{\text{э}} = s_{\text{нн}} \left(\hat{E}_i + \sqrt{\hat{E}_i^2 - 1} \right) = 0,05 \left(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1} \right) = 0,24.$$

Номинальный момент двигателя

$$\hat{\lambda}_{\text{нн}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{нн}}}{n_{\text{нн}}} = 9,55 \cdot \frac{4000}{950} = 40,21 \text{ л} \cdot \text{л}.$$

Максимальный момент

$$\hat{\lambda}_{\text{max}} = \hat{E}_i \hat{\lambda}_{\text{нн}} = 2,5 \cdot 40,2 = 100,525 \text{ л} \cdot \text{л}.$$

Задавая значения скольжения s от нуля до единицы, рассчитываем зависимость $M(s)$ по уравнению

$$\hat{\lambda} = \frac{201,05}{0,24/s + s/0,24}.$$

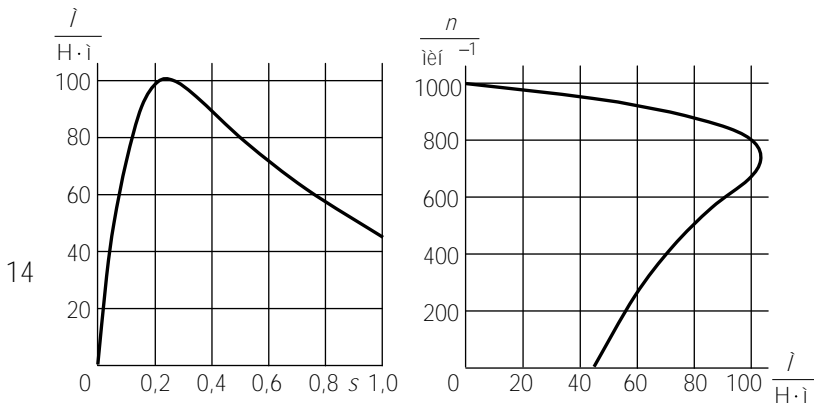
Для построения механической характеристики $n(M)$ воспользуемся соотношением $n = n_1(1 - s)$.

Результаты расчета сводим в табл. 1.2.

Таблица 1.2

s	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
n , мин ⁻¹	900	800	700	600	500	400	300	200	100	0
M , Н·м	71,38	98,9	98,1	88,7	78,4	69,3	61,67	55,3	50	45,6

Характеристики $M(s)$ и $n(M)$ приведены на рис. 1.8.



Задача 1.10. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором питается от сети напряжением 380 В.

Двигатель имеет следующие номинальные данные: $P_{\text{ном}} = 1,7$ кВт, $U_{\text{ном}} = 220$ В, $n_{\text{ном}} = 1430$ мин⁻¹, $\eta_{\text{ном}} = 81,5$ %, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,85$.

Кратность пускового тока при пуске без реостата и номинальном напряжении на зажимах статора $I_{\text{п}} / I_{\text{ном}} = 7$, коэффициент мощности при пуске $\cos\varphi_{\text{п}} = 0,2$.

Определить схему соединения обмоток статора, номинальный и пусковой токи электродвигателя, сопротивление короткого замыкания на одну фазу, активное и индуктивное сопротивления фазы обмоток статора и ротора (приведенные), критическое скольжение, считая что $R_1 = R_2' = R_{\text{к}}/2$ и $X_1 = X_2' = X_{\text{к}}/2$.

Рассчитать номинальный и пусковой моменты при пуске без реостата. Возможен ли при этом запуск двигателя под номинальной нагрузкой?

Решение. Обмотки статора двигателя рассчитаны на напряжение 220 В. Фазное напряжение сети $U_{\phi} = U/\sqrt{3} = 380/\sqrt{3} = 220$ В.

Следовательно, обмотки статора должны быть соединены звездой.

Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \eta_{\text{н}} \cos\varphi_{\text{н}}} = \frac{1700}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,815 \cdot 0,85} = 3,73 \text{ А.}$$

Пусковой ток $I_{\text{п}} = 7 \cdot 3,73 = 26,11$ А.

Полное $Z_{\text{к}}$, активное $R_{\text{к}}$ и индуктивное $X_{\text{к}}$ сопротивления короткого замыкания на одну фазу двигателя соответственно:

$$Z_{\text{к}} = U_{\phi} / I_{\text{п}} = 220 / 26,11 = 8,43 \text{ Ом,}$$

$$R_{\text{к}} = Z_{\text{к}} \cos\varphi_{\text{п}} = 8,43 \cdot 0,2 \approx 1,69 \text{ Ом,}$$

$$X_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}}^2} = \sqrt{8,43^2 - 1,69^2} = 8,24 \text{ Ом.}$$

Находим активное и индуктивное сопротивления фазы обмоток статора и ротора

$$R_1 = R_2' = R_{\text{к}}/2 = 1,69/2 \approx 0,85 \text{ Ом,}$$

$$X_1 = X_2' = X_K/2 = 8,24/2 = 4,12 \text{ Ом.}$$

Критическое скольжение

$$s_{\text{е}} = \frac{R_2'}{X_{\text{е}}} = \frac{0,85}{8,24} = 0,103.$$

Номинальный момент

$$\lambda_{\text{н}} = 9,55 \frac{P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = 9,55 \cdot \frac{1700}{1430} = 11,35 \text{ л.л.}$$

Максимальный момент

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{1}{2} \lambda_{\text{н}} \left(\frac{s_{\text{н}}}{s_{\text{е}}} + \frac{s_{\text{е}}}{s_{\text{н}}} \right) = \frac{1}{2} \cdot 11,35 \cdot \left(\frac{0,0466}{0,103} + \frac{0,103}{0,0466} \right) = 15 \text{ л.л.}$$

$$\text{где } s_{\text{н}} = \frac{n_1 - n_{\text{н}}}{n_1} = \frac{1500 - 1430}{1500} = 0,0466.$$

При пуске $s = 1$. Тогда пусковой момент при запуске двигателя без реостата

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{2\lambda_{\text{max}}}{\frac{1}{s_{\text{е}}} + \frac{s_{\text{е}}}{1}} = \frac{2 \cdot 15}{\frac{1}{0,103} + \frac{0,103}{1}} = 3,06 \text{ л.л.}$$

Поскольку $M_{\text{п}} < M_{\text{ном}}$, то запуск двигателя под номинальной нагрузкой невозможен без пускового реостата.

Задача 1.11. Для двигателя, рассмотренного в задаче 1.10, определить пусковой момент $\lambda_{\text{п}}'$, пусковой ток $I_{\text{п}}'$ при включении его на пониженное напряжение, равное $0,8U_{\text{ном}}$. Рассчитать сопротивление пускового реостата, при котором пусковой ток $I_{\text{п}}''$ не превысит $3I_{\text{ном}}$.

Решение. Момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату питающего напряжения, поэтому при пониженном напряжении пусковой момент

$$I_{\text{п}}' = \left(\frac{0,8 U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \right)^2 \cdot I_{\text{н}} = 0,64 \cdot 3,06 = 1,96 \text{ А}.$$

Поскольку пусковой ток пропорционален напряжению, то

$$I_{\text{п}}'' = 0,8 \cdot 26,11 = 20,9 \text{ А}.$$

Полное сопротивление фазы двигателя при пусковом токе $I_{\text{п}}''$

$$Z_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{п}}''} = \frac{220}{3 \cdot 3,73} = 19 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление фазы в этом режиме

$$R_{\text{а}} = \sqrt{Z_{\text{ф}}^2 - X_{\text{э}}^2} = \sqrt{19^2 - 8,24^2} = 17,1 \text{ Ом}.$$

Сопротивление пускового реостата

$$R_{\text{р}}' = R_{\text{а}} - R_{\text{э}} = 17,1 - 1,69 = 15,41 \text{ Ом}.$$

Задача 1.12. Трехфазный асинхронный двигатель, у которого $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} = 1,3$, в нормальном режиме работает при соединении обмоток статора треугольником.

Возможен ли пуск этого двигателя в ход при нагрузках на валу, равных 25% и 50% от номинальной, если при пуске его обмотки соединить по схеме звезды?

Решение. При переключении обмоток статора с треугольника на звезду пусковой момент уменьшается в три раза. Поэтому

а) при нагрузке, равной 25% от номинальной

$$\frac{1}{3} I_{\text{п}}' / \left(\frac{1}{4} I_{\text{н}} \right) = \frac{4}{3} \cdot 1,3 = 1,73, \text{ следовательно, пуск двигателя}$$

возможен;

б) при нагрузке, равной 50% от номинальной

$$\frac{1}{3} I_{\text{п}}' / \left(\frac{1}{2} I_{\text{н}} \right) = \frac{2}{3} \cdot 1,3 = 0,86 \text{ и пуск двигателя невозможен.}$$

Задача 1.13. Трехфазный асинхронный двигатель с контактными кольцами имеет следующие номинальные данные: $P_{\text{ном}} = 5,5$ кВт, $U_{\text{ф ном}} = 220$ В, $\eta_{\text{ном}} = 86,6$ %, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,92$, $I_{2 \text{ ном}} = 10,32$ А, число пар полюсов $p = 1$. Сопротивления одной фазы обмоток статора и ротора $R_1 = 0,982$ Ом, $X_1 = 1,934$ Ом, $R_2' = 0,861$ Ом, $X_2' = 2,836$ Ом, коэффициент трансформации двигателя $K = 0,983$.

Определить номинальный ток $I_{1 \text{ ном}}$, номинальное скольжение $S_{\text{ном}}$, потери в обмотках статора и ротора и электромагнитные мощность и момент двигателя, если двигатель питается от сети напряжением $U = 380$ В.

Решение. Номинальный ток статора

$$I_{1 \text{ ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}} \cos\varphi_{\text{ном}}} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,866 \cdot 0,92} \approx 10,5 \text{ А.}$$

Для определения номинального скольжения $S_{\text{ном}}$ построим векторную диаграмму одной фазы статора, разместив вектор тока $\underline{I}_{1 \text{ ном}}$ по действительной оси комплексной плоскости (рис. 1.9).

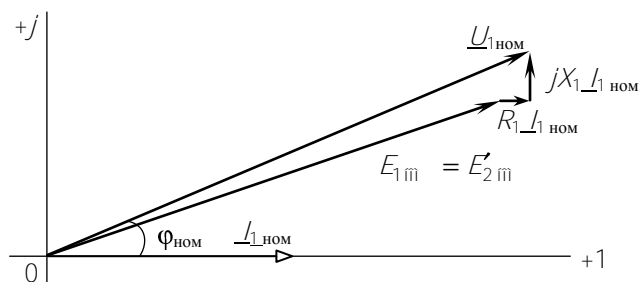


Рис. 1.9

Из векторной диаграммы будем иметь

$$\begin{aligned} \underline{E}_{1 \text{ ном}} &= \underline{E}'_{2 \text{ ном}} = \underline{U}_{1 \text{ ном}} - R_1 \underline{I}_{1 \text{ ном}} - jX_1 \underline{I}_{1 \text{ ном}} = \\ &= 220 \cdot e^{j(\arccos 0,92)} - 0,982 \cdot 10,5 - j1,934 \cdot 10,5 = \end{aligned}$$

$$= 220 \cdot e^{j23,1} - 10,30 - j20,3 = 192,1 + j66,01 = 203e^{j19^\circ} \text{ \AA}.$$

Номинальное скольжение можно найти из выражения

$$I_{2\text{н}} = \frac{E_{2\text{н}}}{\sqrt{R_2^2/s_{\text{н}}^2 + X_2^2}}.$$

Отсюда

$$s_{\text{н}} = \frac{R_2 I_{2\text{н}}}{\sqrt{E_{2\text{н}}^2 - X_2^2 \cdot I_{2\text{н}}^2}} = \frac{\frac{R_2' I_{2\text{н}}}{K^2}}{\sqrt{\left(\frac{E_{2\text{н}}'}{K}\right)^2 - \left(\frac{X_2'}{K^2}\right)^2 \cdot I_{2\text{н}}^2}} =$$

$$= \frac{\frac{0,861}{0,983} \cdot 10,32}{\sqrt{\left(\frac{203}{0,983}\right)^2 - \left(\frac{2,336}{0,983^2}\right)^2 \cdot 10,32^2}} = 0,044.$$

Номинальная частота вращения

$$n_{\text{н}} = n_1 (1 - s_{\text{н}}) = \frac{60 \cdot 50}{1} (1 - 0,044) = 2862 \text{ в}^{-1}.$$

Потери мощности в обмотках статора и ротора соответственно

$$\Delta P_{y1} = 3 R_1 I_{1\text{н}}^2 = 3 \cdot 0,982 \cdot 10,5^2 = 324,8 \text{ \AA} \cdot \text{д},$$

$$\Delta P_{y2} = 3 R_2 I_{2\text{н}}^2 = 3 \frac{R_2'}{E^2} I_{2\text{н}}^2 = 3 \cdot \frac{0,861}{0,983^2} \cdot 10,32^2 = 285 \text{ \AA} \cdot \text{д}.$$

Электромагнитная мощность

$$P_{y1} = \frac{\Delta P_{y2}}{s_{\text{ин}}} = \frac{285}{0,044} = 6,477 \text{ кВт}.$$

Электромагнитный момент

$$M_{y1} = \frac{P_{y1}}{\frac{2\pi n_1}{60}} = \frac{60 P_{y1}}{2\pi n_1} = \frac{60 \cdot 6477}{2 \cdot 3,14 \cdot 3000} = 20,63 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Задача 1.14. Асинхронный двигатель с контактными кольцами при включенном в цепь ротора регулировочном реостате имеет частоту вращения ротора $n = 450 \text{ мин}^{-1}$, потребляя при этом от сети мощность $P_1 = 20 \text{ кВт}$.

Определить электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$ и мощность на валу P_2 , потери в цепи ротора ΔP_2 , КПД и момент, развиваемый двигателем, если потери в обмотке и сердечнике статора $\Delta P_1 = 2 \text{ кВт}$. Синхронная частота вращения магнитного поля статора $n_1 = 750 \text{ мин}^{-1}$. Потерями в сердечнике ротора и механическими потерями пренебречь.

Решение. Электромагнитная мощность двигателя

$$P_{y1} = P_1 - \Delta P_1 = 20 - 2 = 18 \text{ кВт}.$$

Мощность, развиваемая двигателем на валу,

$$P_2 = P_{y1} (1 - s) = 18 (1 - 0,4) = 10,8 \text{ кВт},$$

где
$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{750 - 450}{750} = 0,4.$$

Потери в цепи ротора, т. е. электрические потери в обмотке ротора и регулировочном реостате

$$\Delta P_2 = P_{y1} - P_2 = 18 - 10,8 = 7,2 \text{ кВт}$$

или

$$\Delta P_2 = P_{y1} \cdot s = 18 \cdot 0,4 = 7,2 \text{ кВт}.$$

В заданном режиме КПД двигателя

$$\eta = P_2 / P_1 = 10800 / 20000 = 0,54.$$

Так как магнитными потерями в роторе и механическими потерями пренебрегаем, то электромагнитный момент

$$M_{y1} = 9,55 \frac{P_{y1}}{n_1} = 9,55 \frac{18000}{750} = 229,2 \text{ л} \cdot \text{с}$$

равен моменту, развиваемому двигателем

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n} = 9,55 \frac{10800}{450} = 229,2 \text{ л} \cdot \text{с}.$$

Задача 1.15. Для асинхронного двигателя, схема замещения которого приведена на рис. 1.10 построить рабочие характеристики, т. е. зависимости η и $\cos\varphi$ в

функции от коэффициента загрузки $\beta = P / P_{\text{ном}}$, если известны следующие данные: $P_{\text{ном}} = 1,1 \text{ кВт}$, $U_{1\text{ф}} = 220 \text{ В}$, $I_{1\text{ ном}} = 2,53 \text{ А}$, ток холостого хода $I_x = 1,313 \text{ А}$, $\eta_{\text{ ном}} = 77,85\%$, $\cos\varphi_{\text{ ном}} = 0,844$, $S_{\text{ном}} = 0,0558$, $R_1 = 8,92 \text{ Ом}$, $X_1 = 6,6 \text{ Ом}$, $R_2' = 5,13 \text{ Ом}$, $X_2' = 9,87 \text{ Ом}$, $R_x = 20,5 \text{ Ом}$, $X_x = 84 \text{ Ом}$.

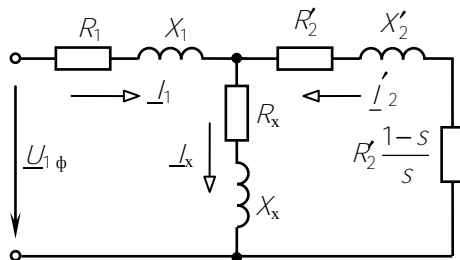


Рис. 1.10

Решение. Мощность, потребляемая двигателем от сети при номинальной нагрузке

$$P_{1\text{ ном}} = P_{\text{ ном}} / \eta_{\text{ ном}} = 1,1 / 0,7785 = 1,413 \text{ кВт}.$$

Суммарные потери в двигателе

$$\sum \Delta P_{1\text{ ном}} = P_{1\text{ ном}} - P_{\text{ ном}} = 1413 - 1100 = 313 \text{ Вт}.$$

Исходя из энергетической диаграммы асинхронного двигателя и, считая, что $I_1^2 \approx I_0^2 + I_2^2$, суммарные потери в двигателе можно представить в виде

$$\begin{aligned} \sum \Delta P &= \Delta P_{y1} + \Delta P_1 + \Delta P_{y2} + \Delta P_{\text{ia}\hat{o}} = \\ &= 3 \cdot I_1^2 R_1 + 3 \cdot I_0^2 R_0 + 3 \cdot \left(I_2 \right)^2 R_2 + \Delta P_{\text{ia}\hat{o}} = \\ &= 3 \cdot \left(I_1 + I_2 \right)^2 R_1 + 3 \cdot I_0^2 R_0 + \Delta P_{\text{ia}\hat{o}} = \Delta P_{\hat{n}} + \Delta P_{\sim} \end{aligned}$$

где $\Delta P_{\hat{n}} = 3 \cdot I_0^2 R_0 + \Delta P_{\text{ia}\hat{o}}$ – постоянные потери,

$\Delta P_{\sim} = 3 \cdot \left(I_1 + I_2 \right)^2 R_1$ – переменные потери, зависящие от тока нагрузки I_2 .

Тогда переменные потери в номинальном режиме

$$\begin{aligned} \Delta P_{\sim \text{ном}} &= 3 \cdot \left(I_{1\text{ном}} \right)^2 R_1 + 3 \cdot \left(I_{2\text{ном}} \right)^2 R_2 = 3 \cdot \left(I_{1\text{ном}}^2 - I_0^2 \right) R_1 + 3 \cdot I_{2\text{ном}}^2 R_2 = \\ &= 3 \cdot \left(5,53^2 - 1,313^2 \right) \cdot 0,92 + 5,13^2 \cdot 1,92 = 197,3 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Постоянные потери

$$\Delta P_{\hat{n}} = \sum \Delta P_{\text{ia}\hat{o}} - \Delta P_{\sim \text{ном}} = 313 - 197,3 = 105,7 \text{ Вт}$$

КПД двигателя находим из выражения

$$\eta = \frac{P}{P + \sum \Delta P} = \frac{P}{P + \Delta P_{\hat{n}} + \Delta P_{\sim}} = \frac{\beta P_{\text{ном}}}{\beta P_{\text{ном}} + \Delta P_{\hat{n}} + \beta^2 \Delta P_{\sim \text{ном}}}$$

Задаваясь значениями коэффициента загрузки β находим соответствующие значения КПД. Результаты расчета сводим в табл. 1.3.

Таблица 1.3

β	$\beta P_{\text{ном}}$	$\Delta P_{\text{с}}$	$\beta^2 \Delta P_{\sim \text{ном}}$	$\beta P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{с}} + \beta^2 \Delta P_{\sim \text{ном}}$	η
0,2	220	115,7	7,89	343,59	0,64
0,4	440	115,7	31,57	587,27	0,75
0,6	660	115,7	71,03	846,73	0,78
0,8	880	115,7	126,3	1122	0,784
1,0	1100	115,7	197,3	1413	0,7785

Кривая $\eta(\beta)$ приведена на рис. 1.11.

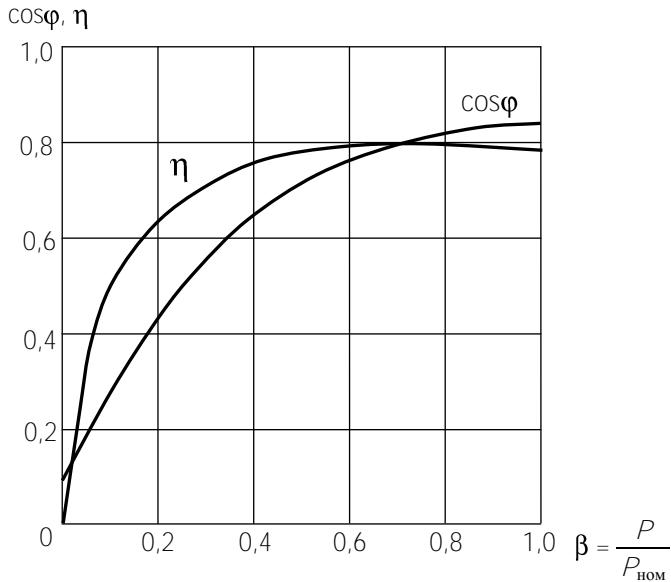


Рис. 1.11

Исходя из схемы замещения двигателя (рис. 1.10), находим потребляемую им реактивную мощность

$$\begin{aligned}
 Q &= 3 \cdot I_1^2 X_1 + 3 \cdot I_0^2 X_0 + 3 \cdot I_2^2 X_2' = \\
 &= 3 \cdot I_0^2 (X_1 + X_0) + 3 \cdot I_2^2 (X_1 + X_2') = Q_n + Q_-,
 \end{aligned}$$

где $Q_n = 3 \cdot I_0^2 (X_1 + X_0)$ – часть потребляемой реактивной мощности, не зависящая от тока нагрузки;

$Q_- = 3 \cdot I_2^2 (X_1 + X_2')$ – переменная составляющая реактивной мощности, зависящая от тока нагрузки и прямо пропорциональная квадрату коэффициента загрузки β :

$$Q_n = 3 \cdot I_0^2 (X_1 + X_0) = 3 \cdot 1,313^2 (6,6 + 84) = 468,6 \text{ ватт};$$

переменная составляющая реактивной мощности в номинальном режиме

$$Q_{-\hat{m}} = 3 \cdot (I_{\hat{m}}^2 \cdot (X_1 + X_2')) = 3 (I_{\hat{m}}^2 - I_0^2) (X_1 + X_2') =$$

$$= 3 \cdot (5,53^2 - 1,313^2) (6,6 + 9,87) = 231,2 \text{ в.д.}$$

Коэффициент мощности двигателя

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{\beta P_{\hat{m}}}{\sqrt{\beta^2 P_{\hat{m}}^2 + (Q_{\hat{n}} + \beta^2 Q_{-\hat{m}})^2}} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_{\hat{n}} + \beta^2 Q_{-\hat{m}}}{\beta P_{\hat{m}}} \right)^2}}.$$

Задаваясь значениями β , найдем соответствующие им значения $\cos\varphi$. Результаты расчета в табл. 1.4.

Таблица 1.4

β	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Q_c , вар	468,6	468,6	468,6	468,6	468,6
$\beta^2 Q_{-\hat{m}}$, вар	9,25	37	83,2	148	231,2
$Q_c + \beta^2 Q_{-\hat{m}}$, вар	477,85	505,6	551,8	616,6	699,8
$\beta P_{\text{ном}}$, Вт	220	440	660	880	1100
$\frac{Q_{\hat{n}} + \beta^2 Q_{-\hat{m}}}{\beta P_{\hat{m}}}$	2,17	1,15	0,84	0,7	0,636
$\sqrt{1 + \left(\frac{Q_{\hat{n}} + \beta^2 Q_{-\hat{m}}}{\beta P_{\hat{m}}} \right)^2}$	2,39	1,52	1,3	1,22	1,18
$\cos\varphi$	0,42	0,66	0,77	0,82	0,844

Зависимость $\cos\varphi(\beta)$ приведена на рис. 1.11.

Задача 1.16. Трехфазный асинхронный двигатель АИР160М2, имеющий паспортные данные: $P_{\text{ном}} = 18,5$ кВт; $n_{\text{ном}} = 2920$ мин⁻¹, $\eta_{\text{ном}} = 91,0\%$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,89$, $K_{\text{п}} = M_{\text{п}} / M_{\text{ном}} = 2,2$, $K_{\text{м}} = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = 3,0$ снабжен преобразователем частоты.

Считая момент сопротивления нагрузки независимым от частоты вращения и равным $M = 0,5M_{\text{ном}}$, найти частоту вращения ротора и тока в нем при частоте f_1 тока в обмотке статора, равной: а) 30 Гц; б) 10 Гц. Принять, что магнитный поток остается неизменным и равным $\Phi_{\text{ном}}$.

Решение. При частоте тока в обмотке статора $f_1 = 50$ Гц разность частот вращения ротора в диапазоне изменения нагрузки от $M = 0$ до $M = M_{\text{ном}}$ $\Delta n_{\text{ном}} = n_1 - n_{\text{ном}} = 3000 - 2920 = 80$ мин⁻¹.

Полагая механическую характеристику $n(M)$ линейной в этом диапазоне изменения электромагнитного момента двигателя, имеем, что при $M = 0,5M_{\text{ном}}$ $\Delta n_{(0,5M_{\text{ном}})} = 0,5 \Delta n_{\text{ном}} = 0,5 \cdot 80 = 40$ мин⁻¹.

Учитывая, что линейные участки характеристик $n(M)$ при частотном регулировании параллельны (рис. 1.12), заключаем, что $\Delta n_{(0,5M_{\text{ном}})} = 40$ мин⁻¹ = const при любой частоте f_1 .

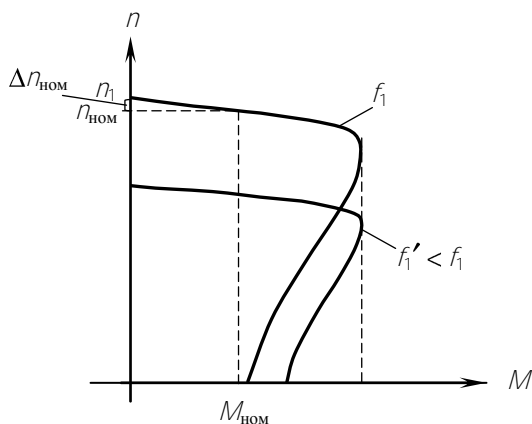


Рис. 1.12

Для заданных значений частоты f_1 получим:

а) при частоте $f_1' = 30$ Гц

$$n_1' = \frac{60 \cdot 30}{1} = 1800 \text{ вèí}^{-1},$$

$$n' = n_1' - \Delta n_{(0,5M_{\text{ном}})} = 1800 - 40 = 1760 \text{ мин}^{-1},$$

$$f_2' = f_1' \cdot s = 30 \frac{1800 - 1760}{1800} = 0,666 \text{ \AA}.$$

б) при частоте $f_1' = 10 \text{ Гц}$

$$n_1' = 600 \text{ мин}^{-1}, \quad n' = 600 - 40 = 560 \text{ мин}^{-1},$$

$$f_2' = 10 \frac{600 - 560}{600} = 0,666 \text{ \AA}.$$

Задача 1.17. Асинхронный двигатель АИР100S2, имеющий номинальную частоту вращения $n_{\text{ном}} = 2850 \text{ мин}^{-1}$ при $f_1 = 50 \text{ Гц}$ работает на нагрузку вентиляторного типа ($M \equiv n^2$), которая при номинальной частоте вращения двигателя, создает момент сопротивления, равный его номинальному моменту.

Какими будут частоты вращения ротора и тока в его обмотке при снижении частоты питающей сети до $f_1' = 30 \text{ \AA}$. Магнитный поток при этом остается неизменным и равным номинальному.

Решение. В номинальном режиме работы при $f_1 = 50 \text{ Гц}$ частота тока в обмотке ротора

$$f_{2\text{ном}} = f_1 \cdot s_{\text{ном}} = 50 \frac{3000 - 2850}{3000} = 2,5 \text{ \AA},$$

а изменение частоты вращения ротора в диапазоне изменения момента сопротивления от $M = 0$ до $M = M_{\text{ном}}$ $\Delta n_{\text{ном}} = n_1 - n_{\text{ном}} = 3000 - 2850 = 150 \text{ мин}^{-1}$.

При уменьшении частоты тока в обмотке статора до значения

$$f_1' = 30 \text{ \AA} \text{ частота вращения поля } n_1' = \frac{60 f_1'}{1} = \frac{60 \cdot 30}{1} = 1800 \text{ вèí}^{-1}.$$

Следствием этого будут уменьшение частоты вращения АД и момента сопротивления, оказываемого нагрузкой вентиляторного типа. Последний можно найти как

$$M' = M_{\text{н\ddot{m}}} \left(\frac{n_1'}{n_1} \right)^2 \approx M_{\text{н\ddot{m}}} \left(\frac{f_1'}{f_1} \right)^2 = M_{\text{н\ddot{m}}} \left(\frac{30}{50} \right)^2 = 0,36 M_{\text{н\ddot{m}}} .$$

Тогда, если допустить, что при частотном регулировании зависимости $n(M)$ в диапазоне $0 \leq M \leq M_{\text{ном}}$ являются линейными и имеют одинаковый наклон к оси абсцисс (моментов M), то при частоте $f_1' = 30 \text{ \AA\ddot{o}}$ получим

$$\Delta n' = 0,36 \Delta n_{\text{н\ddot{m}}} = 0,36 \cdot 150 = 54 \text{ \ddot{e}l}^{-1} .$$

Следовательно, $n' = n_1' - \Delta n' = 1800 - 54 = 1746 \text{ \ddot{e}l}^{-1}$, а частота тока в обмотке ротора

$$f_2' = f_1' \cdot s' = f_1' \frac{n_1' - n'}{n_1'} = 30 \frac{1800 - 1746}{1800} = 0,9 \text{ \AA\ddot{o}} .$$

Очевидно, что эту частоту можно рассчитать и по выражению

$$f_2' = f_{2\text{н\ddot{m}}} \cdot M^* = f_{2\text{н\ddot{m}}} \frac{M'}{M_{\text{н\ddot{m}}}} = 2,5 \frac{0,36 M_{\text{н\ddot{m}}}}{M_{\text{н\ddot{m}}}} = 0,9 \text{ \AA\ddot{o}} .$$

Задача 1.18. Для трехфазного АД с фазным ротором каталожные данные которого: $P_{\text{ном}} = 10 \text{ кВт}$; $n_{\text{ном}} = 960 \text{ мин}^{-1}$, $R_1 = 0,34 \text{ Ом}$, $R_2 = 0,085 \text{ Ом}$, $I_{2\text{ном}} = 36 \text{ А}$, найти значение сопротивления и мощность трехфазного регулировочного реостата для снижения частоты вращения двигателя до $n = 800 \text{ мин}^{-1}$ при неизменном моменте на валу, равном номинальному. Механическими потерями пренебречь.

Решение. Если пренебречь механическими потерями, то можно утверждать, что при неизменном моменте на валу электромагнитная мощность двигателя при регулировании частоты вращения остается неизменной. Это позволяет для определения сопротивления R_p регулировочного реостата воспользоваться соотношением

$$\frac{R_2 + R_p}{s} = \frac{R_2}{s_{\text{н\ddot{m}}}} , \quad (1.1)$$

где R_2 – активное сопротивление фазы обмотки ротора; R_p – сопротивление фазы регулировочного реостата;

$$s_{\text{н}} = \frac{n_1 - n_{\text{н}}}{n_1} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0,04 \quad \text{– скольжение в номинальном режиме;}$$

нальном режиме;

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1000 - 800}{1000} = 0,2 \quad \text{– скольжение, соответствующее}$$

сниженной частоте вращения.

Из (1.1) имеем

$$R_{\delta} = R_2 \left(\frac{1}{s_{\text{н}}} - 1 \right) = 0,085 \left(\frac{1}{0,04} - 1 \right) = 0,085 \left(25 - 1 \right) = 0,34 \quad \Omega.$$

Мощность регулировочного реостата

$$P_{\delta} = 3 I_{2\text{н}}^2 \cdot R_{\delta} = 3 \cdot 36^2 \cdot 0,34 = 1322 \quad \text{Вт}.$$

Задача 1.19. Суммарная активная мощность, потребляемая заводом равна 750 кВт. При этом коэффициент мощности его равен 0,85. Кроме того, на заводе установлен компрессор мощностью 125 кВт, для привода которого используется синхронный двигатель ДСК 12–24–12, у которого $P_{\text{ном}} = 125$ кВт; $\cos\varphi_{\text{сд}} = 0,9$ (опережающий) и $\eta_{\text{ном}} = 89,5\%$.

До какого значения повысится коэффициент мощности завода, если синхронный двигатель будет работать с номинальной мощностью?

Решение. До установки синхронного двигателя реактивная мощность завода

$$Q = P \operatorname{tg}\varphi = 750 \cdot 0,602 = 451,5 \quad \text{кВар}.$$

Активная мощность, потребляемая синхронным двигателем (СД) из сети

$$R_{\text{н}} = P_{\text{н}} / \eta_{\text{н}} = 125 / 0,895 = 140 \quad \text{кВт}.$$

Реактивная мощность синхронного двигателя

$$Q_{\text{н}} = R_{\text{н}} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{\text{н}} = 140 \cdot 0,488 = 68,3 \quad \text{кВар}.$$

Активная мощность, потребляемая заводом с учетом синхронного двигателя

$$P_3 = P + R_{\text{НА}} = 750 + 140 = 890 \text{ кВт}.$$

Реактивная мощность, потребляемая заводом с учетом реактивной мощности синхронного двигателя

$$Q_3 = Q + Q_{\text{НА}} = 451,5 - 68,3 = 383,2 \text{ вар}.$$

Коэффициент мощности завода с учетом работы синхронного двигателя с опережающим током

$$\cos\varphi_2 = \frac{P_3}{\sqrt{P_3^2 + Q_3^2}} = \frac{890}{\sqrt{890^2 + 383,2^2}} = 0,92.$$

Контрольные задачи

Задача 1.20. Какова частота вращения ротора шестиполюсного асинхронного электродвигателя, если он присоединен к напряжению сети частотой $f_1 = 50$ Гц и имеет скольжение ротора $s = 0,04$.

Задача 1.21. Частота вращающегося ротора асинхронного электродвигателя с контактными кольцами $n = 2850$ мин⁻¹. Активное сопротивление обмотки ротора $R_2 = 0,03$ Ом. Частота тока питающей сети $f_1 = 50$ Гц. Определить величину добавочного сопротивления R_d , которое необходимо включить в цепь ротора, чтобы при неизменном электромагнитном моменте частота вращения ротора стала равной $n' = 2100$ мин⁻¹.

Задача 1.22. Асинхронный четырехполюсный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет номинальное скольжение $s_{\text{ном}} = 0,03$ и магнитный поток $\Phi = 0,0275$ Вб.

Определить ЭДС и частоту тока в роторе в момент пуска двигателя, если при номинальной нагрузке $E_{2\text{ ном}} = 1,83$ В, $f_1 = 50$ Гц.

Задача 1.23. Найти величину и фазу номинального тока ротора асинхронного двигателя с контактными кольцами, если известно, что $E_{2\text{ ном}} = 112$ В, $R_2 = 0,08$ Ом, $X_2 = 2,4$ Ом и $s_{\text{ном}} = 0,025$.

Задача 1.24. Для двигателя задачи 1.13 найти пусковой ток и пусковой момент при пуске его без добавочного сопротивления в случае снижения напряжения сети на 10 %.

Указание: при решении задачи воспользоваться упрощенной схемой замещения одной фазы двигателя.

Задача 1.25. Для асинхронного двигателя АИР112М2 (приложение 1.1) найти номинальный вращающий момент и пусковой ток двигателя, при соединении обмоток двигателя по схеме треугольником.

Задача 1.26. Схема соединения обмоток статора асинхронного двигателя при работе под номинальным напряжением «треугольник». При пуске двигателя обмотки статора переключаются на «звезду».

Возможен ли пуск двигателя в ход при нагрузке, равной 5% от номинальной, если кратность пускового момента при номинальном фазном напряжении равна 1,4?

Задача 1.27. Найти электромагнитную мощность двигателя АИР132М4 в номинальном режиме, если потери мощности в стали при этом считать равными $\Delta P_c = 0,05 P_{\text{ном}}$, а потери мощности в обмотках статора $\Delta P_{\text{эл}} = 0,035 P_{\text{ном}}$.

Ответы к контрольным задачам

1.20. $n = 960 \text{ мин}^{-1}$.

1.21. $R_{\text{д}} = 0,15 \text{ Ом}$.

1.22. $E_{2\text{н}} = 61 \text{ В}$, частота тока в роторе при пуске $f_2 = f_1 = 50 \text{ Гц}$.

1.23. $I_{2\text{ном}} = 28 \text{ А}$; $\psi_2 = 36^\circ 50'$.

1.24. $M_{\text{п}}' = 12,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $I_{\text{п}}' = 39,6 \text{ А}$.

1.25. $I_{\text{п}} = 116 \text{ А}$; $M_{\text{п}} = 47,16 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

1.26. Пуск не возможен.

1.27. $P_{\text{эм}} = 11,64 \text{ кВт}$.

Приложение 1.1

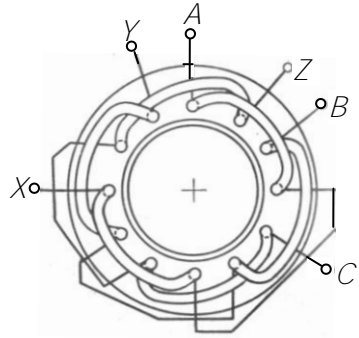
Тип	Электрические параметры						
	P_i , кВт	Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	КПД, %	cosφ	I_n/I_n	M_n/M_n	M_{max}/M_n
АИР56А2	0,18	2730	65,0	0,78	5,0	2,2	2,2
АИР56В2	0,25	2700	66,0	0,79	5,0	2,2	2,2
АИР56А4	0,12	1350	57,0	0,66	5,0	2,2	2,2
АИР56В4	0,18	1350	60,0	0,68	5,0	2,2	2,2
АИР63А2	0,37	2730	72,0	0,84	5,0	2,2	2,2
АИР63В2	0,55	2730	75,0	0,81	5,0	2,2	2,2
АИР63А4	0,25	1320	65,0	0,67	5,0	2,2	2,2
АИР63В4	0,37	1320	68,0	0,70	5,0	2,2	2,2
АИР63А6	0,18	860	56,0	0,62	4,0	2,2	2,2
АИР63В6	0,25	860	59,0	0,62	4,0	2,2	2,2
АИР71А2	0,75	2820	79,0	0,80	6,0	2,6	2,7
АИР71В2	1,10	2810	79,5	0,80	6,0	2,2	2,4
АИР71А4	0,55	1360	71,0	0,71	5,0	2,3	2,4
АИР71В4	0,75	1350	72,0	0,75	5,0	2,5	2,6
АИР71А6	0,37	900	65,0	0,63	4,5	2,1	2,2
АИР71В6	0,55	920	69,0	0,68	4,5	1,9	2,2
АИР71В8	0,25	690	58,0	0,60	4,0	1,6	1,9
АИР80А2	1,50	2880	82,0	0,85	6,5	2,2	2,6
АИР80В2	2,20	2810	83,0	0,87	6,4	2,1	2,6
АИР80А4	1,10	1420	76,5	0,77	5,0	2,2	2,4
АИР80В4	1,50	1410	78,5	0,80	5,3	2,2	2,4
АИР80А6	0,75	920	71,0	0,71	4,0	2,1	2,2
АИР80В6	1,10	920	75,0	0,71	4,5	2,2	2,3
АИР80А8	0,37	670	58,0	0,59	3,5	2,0	2,3
АИР80В8	0,55	670	58,0	0,60	3,5	2,0	2,1
АИР90L2	3,00	2860	84,5	0,85	7,0	2,3	2,6
АИР90L4	2,20	1420	80,0	0,79	6,0	2,0	2,4
АИР90L6	1,50	940	76,0	0,70	5,0	2,0	2,3
АИР90LA8	0,75	700	70,0	0,71	4,0	1,5	2,0
АИР90LB8	1,10	690	74,0	0,72	4,5	1,5	2,2
АИР100S2	4,00	2850	87,0	0,88	7,5	2,0	2,4
АИР100L2	5,50	2850	88,0	0,88	7,5	2,1	2,4

Продолжение прилож. 1.1

Тип	Электрические параметры						
	P , кВт	Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	КПД, %	cosφ	I_p/I_n	M_p/M_n	M_{max}/M_n
АИР100S4	3,00	1410	82,0	0,82	7,0	2,0	2,2
АИР100L4	4,00	1410	85,0	0,84	7,0	2,1	2,4
АИР100L6	2,20	940	81,5	0,74	6,0	1,9	2,2
АИР100L8	1,50	700	76,5	0,70	3,7	1,6	2,0
АИР112M2	7,50	2900	87,5	0,88	7,5	2,0	2,2
АИР112M4	5,50	1430	85,5	0,86	7,0	2,0	2,5
АИР112МА6	3,00	950	83,0	0,72	6,0	2,0	2,2
АИР112МВ6	4,00	950	82,0	0,81	6,0	2,0	2,2
АИР112МА8	2,20	700	78,0	0,70	6,0	1,8	2,2
АИР112МВ8	3,00	700	80,0	0,70	6,0	1,8	2,2
АИР132M2	11,00	2910	89,0	0,86	7,5	1,6	2,2
АИР132S4	7,50	1440	87,5	0,83	7,5	2,0	2,5
АИР132M4	11,00	1450	88,5	0,83	7,5	2,4	2,9
АИР132S6	5,50	960	86,0	0,76	7,0	2,0	2,2
АИР132M6	7,50	950	86,5	0,77	7,0	2,0	2,2
АИР132S8	4,00	700	83,0	0,70	6,0	1,8	2,2
АИР132M8	5,50	700	84,0	0,72	6,0	1,8	2,2
АИР160S2	15,00	2930	90,5	0,89	7,0	2,1	3,0
АИР160M2	18,50	2930	91,0	0,89	7,0	2,2	3,0
АИР160S4	15,00	1460	90,0	0,84	6,5	2,3	2,7
АИР160M4	18,50	1460	90,0	0,86	6,5	2,3	2,7
АИР160S6	11,00	970	87,5	0,81	6,5	1,9	2,6
АИР160M6	15,00	970	89,0	0,82	6,5	2,0	2,6
АИР160S8	7,50	720	86,0	0,72	5,5	1,7	2,3
АИР160M8	11,00	720	87,0	0,73	5,5	1,7	2,3
АИР180S2	22,00	2930	91,0	0,87	7,0	2,2	2,9
АИР180M2	30,00	2930	92,0	0,89	7,0	2,4	2,9
АИР180S4	22,00	1460	91,5	0,84	6,8	2,4	2,5
АИР180M4	30,00	1460	92,0	0,85	7,0	2,4	2,5
АИР180M6	18,50	980	89,5	0,86	6,5	2,0	2,7
АИР180M8	15,00	730	88,0	0,74	5,5	1,8	2,4

**Тест 1.1 для компьютерного или аудиторного
контроля знаний студентов
Вариант 1**

1. По эскизу торца статора с лобовыми частями обмотки определить число пар полюсов p и частоту вращения магнитного поля n_1 асинхронного двигателя, если частота питающего напряжения $f_1 = 50$ Гц.



2. Трехфазный асинхронный двигатель имеет следующие данные: $P_{\text{ном}} = 3$ кВт, $n_{\text{ном}} = 1420$ мин⁻¹, $\eta_{\text{ном}} = 83,5\%$, $\cos\phi_{\text{ном}} = 0,84$. Двигатель рассчитан на напряжение 220/380 В частотой $f_1 = 50$ Гц. Определить: 1) схему соединений обмотки статора при линейном напряжении питающей сети $U_{\text{л}} = 380$ В; 2) ток $I_{\text{ном}}$, потребляемый из сети; 3) число пар полюсов p ; 4) скольжение $S_{\text{ном}}$.

3. Изменяется ли частота ЭДС статора (f_1) и ротора (f_2) при увеличении нагрузки на валу асинхронного двигателя? Если изменяется, то как?

4. Во сколько раз ЭДС в обмотке ротора асинхронного двигателя при пуске больше, чем при номинальном режиме, если $n_{\text{ном}} = 960$ мин⁻¹?

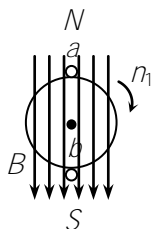
5. Определить пусковой момент $M_{\text{п}}$ трехфазного асинхронного двигателя с $P_{\text{ном}} = 2,2$ кВт, $n_{\text{ном}} = 950$ мин⁻¹, $k_{\text{м}} = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 1,8$. Как изменится M'_1 при понижении напряжения сети на 10%?

Ответы

1. $p =$ $n_1 =$	2. 1) Y или Δ 2) $I_{\text{ном}} =$ 3) $p =$ 4) $S_{\text{ном}} =$	3. $f_1 -$ $f_2 -$	4. $\frac{E_{2\text{I}}}{E_{2\text{III}}} =$	5. $M_{\text{п}} =$ $M'_1 = \dots M_1$
---------------------	---	-----------------------	--	---

Вариант 2

1. Магнитное поле с индукцией B вращается по ходу часовой стрелки с синхронной частотой n_1 .



Определить направление индуцированной в проводниках ротора (a, b) ЭДС (и тока), указать точкой и крестиком. Затем по правилу левой руки найти и указать на чертеже направления силы F , действующей на проводники с током (влево или вправо). Указать направление вращения ротора n .

2. Паспортные данные трехфазного асинхронного двигателя: $P_{\text{ном}} = 2,2$ кВт, $n_{\text{ном}} = 950$ мин⁻¹, $\Delta Y = 220 / 380$ В, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,73$, $\eta_{\text{ном}} = 81\%$. Определить: схему соединений обмотки статора при линейном напряжении сети $U_{\text{л}} = 220$ В; потребляемый двигателем ток $I_{\text{ном}}$; скольжение $S_{\text{ном}}$.

3. По паспортным данным асинхронного двигателя, указанным в задаче 2, определить суммарные потери мощности ΔP_{Σ} в двигателе.

4. Рассчитать сопротивление R'_1 пускового реостата, включаемого в цепь фазного ротора асинхронного двигателя, чтобы пусковой момент $M_{\text{п}} = M_{\text{мах}}$, если приведенное сопротивление ротора $R'_2 = 0,5$ Ом, а $X_{\text{к}} = 5$ Ом.

5. Для асинхронного двигателя с $P_{\text{ном}} = 55$ кВт, $n_{\text{ном}} = 1440$ мин⁻¹ определить номинальный момент $M_{\text{ном}}$ на валу. Как изменится момент M'_1 при понижении напряжения питающей сети на 5%?

Ответы

1. $a-$ $b-$ F_a- F_b-	2. 1) Y или Δ 2) $I_{\text{ном}}$ 3) $S_{\text{ном}}$	3. $\Delta P_{\Sigma} =$	4. $R'_1 =$	5. $M_{\text{ном}} =$ $M' =$
-------------------------------------	--	--------------------------	-------------	---------------------------------

Вариант 3

1. Фазная обмотка асинхронного двигателя состоит из трех секций. Какова ЭДС E_c , индуцируемая в одной секции обмотки, если обмотка статора соединена треугольником и подключена к питающей сети напряжением 380 В?

2. Определить сопротивление R_p , которое надо включить в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором, чтобы он при номинальном моменте на валу вращался с частотой $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$. Сопротивление фазы обмотки ротора $R_2 = 0,1 \text{ Ом}$, а номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1440 \text{ мин}^{-1}$.

3. В каком из указанных значений параметров, характерных для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, допущена ошибка? 1) $s_{\text{ном}} = 3...8\%$; 2) $M_p = (1,1...2,0) M_{\text{ном}}$; 3) $M_{\text{max}} = (1,6...2,4) M_{\text{ном}}$; 4) $i_x = 5...10\%$; 5) $I_p = (5...7) I_{\text{ном}}$. Ответ дать, назвав номер ошибочного значения параметра.

4. Как изменится ток холостого хода I_{1x} и номинальный $\cos\phi_{\text{ном}}$ асинхронного двигателя, если увеличить воздушный зазор между ротором и статором? Дать соответствующие пояснения. Ответ привести в форме \uparrow (увеличится) или \downarrow (уменьшится).

5. Как изменятся пусковой фазный и линейный токи, а также пусковой момент асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, если при пуске обмотку статора переключить с треугольника на звезду?

Ответы

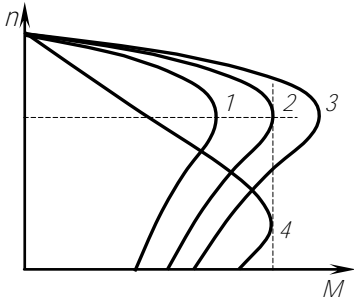
1. $E_c =$	2. $R_p =$	3.	4. I_{1x} $\cos\phi_{\text{ном}}$	5. $I_{\text{пф}\gamma} / I_{\text{пф}\Delta} =$ $I_{\text{пл}\gamma} / I_{\text{пл}\Delta} =$ $M_{\text{п}\gamma} / M_{\text{п}\Delta} =$
---------------	---------------	----	--	---

Вариант 4

1. Шестиполусный асинхронный двигатель снабжен регулятором частоты. При частоте тока в обмотке статора $f_1 = 40$ Гц двигатель вращается с $n = 760$ мин⁻¹. Каково скольжение s асинхронного двигателя в этих условиях?

2. Трехфазный асинхронный двигатель потребляет из сети полную мощность $S_1 = 45$ кВ · А. Коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,89$. Суммарные потери мощности в двигателе $\Delta P_\Sigma = 4$ кВт. Найти КПД двигателя.

3. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя представлена на рисунке (кривая 2). Какой станет эта характеристика при увеличении напряжения? Ответ дать, назвав номер соответствующей кривой.



4. Как изменится частота вращения, ток обмотки статора и допустима ли последующая работа асинхронного двигателя, если в номинальном режиме работы оборвется один из линейных проводов? Ответ дать в форме \uparrow (увеличится) или \downarrow (уменьшится).

5. Рассчитать сопротивление R'_r , вводимое в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором, для уменьшения пускового тока до $I'_i = 3I_{in}$. Параметры схемы замещения двигателя: $X_k = 17$ Ом, $R_k = 14$ Ом, а кратность пускового тока при пуске без реостата $I_{п}/I_{ном} = 6$.

Ответы

1. $s =$	2. $\eta =$	3.	4.	5. $R_{п} =$
-------------	----------------	----	----	-----------------

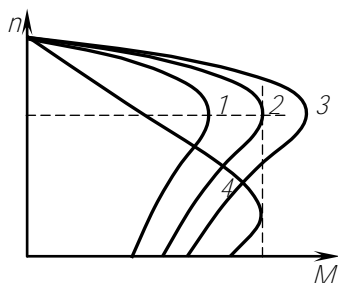
Вариант 5

1. На какой угол повернется магнитное поле четырехполюсного асинхронного двигателя за время $t = (1/4)T$?

2. Определить потери в меди обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя, работающего в номинальном режиме, паспортные данные которого: $P_{\text{ном}} = 17$ кВт, $\eta_{\text{ном}} = 0,88$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,88$, $U_{\text{ном}} = 220/380$ В. Активное сопротивление фазы обмотки статора $R_1 = 0,25$ Ом. Двигатель питается от сети напряжением $U_{\text{д}} = 220$ В.

3. Как изменятся пусковой ток $I_{\text{п}}$ трехфазного асинхронного двигателя, его скольжение s и пусковой момент $M_{\text{п}}$, если ввести в цепь ротора резистор, при условии, что момент на валу двигателя останется неизменным? Ответ дать в форме \uparrow (увеличится) или \downarrow (уменьшится).

4. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя представлена на рисунке (кривая 2). Какой она станет при введении в цепь ротора дополнительного сопротивления? Ответ дать, назвав номер соответствующей кривой.



5. Асинхронный двигатель АИР90L6 снабжен преобразователем частоты. Какой будет скорость вращения асинхронного двигателя, если преобразователь частоты снизит ее до $f_1' = 25$ Гц при сохранении неизменными магнитного потока и момента на валу? При частоте $f_{1 \text{ ном}} = 50$ Гц скольжение двигателя $s_{\text{ном}} = 0,06$.

Ответы

1.	2. $\Delta P_{\text{э1}} =$	3. $I_{\text{п}}$ s $M_{\text{п}}$	4.	5. $n' =$
----	--------------------------------	---	----	--------------

Вариант 6

1. Запустится ли асинхронный двигатель, статорные обмотки которого соединены по схеме треугольник, в условиях легкого пуска, если имеет место обрыв: а) одного из линейных проводов; б) одной из фаз статорной обмотки? Ответ дать в форме «да» или «нет».

2. Во сколько раз частота ЭДС в обмотке ротора при пуске больше, чем при номинальном режиме, если $s_{\text{ном}} = 5\%$?

3. Как изменятся ток I_{1x} , магнитный поток Φ в магнитопроводе и потери ΔP_c в нем, если обмотки статора ошибочно соединены не звездой, а треугольником? К каким последствиям приведет продолжительная работа двигателя с номинальным моментом на валу в этих условиях?

4. Паспортные данные трехфазного асинхронного двигателя типа АИР112Н2 следующие: $P_{\text{ном}} = 7,5$ кВт, $n_{\text{ном}} = 2900$ мин⁻¹, $\eta_{\text{ном}} = 87,5\%$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,88$, $U_{\text{ф.ном}} = 220$ В. Определить ток $I_{\text{ном}}$, активную $P_{\text{ном}}$ и реактивную $Q_{\text{ном}}$ мощности, потребляемые от сети при номинальной нагрузке на валу, если двигатель питается от сети напряжением $U_{\text{л}} = 380$ В.

5. Как изменятся ток I_2 , ЭДС E_2 , частота f_2 цепи ротора и потери в нем с уменьшением его частоты вращения? Ответ дать в форме \uparrow (увеличится) или \downarrow (уменьшится).

Ответы

1. а. б.	2. $\frac{f_2}{f_2 \text{ ии}} =$	3. I_{1x} Φ ΔP_c	4. $I_{\text{ном}} =$ $P_{\text{ном}} =$ $Q_{\text{ном}} =$	5. I_2 E_2 f_2
----------------	--------------------------------------	--	--	-------------------------------

ГЛАВА 2. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Задачи с решениями

Задача 2.1. Построить диаграммы распределения магнитных индукций поля ротора, поля токов статора и результирующего поля двухполюсного синхронного генератора для двух режимов: 1) ЭДС фазы статора E_0 и ток статора I совпадают по фазе; 2) ток I отстает от E_0 на угол ψ .

Выяснить по диаграмме природу электромагнитного момента $M_{эм}$ и влияние на него угла рассогласования θ между магнитными осями полюсов ротора и результирующего поля синхронного генератора (СГ). Определить возможность регулирования активной мощности, отдаваемой генератором в сеть.

Решение. Основное магнитное поле синхронного генератора создается постоянным током I_B в обмотке возбуждения ротора. Распределение магнитной индукции $B_0(x)$ в воздушном зазоре машины синусоидально благодаря форме полюсов ротора или распределению обмотки возбуждения по пазам ротора. Поэтому магнитное поле ротора можно рассматривать как волну магнитной индукции, бегущую по зазору (рис. 2.1, а). При вращении ротора турбиной это поле индуцирует синусоидальные ЭДС e_0 в проводниках статора. Направление ЭДС e_0 определяется по правилу правой руки и указано точками и крестиками (рис. 2.1, б). Максимальная ЭДС E_{0m} наводится в проводниках, где в данный момент магнитная индукция максимальна B_{0m} .

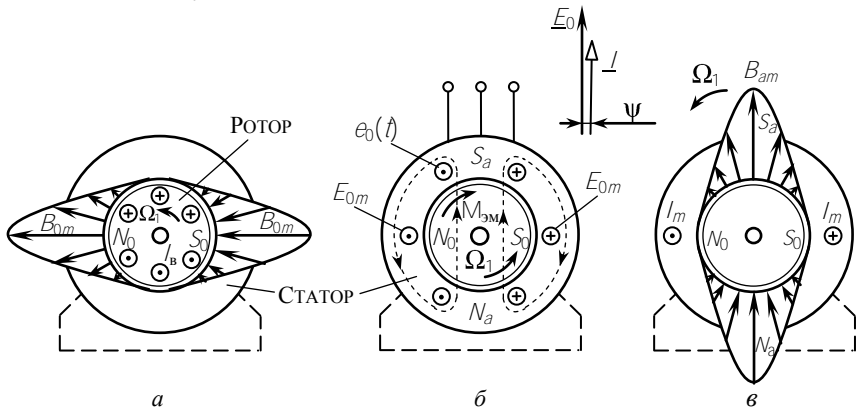


Рис. 2.1

Если к обмотке статора подключен приемник и ток статора I совпадает по фазе с E_0 , то картина магнитного поля токов статора представлена двумя замкнутыми магнитными линиями, его полюсы N_a, S_a определены по правилу правого винта (рис. 2.1, б). Точки статора создают вращающееся магнитное поле, распределение магнитной индукции которого $B_a(x)$ вдоль зазора по окружности статора синусоидально (рис. 2.1, в). Это поле вращается синхронно с полем ротора (относительно друг друга они неподвижны).

Как видно из рис. 2.1, б, возникает взаимодействие полюсов $N_0 - S_a$ и $S_0 - N_a$, создающее электромагнитный момент, противодействующий вращению. Для поддержания вращения ротора с прежней скоростью необходимо затрачивать механическую энергию турбины.

При наложении магнитных полей ротора и статора образуется результирующее магнитное поле. Сложение двух магнитных полей с синусоидальным распределением магнитных индукций можно выполнить сложением векторов B_{0m} и B_{am} , если допустить, что магнитная цепь не насыщена. Определение вектора результирующего магнитного поля $B_{m\text{рез}}$ (рис. 2.2, а) и диаграмма распределения магнитной индукции (рис. 2.2, б) даны для случая, когда ЭДС E_0 и ток статора I совпадают по фазе.

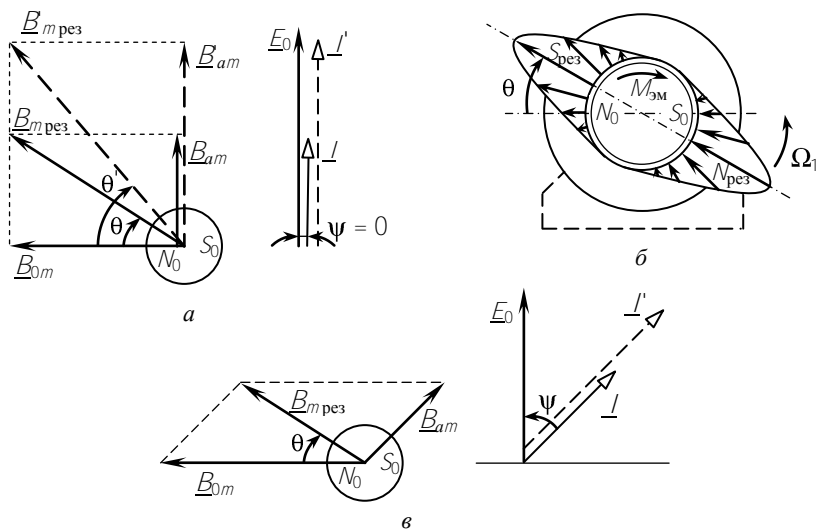


Рис. 2.2

Если ток статора I отстает от ЭДС E_0 на некоторый угол ψ , то проводники статора с максимальным током I_m будут на рис. 2.1, б смещены относительно полюсов ротора $N_0 - S_0$ на тот же угол ψ противоположно вращению.

Построение вектора $B_{m\text{рез}}$ дано на рис. 2.2, в.

В обоих случаях амплитуда результирующей магнитной индукции (магнитная ось результирующего поля) смещается относительно магнитной оси поля ротора на угол θ в сторону отставания тем больше, чем больше активная нагрузка ($I' > I$, угол $\theta' > \theta$ на рис. 2.2, а).

Угол θ между магнитными осями полюсов ротора и результирующего поля машины называют углом рассогласования (полюсов).

В генераторе полюсы ротора являются ведущими, «тянущими» за собой полюсы результирующего поля. Возникающий при взаимодействии полюсов электромагнитный момент

$$M = \frac{3}{\Omega_1} \cdot \frac{E_0 U}{X} \sin\theta = M_{\max} \sin\theta,$$

противодействующий вращению, уравнивается вращающим моментом турбины. Чем больше момент турбины, тем больше активная мощность $P \approx P_{y1} = \Omega_1 M$, отдаваемая генератором в сеть (она максимальна при $\theta = 90^\circ$).

Таким образом, активная мощность генератора на электростанции не определяется сопротивлением приемников в сети, а задается регулированием механической мощности турбины (впуском пара или воды в турбину).

Задача 2.2. Трехфазный синхронный генератор, обмотка которого соединена звездой, включается на параллельную работу с сетью напряжением $U = 220$ В. При включении соблюдены необходимые условия: ЭДС генератора E_0 равна по величине и по фазе напряжению U сети. Синхронное реактивное сопротивление $X = 0,5$ Ом, активным сопротивлением из-за малости можно пренебречь.

Построить векторные диаграммы и определить ток статора, активную и реактивную мощности генератора для следующих режимов:

- 1) ЭДС фазы статора равна фазному напряжению сети ($\underline{E}_0 = \underline{U}$);
- 2) после включения генератора на параллельную работу увеличивают ток возбуждения ротора I_v и ЭДС E'_0 возрастает до 230 В (режим перевозбуждения);
- 3) уменьшают I_v и ЭДС E''_0 снизилась до 210 В (режим недовозбуждения);
- 4) при $\underline{E}_0 = \underline{U}$ к ротору применен дополнительный вращающий момент, и ротор получает временное ускорение, в результате чего вектор \underline{E}_0 опережает \underline{U} на угол $\theta = 20^\circ$.

Решение. По второму закону Кирхгофа напряжение фазы статора $\underline{U} = \underline{E}_0 - jX \underline{I}$, откуда ток статора

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}_0 - \underline{U}}{jX} = \frac{\Delta \underline{U}}{jX}.$$

Векторная диаграмма для первого режима приведена на рис. 2.3, а, где:

$\Delta \underline{U} = \underline{E}_0 - \underline{U} = 0$, значит $I = 0$, $P = 0$, $Q = 0$ – генератор работает холостую.

Векторная диаграмма для второго режима дана на рис. 2.3, б.

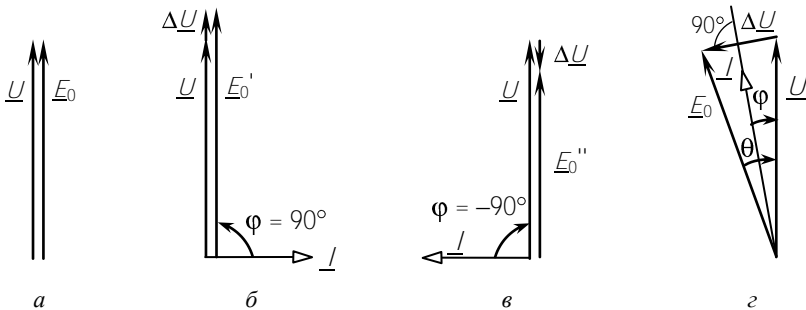


Рис. 2.3

С ростом тока возбуждения возрастает E'_0 . Модуль $\Delta U = E'_0 - U = 230 - 220 = 10 \text{ В}$, а ток $I' = \frac{\Delta U}{X} = \frac{10}{0,5} = 20 \text{ А}$.

Вектор I' отстает по фазе от ΔU на 90° , так как цепь содержит лишь реактивное сопротивление X . По отношению к напряжению U сети ток I' является отстающим ($\varphi = 90^\circ$), и машина вырабатывает индуктивную реактивную мощность $Q = 3U/\sin\varphi = 13,2 \text{ в.â.â.â.}$, а активная мощность $P = 3U/\cos\varphi = 0$.

Для третьего режима векторная диаграмма дана на рис. 2.3, в. Здесь модуль $\Delta U = U - E''_0 = 10 \text{ В}$, $I'' = 10/0,5 = 20 \text{ А}$, но вектор тока, отставая на 90° от ΔU , опережает на 90° напряжение сети ($\varphi = -90^\circ$).

Значит, $Q = 3U/\sin\varphi = -13,2 \text{ в.â.â.â.}$, т. е. в режиме недовозбуждения ($I_a < I_a^*$) синхронный генератор вырабатывает емкостную мощность. Активная мощность $P = 3U/\cos\varphi = 0$.

Рассмотрим четвертый режим. После включения генератора в сеть при $U = E_0$ увеличен вращающий момент первичного двигателя (турбины). В результате поле ротора обгоняет результирующее поле машины на угол $\theta = 20^\circ$, т. е. вектор E_0 опережает U на $\theta = 20^\circ$. Векторная диаграмма дана на рис. 2.3, г. Вектор $\Delta U = E_0 - U$ направлен к уменьшаемому, а ток I отстает по фазе от ΔU на 90° . Он имеет активную составляющую $I \cos\psi \approx I \cos\varphi$, совпадающую по фазе с E_0 . Это значит, что генератор отдает в сеть активную мощность

$$P = 3U/\cos\varphi \approx 3E_0/\cos\psi.$$

Из векторной диаграммы, представленной на рис. 2.3, г, найдем:

$$\Delta U = 2U \sin\varphi = 2 \cdot 220 \cdot \sin 10^\circ = 76,4 \text{ В};$$

$$I = \Delta U / X = 76,4 / 0,5 = 152,8 \text{ \AA}.$$

Активная и реактивная мощности генератора равны соответственно:

$$P = 3 \cdot 220 \cdot 152,8 \cos 10^\circ = 99,3 \text{ кВт}.$$

$$Q = 3UI \sin \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 152,8 \sin 10^\circ = 17,51 \text{ квар}.$$

Таким образом, регулируя ток возбуждения ротора, изменяют лишь реактивную мощность синхронного генератора. Для отдачи генератором активной мощности увеличивают вращающий момент турбины впуском пара или воды.

Задача 2.3. Трехфазный синхронный генератор имеет следующие номинальные данные: $S_{\text{ном}} = 1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $U_{\text{ном}} = 6,3 \text{ кВ}$, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$, $n_{\text{ном}} = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $\eta_{\text{ном}} = 95,5\%$.

Определить число пар полюсов, ток статора и электромагнитную мощность генератора.

Решение. С учетом того, что частота вращения СГ равна частоте вращения магнитного поля, индуцируемого токами обмотки статора (поля реакции якоря), получим, что число его пар полюсов

$$p = \frac{60 f}{n_{\text{п}}} = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3.$$

Ток статора

$$I = \frac{S_{\text{п}}}{\sqrt{3} U_{\text{п}}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 146,8 \text{ \AA}.$$

Электромагнитная мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{\text{э.п}} = \frac{S_{\text{п}} \cdot \cos \varphi_{\text{п}}}{\eta_{\text{п}}} = \frac{1600 \cdot 0,8}{0,955} = 1340,3 \text{ кВт}.$$

Задача 2.4. Трехфазный СГ имеет $S_{\text{ном}} = 1500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $U_{\text{ном}} = 6600 \text{ В}$, активное сопротивление фазы обмотки статора $R = 0,45 \text{ Ом}$, син-

хронное сопротивление $X = 6 \text{ Ом}$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$ ($\varphi > 0$). Обмотка статора соединена звездой.

Определить активное и индуктивное падения напряжения в фазе для режима номинальной нагрузки генератора (в процентах от U_{ϕ}).

С помощью векторной диаграммы рассчитать ЭДС фазы E_0 генератора.

Как изменится ЭДС E_0 , если генератор работает с тем же напряжением U_{ϕ} , номинальным током, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$, но $\varphi < 0$?

Решение. Известно, что в случае ненасыщенного магнитопровода справедливо соотношение

$$\underline{E}_0 = \underline{U}_0 + j\underline{I}X + \underline{I}R, \quad (2.1)$$

где $\underline{I}X = \Delta U_{0.\delta}$, $\underline{I}R = \Delta U_{0.a}$ – соответственно индуктивное и активное падения напряжения в фазе обмотки статора генератора.

Ток статора, соответствующий режиму номинальной нагрузки,

$$I_{\text{н}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}}} = \frac{1500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6600} = 131 \text{ А.}$$

Фазное напряжение генератора

$$U_{0.\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}} = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3810,5 \text{ В.}$$

Найдем падения напряжения в режиме номинальной нагрузки

$$\Delta U_{0.\delta.\text{н}} \% = \frac{\Delta U_{0.\delta.\text{н}}}{U_{0.\text{н}}} \cdot 100 = \frac{I_{\text{н}} \cdot X}{U_{0.\text{н}}} \cdot 100 = \frac{131 \cdot 6}{3810,5} \cdot 100 = 20,6\%,$$

$$\Delta U_{0.a.\text{н}} \% = \frac{I_{\text{н}} \cdot R}{U_{0.\text{н}}} \cdot 100 = \frac{131 \cdot 0,45}{3810,5} \cdot 100 = 1,55\%.$$

Векторная диаграмма синхронного генератора, построенная по выражению (2.1) для случая индуктивной нагрузки ($\varphi > 0$), приведена на рис. 2.4.

Из векторной диаграммы можно найти величину ЭДС E_0 по теореме косинусов

$$E_0 = \sqrt{U_0^2 + \Delta U_0^2 - 2U_0 \cdot \Delta U_0 \cos \gamma}, \quad (2.2)$$

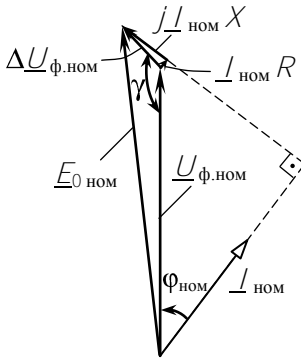


Рис. 2.4.

где $\Delta U_0 = \sqrt{\Delta U_{0,0}^2 + \Delta U_{0,a}^2}$.

Для режима номинальной нагрузки имеем

$$\varphi_{\text{н}} = \arccos 0,8 = 36,9^\circ,$$

$$\Delta U_{0,\text{н}} = 788,2 \text{ \AA},$$

$$\gamma_{\text{н}} = 131,16^\circ.$$

Тогда значение ЭДС, индуцируемой основным магнитным потоком в номинальном режиме работы СГ,

$$\begin{aligned} E_{0\text{н}} &= \sqrt{U_{0,\text{н}}^2 + \Delta U_{0,\text{н}}^2 - 2U_{0,\text{н}} \cdot \Delta U_{0,\text{н}} \cdot \cos \gamma_{\text{н}}} = \\ &= \sqrt{3810,5^2 + 788,2^2 - 2 \cdot 3810,5 \cdot 788,2 \cdot \cos 131,16^\circ} = 4370 \text{ \AA}. \end{aligned}$$

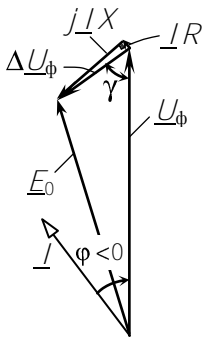


Рис. 2.5.

В случае работы СГ на емкостную нагрузку ($\varphi < 0$) векторная диаграмма примет вид, приведенный на рис. 2.5.

Для случая работы генератора на емкостную нагрузку $\cos \varphi = 0,8$, $\varphi = -36,9^\circ$.

Из векторной диаграммы, приведенной на рис. 2.5, можно определить, что в этом режиме $\gamma = 55,63^\circ$. Тогда, подставив в формулу (2.2) параметры, соответствующие анализируемому режиму работы, найдем

$$E_0 = \sqrt{3810,5^2 + 788,2^2 - 2 \cdot 3810,5 \cdot 788,2 \cdot \cos 55,63^\circ} = 3328 \text{ \AA}.$$

Задача 2.5. Трехфазный синхронный генератор, имеющий $S_{\text{ном}} = 68750 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $U_{\text{ном}} = 13800 \text{ В}$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$, $I_{\text{ном}} = 2880 \text{ А}$, работает параллельно с системой бесконечной мощности с $U_c = 13800 \text{ В} = \text{const}$ при номинальном токе возбуждения. Синхронное сопротивление генератора $X = 3,2 \text{ Ом}$.

Рассчитать угол θ , $\cos\varphi$, I для различных нагрузок генератора, равных $1,0; 0,75; 0,5; 0,25 P_{\text{ном}}$, где $P_{\text{ном}}$ – активная мощность, выдаваемая в систему в режиме номинальной нагрузки.

Решение. Если принять, что магнитопровод генератора ненасыщенный, и пренебречь активным сопротивлением обмотки статора, то уравнение электрического состояния фазы обмотки статора будет иметь вид

$$\underline{E}_0 = \underline{U}_0 + jI X. \quad (2.3)$$

Из условия неизменности тока возбуждения генератора вытекает, что ЭДС $E_0 = \text{const}$. Отсюда следует, что годографом конца вектора \underline{E}_0 при построении совмещенных векторных диаграмм, соответствующих заданным режимам нагрузки синхронного генератора, будет являться окружность радиуса, равного E_0 .

Из условия, что генератор работает на систему бесконечной мощности, следует:

$$U_0 = U_{0,\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}} = \frac{13800}{\sqrt{3}} = 7967,4 \text{ \AA} = \text{const}.$$

Построим векторную диаграмму генератора по (2.3) для номинального режима работы, когда $\varphi_{\text{ном}} = \arccos 0,8 = 36,8^\circ$.

Учтем, что в режиме номинальной нагрузки падение напряжения на синхронном сопротивлении генератора

$$I_{\text{н}} X = 2880 \cdot 3,2 = 9216 \text{ \AA}.$$

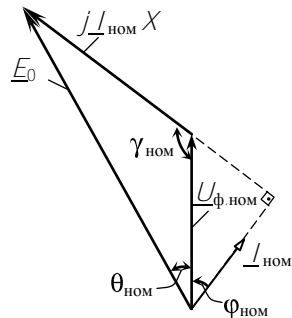


Рис. 2.6

Из векторной диаграммы, приведенной на рис. 2.6, находим:

$$\gamma_{\text{н}} = 180^\circ - (90^\circ - \varphi_{\text{н}}) = 180^\circ - 90^\circ + \varphi_{\text{н}} = 90^\circ + 36,8^\circ = 126,8^\circ.$$

Тогда по теореме косинусов из векторной диаграммы получим

$$\begin{aligned} E_0 &= \sqrt{U_{0,\text{н}}^2 + (I_{\text{н}} \cdot X)^2 - 2U_{0,\text{н}} \cdot I_{\text{н}} \cdot X \cdot \cos \gamma_{\text{н}}} = \\ &= \sqrt{7967,4^2 + 9216^2 - 2 \cdot 7967,4 \cdot 9216 \cdot \cos 126,8^\circ} = 15375 \text{ В}. \end{aligned}$$

Рассчитаем максимальный момент, развиваемый генератором:

$$M_{\text{max}} = \frac{3E_0U_0}{X\Omega_1} = \frac{3 \cdot 15375 \cdot 7967,4}{3,2 \cdot 314} = 0,366 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\Omega_1 = \frac{\pi n}{30} = \frac{\pi \cdot 3000}{30} = 314 \text{ н}^{-1}$ – угловая скорость.

Из условия $M = M_{\text{max}} \cdot \sin \theta$ находим

$$\sin \theta = \frac{M}{M_{\text{max}}} = \frac{P}{\Omega_1 M_{\text{max}}} = \frac{PX\Omega_1}{\Omega_1 \cdot 3E_0U_0} = \frac{PX}{3E_0U_0}.$$

Тогда
$$\theta = \arcsin \left(\frac{PX}{3E_0U_0} \right) \quad (2.4)$$

Учитывая, что в номинальном режиме

$$P_{\text{н}} = S_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}} = 68750 \cdot 0,8 = 55000 \text{ Вт},$$

по формуле (2.4) получаем

$$\theta_{\text{н}} = \arcsin \frac{55 \cdot 10^6 \cdot 3,2}{3 \cdot 15375 \cdot 7967,4} = \arcsin 0,479 = 28,62^\circ.$$

Расчет параметров θ , $\cos\varphi$, I для других нагрузок генератора, указанных в условии задачи, проводим аналогично. Ниже дан расчет для случая, когда $P = 0,75 P_{\text{ном}}$.

Величина угла рассогласования

$$\theta = \arcsin \frac{P}{\Omega_1 M_{\text{max}}} = \arcsin \frac{0,75 \cdot 55 \cdot 10^6}{314 \cdot 0,366} = \arcsin 0,359 = 21,03^\circ.$$

Тогда по теореме косинусов для векторной диаграммы, приведенной на рис. 2.6, с учетом рассчитанного значения $\theta = 21,03^\circ$, получим

$$IX = \sqrt{U_{0.\text{im}}^2 + E_0^2 - 2 \cdot U_{0.\text{im}} \cdot E \cdot \cos\theta} =$$

$$= \sqrt{7967,4^2 + 15375^2 - 2 \cdot 7967,4 \cdot 15375 \cos 20,03^\circ} = 8437,5 \text{ \AA}.$$

Рассчитаем теперь ток I и коэффициент мощности $\cos\varphi$:

$$I = \frac{IX}{X} = \frac{8437,5}{3,2} = 2637 \text{ \AA};$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3} U I} = \frac{0,75 \cdot 55 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 13800 \cdot 2637} = 0,654.$$

Расчеты для других нагрузок генератора выполнены аналогично. Результаты расчетов представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

$P/P_{\text{ном}}$	1	0,75	0,5	0,25
$\theta = \arcsin \frac{P}{\Omega_1 M_{\text{max}}}$, эл. градус	28,62	21,03	13,85	6,88
IX , Ом	9216	8437,5	7873,5	7525,5

$I, \text{ A}$	2880	2637,2	2460,5	2351,7
$\cos\varphi$	0,8	0,654	0,47	0,245

Задача 2.6. Для турбогенератора типа Т2-30-2 с паспортными данными $U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$, $P_{\text{ном}} = 30 \cdot 10^3 \text{ кВт}$, $X = 9,35 \text{ Ом}$, $I_{\text{в}0} = 152 \text{ А}$ (ток возбуждения, при котором ЭДС $E_0 = U_{\text{ф.ном}}$) построить U -образную характеристику при активной нагрузке $P = 0,3P_{\text{ном}}$ и изменении тока возбуждения в таких пределах, при которых коэффициент мощности изменяется от $\cos\varphi = 0,5$ (емк.) до $\cos\varphi = 0,5$ (инд.).

Решение. Расчет U -образной характеристики выполняется по семейству векторных диаграмм (ВД), которые строятся для указанного в условии задачи диапазона изменения коэффициента мощности $\cos\varphi$.

Рассчитаем режим работы и построим векторную диаграмму для случая $\cos\varphi_1 = 1$. Учитывая, что ток статора $I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos\varphi}$, получим

$$I_1 = \frac{0,3P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos\varphi_1} = \frac{0,3 \cdot 30 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3 \cdot 1} = 495 \text{ А}.$$

Тогда падение напряжения в фазе обмотки статора

$$\Delta U_{\delta 1} = I_1 X = 495 \cdot 9,35 = 4628,25 \text{ В}.$$

Фазное напряжение обмотки статора

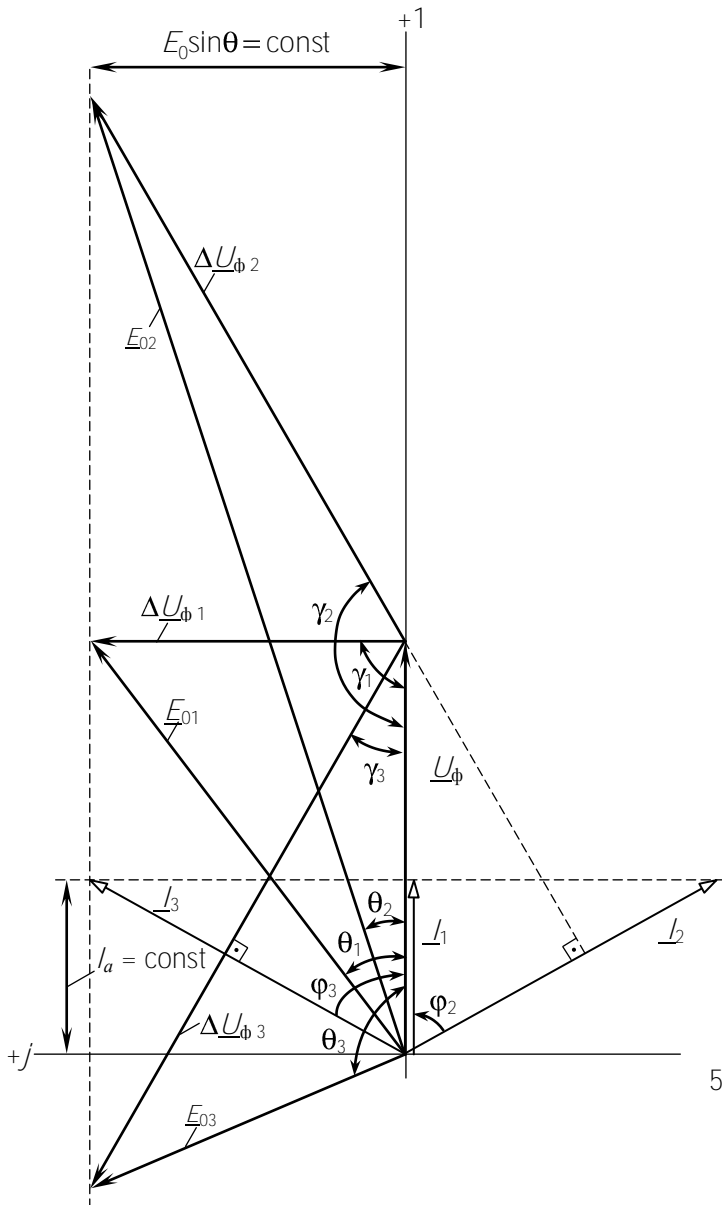
$$U_{\delta. \text{ф.}} = U_{\text{ф.}} / \sqrt{3} = 6062 \text{ В}.$$

Векторная диаграмма фазы обмотки статора при $\cos\varphi = 1$ приведена на рис. 2.7. Из нее получим

$$E_{01} = \sqrt{U_{\delta. \text{ф.}}^2 + \Delta U_{\delta 1}^2} = \sqrt{6062^2 + 4628,25^2} = 7627 \text{ В}.$$

В случае линейности характеристики намагничивания СТ его ЭДС E_0 пропорциональна току возбуждения. Поэтому для рассчитываемого режима ток возбуждения

$$I_{a1} = I_{a0} \frac{E_{01}}{U_{0.\hat{\omega}\hat{\omega}}} = 152 \frac{7627}{6062} = 191,2 \text{ \AA.}$$



Выполним расчет и для случаев: а) $\cos\varphi_2 = 0,5$, $\varphi_2 = 60^\circ$:

$$I_2 = \frac{0,3 \cdot 30 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3 \cdot 0,5} = 990 \text{ \AA},$$

$$\Delta U_{02} = I_2 \cdot X = 990 \cdot 9,35 = 9256,5 \text{ \AA};$$

$$\gamma_2 = 180 - (90 - \varphi_2) = 90 + \varphi_2 = 150^\circ;$$

$$E_{02} = \sqrt{U_{0,\text{нн}}^2 + \Delta U_{02}^2 - 2U_{0,\text{нн}} \cdot \Delta U_{02} \cdot \cos\gamma_2} =$$

$$= \sqrt{6062^2 + 9256,5^2 - 2 \cdot 6062 \cdot 9256,5 \cdot \cos 150^\circ} = 14820 \text{ \AA}.$$

Ток возбуждения

$$I_{a2} = I_{a0} \frac{E_{02}}{U_{0,\text{нн}}} = 152 \frac{14820}{6062} = 371,6 \text{ \AA}.$$

б) $\cos\varphi_3 = 0,5$, $\varphi_3 = -60^\circ$.

$$I_3 = 990 \text{ \AA}, \quad \Delta U_{03} = I_3 \cdot X = 990 \cdot 9,35 = 9256,5 \text{ \AA},$$

$$\gamma_3 = 180^\circ - (90^\circ + 60^\circ) = 30^\circ,$$

$$E_{03} = \sqrt{6062^2 + 9256,5^2 - 2 \cdot 6062 \cdot 9256,5 \cdot \cos 30^\circ} = 5024 \text{ \AA},$$

$$I_{a3} = I_{a0} \frac{E_{03}}{U_{0,\text{нн}}} = 152 \cdot \frac{5024}{6062} = 126 \text{ \AA}.$$

Совмещенные векторные диаграммы, соответствующие выполненным выше расчетам, приведены на рис. 2.7.

Аналогично можно выполнить расчет и для случая $\varphi = \pm 30^\circ$. Соответствующие векторные диаграммы не приведены.

Результаты расчета сведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

$\cos\varphi$	0,5 (емк)	0,866 (емк)	1	0,866 (инд)	0,5 (инд)
$I, \text{ A}$	990	571,4	495	571,4	990
$I X, \text{ B}$	9256,5	5342,6	4628,25	5342,6	9256,5
$E_0, \text{ B}$	5024	5736	7627	9883	14820
$I_B, \text{ A}$	126	143,8	191,2	247,8	371,6

По результатам расчета построена U-образная характеристика, приведенная на рис. 2.8.

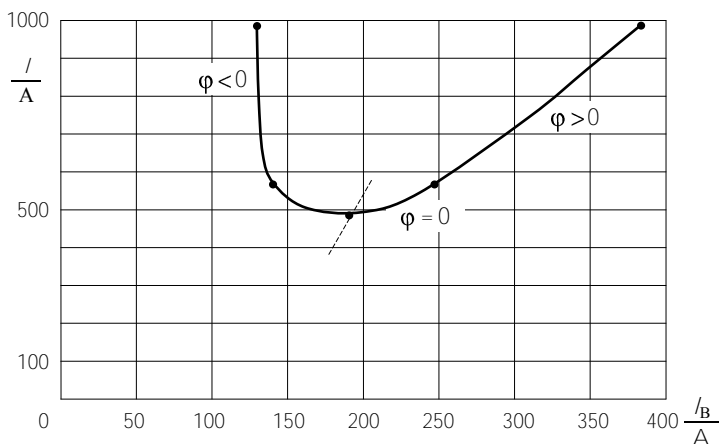


Рис. 2.8

Задача 2.7. Для синхронного двигателя СДН-16-38-8 построить векторную диаграмму и угловую характеристику $M(\theta)$ при номинальной нагрузке и номинальном возбуждении.

Номинальные данные двигателя: $P_{\text{ном}} = 800 \text{ кВт}$, $U_{\text{ном}} = 6000 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $\eta_{\text{ном}} = 94,9\%$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (опереж), $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 1,9$; $X = 40 \text{ Ом}$.

Решение. Номинальная скорость вращения двигателя

$$\Omega_1 = \frac{2\pi f}{p} = \frac{314}{4} = 78,5 \text{ н}^{-1},$$

где $p = 4$ – число пар полюсов двигателя.

Номинальный момент

$$M_{\text{н\ddot{н}}} = \frac{P_{\text{н\ddot{н}}}}{\Omega_1} = \frac{800 \cdot 10^3}{78,5} = 10,19 \cdot 10^3 \text{ Г} \cdot \text{с}.$$

Максимальный момент

$$M_{\text{ма\ddot{х}}} = 1,9 \cdot M_{\text{н\ddot{н}}} = 1,9 \cdot 10,19 \cdot 10^3 = 19,36 \cdot 10^3 \text{ Г} \cdot \text{с}.$$

Угол рассогласования в номинальном режиме работы найдем из уравнения угловой характеристики

$$M = \frac{3U_{\text{д.н\ddot{н}}} \cdot E_0}{\Omega_1 X} \sin \theta = M_{\text{ма\ddot{х}}} \sin \theta. \quad (2.5)$$

Отсюда

$$\sin \theta = \frac{M}{M_{\text{ма\ddot{х}}}}, \quad \theta = \arcsin \frac{M}{M_{\text{ма\ddot{х}}}.$$

Таким образом, получим

$$\theta_{\text{н\ddot{н}}} = \arcsin \frac{M_{\text{н\ddot{н}}}}{M_{\text{ма\ddot{х}}}} = \arcsin \frac{10,19 \cdot 10^3}{19,36 \cdot 10^3} = \arcsin 0,526 = 31,76^\circ.$$

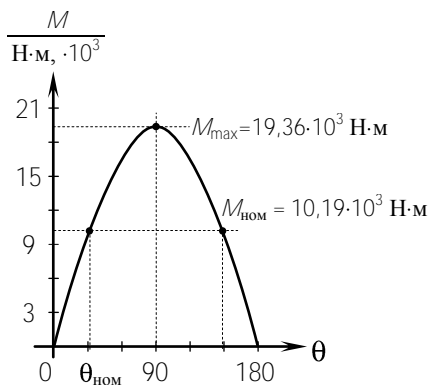


Рис. 2.9

Угловая характеристика $M(\theta)$, построенная по уравнению (2.5), приведена на рис. 2.9.

Векторную диаграмму строим по уравнению электрического состояния фазы обмотки статора в номинальном режиме, пренебрегая падением напряжения в активном сопротивлении обмотки.

Тогда уравнение будет иметь вид

$$\underline{U}_{0.\dot{m}} = \underline{E}_0 + jI_{\dot{m}} X,$$

где $U_{0.\dot{m}} = \frac{U_{\dot{m}}}{\sqrt{3}} = \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 3464 \text{ \AA};$

$$I_{\dot{m}} = \frac{P_{\dot{m}}}{\sqrt{3} U_{\dot{m}} \cdot \eta_{\dot{m}} \cdot \cos \varphi_{\dot{m}}} = 101,4 \text{ \AA}.$$

Построение векторной диаграммы (рис. 2.10) начнем с вектора $\underline{U}_{\dot{m}}.$, располагая его по оси действительных величин комплексной плоскости. Вектор тока $\underline{I}_{\dot{m}}$ опережает вектор напряжения $\underline{U}_{\dot{m}}$ на угол $\varphi_{\dot{m}} = \arccos(0,8) = 36,87^\circ$. В конце вектора $\underline{U}_{\dot{m}}$ строим вектор $jI_{\dot{m}} X$, перпендикулярный вектору тока $\underline{I}_{\dot{m}}$ и опережающий его на 90° . Модуль этого вектора $I_{\dot{m}} X = 101,4 \cdot 40 = 4056 \text{ В}$. Вектор ЭДС \underline{E}_0 получим, соединив начала векторов $\underline{U}_{\dot{m}}$ и $jI_{\dot{m}} X$.

Модуль ЭДС E_0 найдем по теореме косинусов для построенного треугольника ABC напряжений (рис. 2.10)

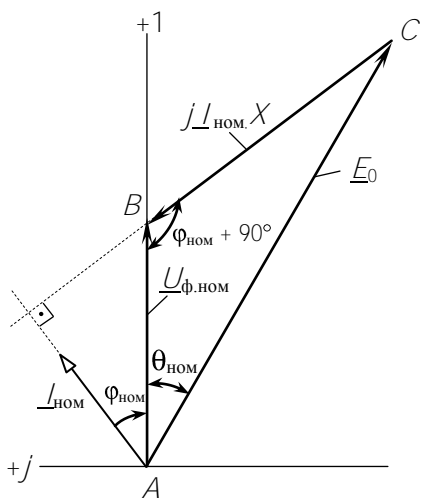


Рис. 2.10

$$E_0 = \sqrt{U_{0.\dot{m}}^2 + I_{\dot{m}}^2 \cdot X^2 - 2U_{0.\dot{m}} I_{\dot{m}} \cdot X \cos(\varphi_{\dot{m}} + 90^\circ)}$$

$$= 6,73 \cdot 10^3 \text{ \AA}$$

Задача 2.8. Исследовать как изменяется $\cos\varphi$ трехфазного синхронного двигателя, рассмотренного в задаче 2.7, при неизменном токе возбуждения $I_{в,ном} = \text{const}$, обеспечивающем ЭДС $E_0 = 6,73 \cdot 10^3$ В, если нагрузка двигателя изменяется в диапазоне $\beta = P/P = 0,25 \dots 1,0$. При решении воспользоваться векторными диаграммами.

Решение. Из условия $I_{в} = I_{в,ном} = \text{const}$ следует, что $E_0 = \text{const}$. Тогда, годографом вектора \underline{E}_0 будет являться окружность радиусом, равным E_0 . Неизменной будет и длина вектора $\underline{U}_{ф,ном}$.

Если пренебречь потерями мощности в обмотке статора, то можно считать $P = P_{эм}$. Учитывая, что $M_{эм} \equiv P_{эм}$, можно найти величину угла рассогласования

$$\theta = \arcsin \frac{M}{M_{\max}} = \arcsin \frac{\beta M_{\hat{m}}}{K_M M_{\hat{m}}} = \arcsin \frac{\beta}{K_M},$$

где $K_M = M_{\max} / M_{\hat{m}}$ – кратность максимального момента синхронного двигателя при $I_{в} = I_{в,ном}$.

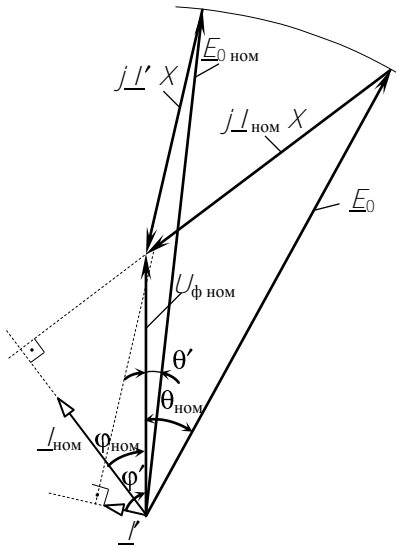


Рис. 2.11

Величины углов рассогласования θ для заданного диапазона изменения нагрузки двигателя приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

$\beta = P/P_{\hat{m}}$	1,0	0,75	0,5	0,25
θ , эл. градус	31,76	23,25	15,26	7,56

Совмещенные векторные диаграммы, построенные для случаев $\beta = 1,0$ и $\beta = 0,25$, по алгоритму, приведенному в задаче 2.7, приведены на рис. 2.11.

Векторы, соответствующие $\beta = 0,25$ отмечены штрихом ('). Векторная диаграмма позволяет

найти, как изменяется угол сдвига фаз φ с изменением β .

Ниже покажем, как этот же расчет выполнить аналитически на основании построенных векторных диаграмм.

Потерю напряжения в синхронном сопротивлении двигателя $I'X$ для загрузки β можно найти по теореме косинусов для соответствующего треугольника напряжений векторной диаграммы:

$$I'X = \sqrt{U_{0.\dot{m}}^2 + E_0^2 - 2U_{0.\dot{m}} \cdot E_0 \cdot \cos\theta}.$$

Тогда ток статора I найдем как $I = I'X/X$. Теперь вычислим соответствующее значение коэффициента мощности $\cos\varphi$ и величину угла сдвига фаз φ :

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\dot{m}} I} = \frac{\beta P_{\dot{m}}}{\sqrt{3} U_{\dot{m}} I}, \quad \varphi = \arccos(\cos\varphi).$$

Ниже дан пример расчета для случая $\beta = 0,25$:

$$\theta' = \arcsin \frac{0,25}{1,9} = 7,56^\circ;$$

$$I'X = \sqrt{3464^2 + 6730^2 - 2 \cdot 3464 \cdot 6730 \cdot \cos 7,56} = 3320 \text{ \AA};$$

$$I' = \frac{I'X}{X} = \frac{3320}{40} = 83 \text{ \AA};$$

$$\cos\varphi' = \frac{0,25 \cdot 800 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 83} = 0,232; \quad \varphi' = \arccos 0,232 = 76,58^\circ.$$

Расчеты для других значений β выполнены аналогично, результаты сведены в табл. 2.4

Таблица 2.4

β	θ , эл. градус	$I'X$, В	I' , А	$\cos\varphi$	φ , эл. градус
---------	-----------------------	-----------	----------	---------------	------------------------

0,25	7,56	3320	83	0,232	76,58
0,5	15,26	3524	88,1	0,437	64,1
0,75	23,25	3902	97,6	0,592	53,7
1,0	31,76	4200	105	0,74	42,2

Некоторое отличие рассчитанных величин от значений, полученных в задаче 2.7, объясняется принятым допущением, что $P = P_{эм}$. Зависимость $\cos\varphi(\beta)$ приведена на рис. 2.12.

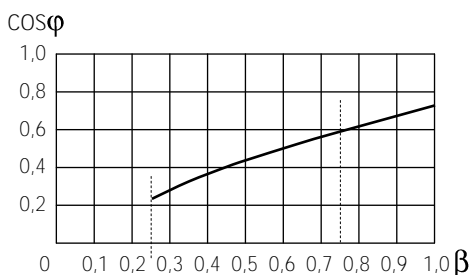


Рис. 2.12

Таким образом, уменьшение нагрузки синхронного двигателя при неизменном токе возбуждения сопровождается уменьшением коэффициента мощности, т. е. ростом генерируемой реактивной мощности.

Задача 2.9. Для турбодвигателя, имеющего $P_{ном} = 1000$ кВт ($S_{ном} = 1160$ кВ·А), $U_{ном} = 6$ кВ, $\eta_{ном} = 96\%$, $X = 20$ Ом, $\cos\varphi_{ном} = 0,8$ (опереж.), $n_{ном} = 3000$ мин⁻¹, построить U -образную характеристику $I(I_B)$ при $P = 0,75P_{ном}$. Указать на ней точку, соответствующую пределу статической устойчивости ($\theta = 90^\circ$).

Решение. При синхронном режиме работы угловая скорость турбодвигателя неизменна и равна

$$\Omega_1 = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад}^{-1}.$$

Максимальный момент, развиваемый двигателем

$$M_{max} = \frac{3U_{ф.ном} \cdot E_0}{\Omega_1 \cdot X}, \quad (2.6)$$

где $U_{ф.ном}$ – номинальное фазное напряжение;

E_0 – ЭДС, индуцируемая в фазе обмотки статора основным магнитным потоком при определенном токе возбуждения;

X – синхронное сопротивление двигателя.

Если принять, что магнитопровод двигателя ненасыщен, то ЭДС E_0 пропорциональна току возбуждения I_b . Это позволяет находить значения ЭДС E_0 при различных значениях тока возбуждения I_b и рассчитывать по (2.6) соответствующие максимальные моменты M_{\max} .

Момент на валу двигателя, соответствующий мощности $P = 0,75P_{\text{ном}} = 0,75 \cdot 1000 = 750$ кВт, для которой требуется построить U -образную характеристику,

$$M = \frac{P}{\Omega_1} = \frac{750 \cdot 10}{314} = 2388,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При различных режимах возбуждения этому моменту будут соответствовать углы рассогласования θ , найденные по выражению $\theta = \arcsin(M/M_{\max})$. Рассчитанные значения углов θ позволяют, воспользовавшись теоремой косинусов для соответствующей векторной диаграммы, найти падения напряжения $I X$ на синхронном сопротивлении X и величины токов статора I синхронного двигателя:

$$I X = \sqrt{U_{\text{д.н}}^2 + E_0^2 - 2U_{\text{д.н}} E_0 \cos\theta}; \quad I = I X / X.$$

Для того чтобы определить диапазон изменения тока возбуждения I_b при построении U -образной характеристики, рассчитаем предварительно два важных режима:

1) режим минимального возбуждения с таким током $I_{b \text{ min}}$, при котором будет иметь место предел статической устойчивости, т. е. $\theta = 90^\circ$.

2) режим нормального возбуждения с током $I_{b \text{ норм}}$, когда $\cos\varphi = 1$.

Соответствующие векторные диаграммы для этих режимов, построенные качественно, приведены на рис. 2.13.

При построении векторных диаграмм принято, что $P_{\text{эл}} \approx P_{\text{эм}} = \text{const}$. Следствием этого является то, что $I \cos\varphi = \text{const}$ и $E \sin\theta =$

Согласно векторной диаграмме, приведенной на рис. 2.13, падение напряжения в этом режиме

$$I_{\min} X = \sqrt{U_{0.\text{нн}}^2 + E_{0\min}^2} = \sqrt{3464^2 + 1443,4^2} = 3753 \text{ \AA},$$

а ток статора

$$I_{\min} = \frac{I_{\min} \cdot X}{X} = \frac{3753}{20} = 187,6 \text{ \AA}.$$

Режим 2. Очевидно, что ток статора соответствующий режиму нормального возбуждения,

$$I_{\text{нн}} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{нн}}} = \frac{750 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 72,1 \text{ \AA}.$$

Значение ЭДС $E_{0\text{норм}}$ найдем из векторной диаграммы (рис. 2.13):

$$E_{0\text{нн}} = \sqrt{U_{0.\text{нн}}^2 + (I_{\text{нн}} X)^2} = \sqrt{3464^2 + (72,1 \cdot 20)^2} = 3753 \text{ \AA}.$$

Ток возбуждения в этом режиме

$$I_{a.\text{нн}} = I_{a0} \frac{E_{0\text{нн}}}{U_{0.\text{нн}}} = I_{a0} \frac{3753}{3464} = 1,08 I_{a0}.$$

На основании выполненных расчетов зададимся набором значений тока возбуждения для построения U -образной характеристики: $I_B = 0,75 I_{B0}$, $I_B = 1,0 I_{B0}$, $I_B = 1,25 I_{B0}$, $I_B = 1,5 I_{B0}$. Ниже выполнены расчеты для случая $I_B = I_{B0}$.

$$E_0 = U_{0.\text{нн}} \frac{I_a}{I_{a0}} = 3464 \cdot \frac{1}{1} = 3464 \text{ \AA};$$

$$M_{\max} = \frac{3 \cdot 3464 \cdot 3464}{314 \cdot 20} = 5732 \text{ Г} \cdot \text{и};$$

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2388,5}{5732} = 0,417; \quad \theta = \arcsin 0,417 = 24,63^\circ;$$

$$I X = \sqrt{3464^2 + 3464^2 - 2 \cdot 3464 \cdot 3464 \cdot \cos 24,63^\circ} = 1477,6 \text{ В};$$

$$I = \frac{1477,6}{20} = 73,8 \text{ А}.$$

Результаты аналогичных расчетов, выполненных для других принятых значений тока возбуждения I_B , приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

I_B / I_{B0}	0,417	0,75	1,0	1,08	1,25	1,5
$E_0, \text{В}$	1443,4	2598	3464	3753	4330	5196
$M_{\max}, \text{Н} \cdot \text{м}$	2388,5	4299	5732	6210,4	7166	8600
M / M_{\max}	1	0,556	0,417	0,385	0,326	0,272
$\theta, \text{эл градус}$	90	33,75	24,63	22,6	19,47	16,12
$I X, \text{В}$	3753	1945	1477,6	1443,4	1570	2101
$I, \text{А}$	187,6	97,25	73,8	72,1	78,5	105

При $I_B < 1,08 I_{B0}$ двигатель, работая с недозвуждением, потребляет реактивную мощность из сети, а при $I_B > 1,08 I_{B0}$ он генерирует реактивную мощность, работая в режиме перевозвуждения. На рис. 2.14 приведена U -образная характеристика.

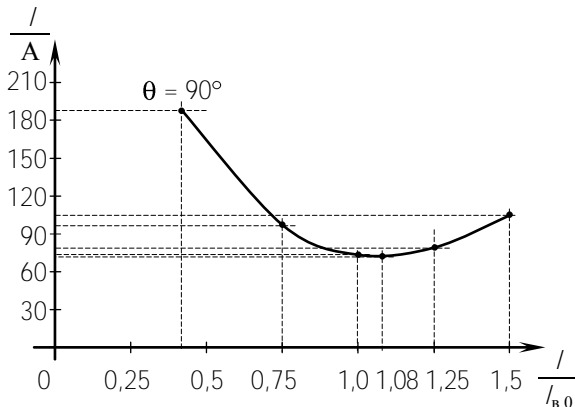


Рис. 2.14

Задача 2.10. Рассчитать, как изменятся параметры режима работы (угол θ , $\cos\varphi$, скорость n , ток I) синхронного двигателя СДН-2-16-36-6 относительно их значений в номинальном режиме, если при неизменном моменте на валу снизить напряжение на зажимах двигателя на 25%. Паспортные данные двигателя $P_{\text{ном}} = 1000$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $n_{\text{ном}} = 1000$ мин⁻¹, $M/M_{\text{max}} = 1,8$; $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (опереж), $X = 40$ Ом, $\eta_{\text{ном}} = 0,995$.

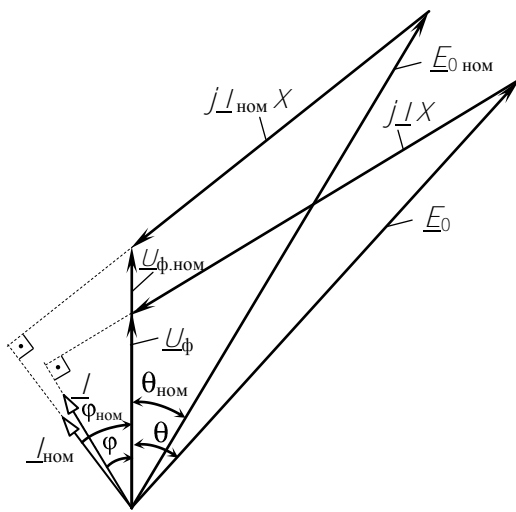
Решение. Выполним расчет для номинального режима работы двигателя. Потребляемый от сети ток

$$I_{\text{л}} = \frac{P_{\text{л}}}{\sqrt{3}U_{\text{л}} \cos\varphi_{\text{л}} \eta_{\text{л}}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,8 \cdot 0,995} = 126 \text{ А.}$$

Угол сдвига фаз между векторами тока $\underline{I}_{\text{ном}}$ и напряжения $\underline{U}_{\text{о.л}}$

$$\varphi_{\text{ном}} = \arccos 0,8 = 36,87^\circ.$$

Падение напряжения на синхронном сопротивлении двигателя $I_{\text{ном}} X = 126 \cdot 40 = 5040$ В, фазное напряжение $U_{\text{о.л}} = U_{\text{л}} / \sqrt{3} = 3464 \text{ В}$. Векторная диаграмма, построенная по уравнению электрического состояния фазы статора $\underline{U}_{\text{о.л}} = \underline{E}_{\text{о.л}} + j\underline{I}_{\text{л}} X$, представлена на рис. 2.15.



Из векторной диаграммы, построенной для номинального режима, находим параметры $E_{0\text{ном}} = 7640 \text{ В}$ и $\theta_{\text{ном}} = 30,4^\circ$.

Выполним расчет для режима работы при $U = 0,75 U_{\text{ном}}$.

Поскольку ток возбуждения не меняется, то остается неизменной и ЭДС, наводимая в обмотке статора основным магнитным потоком, т.е. $E_0 = E_{0\text{ном}} = 7640 \text{ В}$.

Учитывая, что

$$U_0 = 0,75 U_{0,\text{н}} = 0,75 \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 2598 \text{ В},$$

а момент на валу остается неизменным, найдем угол рассогласования

$$\theta = \arcsin \frac{P_{\text{н}} \cdot X}{\eta_{\text{н}} \cdot 3 \cdot U_0 \cdot E_0} = \arcsin \frac{1000 \cdot 40}{0,995 \cdot 3 \cdot 2598 \cdot 7640} = 42,5^\circ.$$

Найденные значения параметров U_ϕ , E_0 и θ , позволяют построить векторную диаграмму для рассматриваемого режима. Совместим ее с векторной диаграммой для номинального режима, приведенной на рис. 2.15. Из нее находим: $I \cdot X = 5986 \text{ В}$ и угол $\phi = 30,8^\circ$. Тогда

$$I = \frac{I \cdot X}{X} = \frac{5986}{40} = 150 \text{ А}.$$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что снижение напряжения питающей сети на 25% при неизменных моменте на валу и токе возбуждения приведут к тому, что:

- скорость вращения не изменится, т. е. двигатель не выйдет из синхронизма (угол $\theta = 42,5^\circ < 90^\circ$);

- угол рассогласования возрастет;

- ток двигателя увеличится;

- угол ϕ уменьшится, т. е. коэффициент мощности возрастет.

Это означает, что двигатель будет генерировать меньшую реактивную мощность.

Контрольные задачи

Задача 2.11. Построить векторные диаграммы индукции магнитного поля реакции якоря $\vec{B}_{a\Sigma} = \vec{B}_{aA} + \vec{B}_{aB} + \vec{B}_{aC}$ для моментов времени, соответствующих: 1) амплитудному значению тока в фазе А, $i_A = I_{A\max}$; 2) амплитудному значению тока в фазе В, $i_B = I_{A\max}$.

Воспользоваться решением задачи 1.1.

Задача 2.12. Построить кривую распределения индукции магнитного поля реакции якоря вдоль развертки статора двухполюсной синхронной машины для моментов времени, указанных в задаче 2.11.

Задача 2.13. Ток статора синхронного генератора отстает по фазе от ЭДС E_0 на 90° . Чему равны при этом угол рассогласования θ и электромагнитный момент $M_{эм}$.

Воспользоваться решением задачи 2.1.

Задача 2.14. Трехфазный синхронный генератор, обмотки статора которого соединены звездой, при линейном напряжении $U = 10$ кВ имеет мощность $S = 865$ кВ·А, $n = 1500$ мин⁻¹, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,8$, потери мощности в обмотках статора $\Delta P = 36$ кВт.

Определить ток статора, электромагнитную мощность и момент, коэффициент полезного действия.

Задача 2.15. Построить векторную диаграмму синхронного генератора, включенного на параллельную работу с системой, при токе возбуждения $i_B = 1,3 i_{B0}$ и $\theta = 0$. Считать, что магнитная цепь генератора линейна. Воспользоваться решением задачи 2.1.

Задача 2.16. Для синхронного генератора, включенного на параллельную работу с системой напряжением $U = 10,5$ кВ, рассчитать мощности, выдаваемые в систему, если при $i_B = 1,1 i_{B0}$ угол $\theta = 30^\circ$. Синхронное сопротивление генератора $X = 2$ Ом.

Задача 2.17. Рассчитать, как изменятся мощности, генерируемые синхронным генератором, описанным в задаче 2.16, если при неизменном $I_B = 1,1 I_{B0}$ к валу ротора приложен внешний момент $M_{вн}$: а) увеличивший угол рассогласования до значения $\theta' = 40^\circ$; б) уменьшивший угол рассогласования до значения $\theta'' = 20^\circ$.

Задача 2.18. Для синхронного генератора, работающего параллельно с системой напряжением $U = 10,5$ кВ и генерирующего мощность $P = 33,33$ МВт, определить нормальный ток возбуждения (в долях от I_{B0}) и угол рассогласования θ , если $X = 2$ Ом.

Задача 2.19. Определить величины углов рассогласования синхронного генератора, работающего параллельно с системой, если при неизменной генерируемой мощности ток возбуждения а) увеличить на 30%, т. е. $I'_a = 1,3 I_a$; б) уменьшить на 30%, т. е. $I''_a = 0,7 I_a$. В исходном режиме $\theta = 30^\circ$. Магнитную цепь принять линейной.

Задача 2.20. Для генератора, рассмотренного в задаче 2.19, найти ток возбуждения (в долях от I_B), соответствующий пределу его статической устойчивости.

Задача 2.21. Синхронный двигатель номинальным напряжением $U_{ном} = 380$ В при нормальном токе возбуждения потребляет от сети мощность $P = 100$ кВт. Рассчитать соответствующие этому режиму угол рассогласования θ и реактивную мощность Q . Как изменятся эти параметры, если при неизменном токе возбуждения мощность, потребляемая двигателем от сети а) возрастет на 20%, т. е. $P' = 1,2 P$; б) уменьшится на 20%, т. е. $P'' = 0,8 P$. Обмотки двигателя соединены звездой, а $X = 0,8$ Ом.

Задача 2.22. Синхронный двигатель номинальным напряжением $U_{ном} = 6$ кВ потребляет от сети мощность $P = 1000$ кВт при нормальном токе возбуждения. Синхронное сопротивление $X = 20$ Ом, обмотки статора соединены звездой. Найти ток I , потребляемый двигателем от сети, угол θ , угол сдвига фаз ϕ и его реактивную

мощность Q . Как изменятся эти величины при: а) $I'_a = 1,3 I_{a, \text{н}} \cdot \delta$; б) $I''_a = 0,7 I_{a, \text{н}} \cdot \delta$ при неизменной активной мощности?

Задача 2.23. Синхронный двигатель, имея один и тот же момент нагрузки на валу, работает в режимах: 1) $\cos \varphi = 1$; 2) $\cos \varphi = 0,8$ (отстающий); 3) $\cos \varphi = 0,8$ (опережающий). Показать, в каком соотношении находятся КПД двигателя в этих режимах работы.

Задача 2.24. Генератор, работающий параллельно с системой, имеет данные: $P_{\text{ном}} = 500$ кВт, $U_{\text{ном}} = 400$ В, $X = 0,38$ Ом. Может ли он выдавать номинальную мощность в систему при токе возбуждения $I = 1,2 I_{в0}$? Чему равен при этом коэффициент запаса статической устойчивости $K_{\zeta} = \frac{P_{\text{мах}} - P_{\text{н}}}{P_{\text{н}}}$?

Задача 2.25. Для генератора, рассмотренного в задаче 2.24, найти ток возбуждения I'_a (в долях от $I_{в0}$), при котором $K'_{\zeta} = 0,3$.

Задача 2.26. Ток возбуждения трехфазной синхронной машины обеспечивает $E_0 = U_{0, \text{н}} = 220$ В. Угол $\theta = 40^\circ$. Полное сопротивление фазы обмотки статора $X = 1,2$ Ом. Пренебрегая активным сопротивлением статора рассчитать: а) в двигательном режиме работы – ток I и мощность P_1 , потребляемые от сети, а также момент на валу, если $\eta = 0,84$, а $n = 1500$ мин⁻¹; б) в генераторном режиме работы – ток I и мощности P и Q , выдаваемые в систему.

Ответы к контрольным задачам

2.13. $\theta = 0$; $M_{\text{эм}} = 0$.

2.14. $I = 50$ А; $P_{\text{эм}} = 728$ кВт; $M_{\text{эм}} = 4,41 \cdot 10^3$ Н·м; $\eta = 0,95$.

2.15. Указание. См. решение задачи 2.12.

2.16. $P = 30,33$ МВт; $Q = -2,62$ Мвар.

2.17. а) $P' = 39,14$ МВт, $Q' = 4,57$ Мвар;

б) $P'' = 20,83$ МВт, $Q = 1,823$ Мвар.

2.18. $I_{\text{в.норм}} = 1,14 I_{\text{в}0}$; $\theta = 28,83^\circ$.

2.19. а) $\theta' = 22,62^\circ$; $\theta'' = 45,68^\circ$.

2.20. $I_{\text{в пр}} = 0,5 I_{\text{в}}$.

2.21. $\theta = 28,8^\circ$, $Q = 0$; а) $\theta' = 35,34^\circ$, $Q' = 11,83$ квар;

б) $\theta'' = 22,7^\circ$, $Q'' = -10,135$ квар.

2.22. $I = 96,25$ А, $\theta = 29,05^\circ$, $\varphi = 0$, $Q = 0$;

а) $I' = 116,53$ А, $\theta' = 21,93^\circ$, $\varphi' = -34,35^\circ$, $Q' = -683$ квар;

б) $I'' = 120,9$ А, $\theta'' = 43,9^\circ$, $\varphi'' = 37,2^\circ$, $Q'' = 760$ квар.

2.23. $\eta_1 > \eta_2 > \eta_3$.

2.24. $K_3 = 0,01$ (или 1%). Выдача мощности невозможна.

2.25. $I_{\text{в}}' = 1,54 I_{\text{в}0}$.

2.26. а) $I = 125,4$ А; $P_1 = 77,56$ кВт; $M = 414,8$ Н·м.

б) $I = 125,4$ А; $P = 77,56$ кВт; $Q = -28,23$ квар.

Тест 2.1 для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов

Вариант 1

1. Назвать основную причину, по которой в мощных синхронных машинах не применяется «обращенная конструкция», т.е. полюсы с обмоткой возбуждения – на статоре, а трехфазная обмотка – на роторе (1) щеточно-контактный узел вместо двух содержит три кольца; 2) снижение надежности; 3) мощность цепи возбуждения меньше 0,5% мощности статора).

2. С какой частотой должен вращаться 80-полюсный ротор гидрогенератора, чтобы получить в обмотке статора частоту ЭДС $f = 50$ Гц?

3. Четырехполюсный трехфазный синхронный двигатель работает параллельно с сетью напряжением $U_{\phi} = 220$ В. Обмотка статора соединена звездой, ЭДС фазы $E_0 = 220$ В, синхронное реактивное сопротивление $X = 0,8$ Ом. Активным сопротивлением пренебречь. Угол рассогласования $\theta = 20^\circ$. Определить ток статора I , отдаваемую генератором активную мощность P и электромагнитный момент M .

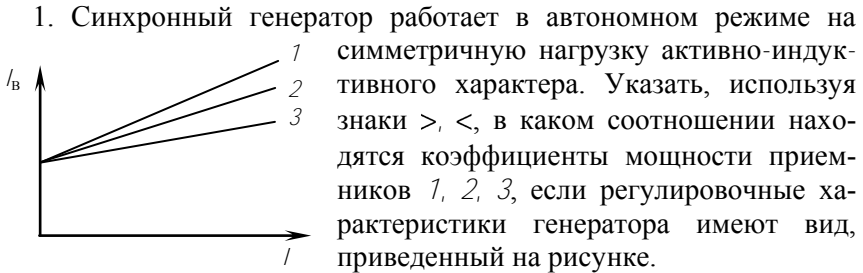
4. Определить частоту вращения, номинальный момент, ток статора, активную и реактивную мощности четырехполюсного синхронного двигателя со следующими номинальными данными: $P_{\text{ном}} = 160$ кВт, $U_{\text{ном}} = 380$ В, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (емк.), $\eta_{\text{ном}} = 0,94$.

5. Установленная мощность электропотребителей промпредприятия $P_{\text{пр}} = 5000$ кВт при $\cos\varphi_{\text{пр}} = 0,8$. Рассчитать $\cos\varphi$ после установки на предприятии синхронного двигателя (СД), работающего в режиме перевозбуждения, если потребляемая синхронным двигателем активная мощность $P_{\text{СД}} = 500$ кВт при $\cos\varphi_{\text{СД}} = 0,85$?

Ответы

1.	2.	3. $I =$ $P =$ $M =$	4. $n =$ $P =$ $M_{\text{ном}} =$ $I_{\text{ном}} =$ $Q =$	5.
----	----	----------------------------	--	----

Вариант 2



2. Синхронный генератор с паспортными данными $P_{\text{ном}} = 630$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6,3$ кВ, $\eta_{\text{ном}} = 93,7\%$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (опереж.), $X = 57$ Ом работает параллельно с сетью. Построить векторную диаграмму и рассчитать ток и реактивную мощность генератора, работающего в режиме холостого хода, если ток возбуждения увеличить до $I_B = 1,2 I_{B0}$, где I_{B0} – ток возбуждения, при котором $E_0 = U_{\text{ф. ном}}$. Считать, что магнитопровод генератора ненасыщенный.

3. Обмотка статора синхронного двигателя с паспортными данными $P_{\text{ном}} = 4000$ кВт, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (опереж.), $\eta_{\text{ном}} = 93\%$, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $n_{\text{ном}} = 3000$ мин⁻¹, $X = 20$ Ом соединена треугольником. Найти угол рассогласования $\theta_{\text{ном}}$, полагая, что $I_B = I_{B0}$. Каким станет угол θ при уменьшении момента на валу на 20% при неизменном $I_B = I_{B0}$?

4. Синхронный двигатель, подключенный к сети напряжением 380 В, развивает на валу мощность 75 кВт; КПД двигателя 92%, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (опереж.). Определить ток, потребляемый двигателем от сети, его реактивную составляющую и реактивную мощность, отдаваемую им в сеть.

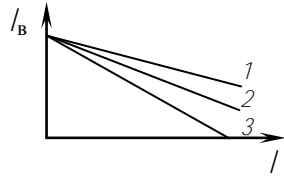
5. Синхронный двигатель приводит во вращение центробежный насос. Напряжение сети уменьшилось до $U = 0,8 U_{\text{ном}}$ кВт, что не привело к выпадению двигателя из синхронизма. Изменится ли производительность насоса, учитывая, что она пропорциональна скорости вращения?

Ответы

1. $\cos\varphi_1$ $\cos\varphi_2$ $\cos\varphi_3$	2. $I =$ $Q =$	3. $\theta_{\text{ном}} =$ $\theta =$	4. $I =$ $I_p =$ $Q =$	5.
---	-------------------	--	------------------------------	----

Вариант 3

1. Синхронный генератор работает в автономном режиме на симметричную нагрузку активно-емкостного характера. Указать, используя знаки $>$, $<$, в каком соотношении находятся коэффициенты мощности приемников 1, 2, 3, если регулировочные характеристики генератора имеют вид, приведенный на рисунке.



2. Синхронный генератор с паспортными данными $P_{\text{ном}} = 630$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6,3$ кВ, $\eta_{\text{ном}} = 93,7\%$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (опереж.), $X = 57$ Ом работает параллельно с сетью. Построить векторную диаграмму и рассчитать ток и реактивную мощность генератора, работающего в режиме холостого хода, если ток возбуждения уменьшить до $I_B = 0,8 I_{B0}$, где I_{B0} – ток возбуждения, при котором $E_0 = U_{\text{ф. ном}}$. Принять, что магнитопровод генератора ненасыщенный.

3. Обмотка статора синхронного двигателя с паспортными данными $P_{\text{ном}} = 400$ кВт, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (опереж.), $\eta_{\text{ном}} = 0,93\%$, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $n_{\text{ном}} = 3000$ мин $^{-1}$, $X = 200$ Ом соединена треугольником.

Определить, при каком токе возбуждения I_B/I_{B0} двигатель, работая с $M = M_{\text{ном}}$, достигнет предела устойчивости ($\theta = 90^\circ$).

4. Полезная мощность первичного двигателя, приводящего во вращение ротор трехфазного синхронного генератора, равна 10 кВт. Вращающий момент на валу 95,5 Н·м. Число полюсов ротора генератора равно 12. Определить частоту f напряжения на зажимах генератора.

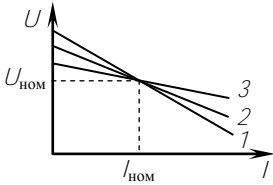
5. Стрелками \uparrow (увеличится) или \downarrow (уменьшится) указать, как будут изменяться ток I в обмотке статора синхронного двигателя и коэффициент мощности $\cos\varphi$ СД при увеличении тока возбуждения, если двигатель, работая с $M = \text{const}$: а) недовозбужден; б) перевозбужден.

Ответы

1. $\cos\varphi_1$ $\cos\varphi_2$ $\cos\varphi_3$	2. $I =$ $Q =$	3. $I_B / I_{B0} =$	4. $f =$	5. а) I , $\cos\varphi$ б) I , $\cos\varphi$
---	-------------------	---------------------	----------	--

Вариант 4

1. Синхронный генератор работает в автономном режиме на симметричную нагрузку активно-индуктивного характера. Указать, используя знаки $>$, $<$, в каком соотношении находятся коэффициенты мощности приемников 1, 2, 3, если внешние характеристики генератора имеют вид, приведенный на рисунке.



2. Синхронный генератор с паспортными данными $P_{\text{НОМ}} = 630$ кВт, $U_{\text{НОМ}} = 6,3$ кВ, $\eta_{\text{НОМ}} = 93,7\%$, $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$ (опереж.), $X = 57$ Ом работает параллельно с сетью. Построить векторную диаграмму и рассчитать ток I статора, активную P и реактивную Q мощности генератора, если при неизменном $I_{\text{в}} = I_{\text{в}0}$ к ротору приложить ускоряющий момент, при котором угол рассогласования $\theta = 20^\circ$.

3. Каков угол рассогласования $\theta_{\text{НОМ}}$ синхронного двигателя, работающего в номинальном режиме и с $I_{\text{в}} = I_{\text{в}0}$, если $M_{\text{max}}/M_{\text{НОМ}} = 2$? Как изменится этот угол θ при увеличении $I_{\text{в}}$ на 20% при условии неизменности момента на валу?

4. Вращающий момент на валу ротора синхронного генератора равен $47,75$ Н·м. Мощность первичного двигателя, приводящего во вращение ротор генератора, 5 кВт.

Определить число пар p полюсов ротора генератора, если частота напряжения на его зажимах $f = 50$ Гц.

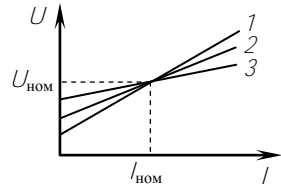
5. Указать стрелками \uparrow (увеличится) или \downarrow (уменьшится), как изменятся M_{max} и угол рассогласования θ синхронного двигателя, работающего с $M = \text{const}$, при увеличении тока возбуждения.

Ответы

1. $\cos\varphi_1$ $\cos\varphi_2$ $\cos\varphi_3$	2. $I =$ $P =$ $Q =$	3. $\theta_{\text{НОМ}} =$ $\theta =$	4. $p =$	5. M_{max} θ
---	----------------------------	--	----------	---------------------------------

Вариант 5

1. Синхронный генератор работает в автономном режиме на симметричную нагрузку активно-емкостного характера. Указать, используя знаки $>$ и $<$, в каком соотношении находятся коэффициенты мощности приемников 1, 2, 3, если внешние характеристики генератора имеют вид, приведенный на рисунке.



2. Синхронный генератор с паспортными данными $P_{\text{НОМ}} = 630$ кВт, $U_{\text{НОМ}} = 6,3$ кВ, $\eta_{\text{НОМ}} = 93,7\%$, $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$ (опереж.), $X = 57$ Ом работает параллельно с сетью. Построить векторную диаграмму и рассчитать ток I статора, активную P и реактивную Q мощности генератора, если при $I_B = 1,2 I_{B0}$ к ротору приложить ускоряющий момент, при котором угол рассогласования $\theta = 20^\circ$. Потерями в статоре пренебречь. Магнитопровод считать ненасыщенным.

3. Синхронный двигатель работает с углом рассогласования $\theta_0 = 30^\circ$ при $I_B = I_{B0}$. Как следует изменить ток возбуждения I_B в сравнении с I_{B0} , чтобы при неизменной нагрузке на валу двигатель работал с $\cos\varphi = 1$? Магнитопровод считать ненасыщенным.

4. Автомобильный синхронный генератор имеет 6 пар полюсов когтеобразного ротора. Найти частоту f напряжения на зажимах генератора, если частота вращения его ротора равна 2000 мин^{-1} .

5. Как изменится (увеличится (\uparrow) или уменьшится (\downarrow)) угол рассогласования θ синхронного генератора, работающего параллельно с сетью, если при неизменном действующем значении тока статора характер генерируемой им мощности изменится с активного на активно-индуктивный? Принять $I_B = \text{const}$.

Ответы

1. $\cos\varphi_1 \quad \cos\varphi_2 \quad \cos\varphi_3$	2. $I =$ $P =$ $Q =$	3. $I_B / I_{B0} =$	4. $f =$	5. θ
---	----------------------------	---------------------	----------	-------------

ГЛАВА 3. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Задачи с решениями

Задача 3.1. На рис. 3.1, *a* изображен эскиз генератора постоянного тока. Якорь 2 генератора вращается в радиальном магнитном поле, созданном обмоткой возбуждения (ОВ) 1, среднее значение магнитной индукции полюса $B = 0,8$ Тл. Обмотка якоря 3 имеет 200 проводников ($N = 200$) длиной $l = 300$ мм каждый, диаметр якоря $D = 200$ мм. Медные проводники обмотки якоря сечением $S = 3$ мм² соединены последовательно-согласно и образуют две параллельные ветви ($2a = 2$) (рис. 3.1, *б*).

Определить ЭДС, индуцированную в обмотке якоря, напряжение U на зажимах генератора, отдаваемую генератором мощность P и потери мощности в обмотке якоря ΔP при токе $I = 40$ А, если якорь вращается с частотой $n = 500$ мин⁻¹.

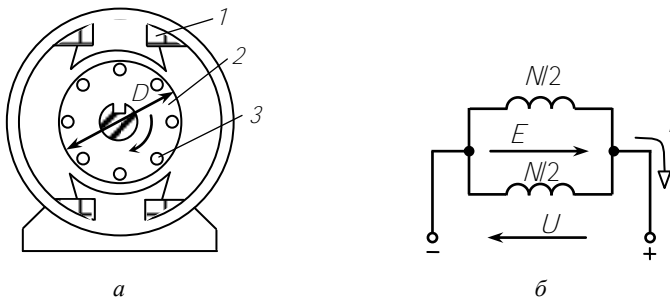


Рис. 3.1

Решение. Среднее значение потока полюса

$$\hat{\Phi} = BS_i = 0,075 \hat{\text{А}}\hat{\text{д}},$$

где $S_i = \frac{\pi D}{2} l = \frac{3,14 \cdot 0,2}{2} \cdot 0,3 = 0,094 \text{ м}^2$ – площадь полюса.

ЭДС якоря

$$E = C_E i \hat{\Phi} = 3,333 \cdot 500 \cdot 0,075 = 125 \hat{\text{А}},$$

где $\bar{N}_A = \frac{\rho \cdot N}{60 \cdot a} = \frac{1 \cdot 200}{60 \cdot 1} = 3,333$.

Напряжение на зажимах генератора при токе $I = 40 \text{ А}$

$$U = E - R_y I = 125 - 3,5 = 121,5 \text{ В},$$

где $R_y = \rho \frac{l}{S} = 0,0875 \text{ Ом}$, $\rho = 0,01724 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление меди.

Потери мощности в обмотке якоря

$$\Delta P = R_y I^2 = 0,0875 \cdot 40^2 = 140 \text{ Вт}.$$

Мощность, отдаваемая генератором потребителю,

$$P = UI = 121,5 \cdot 40 = 4,86 \text{ кВт}.$$

Задача 3.2. На рис. 3.2 изображены: основное магнитное поле генератора постоянного тока (рис. 3.2, а), магнитное поле реакции якоря (тока якоря) (рис. 3.2, б) и результирующее магнитное поле (рис. 3.2, в).

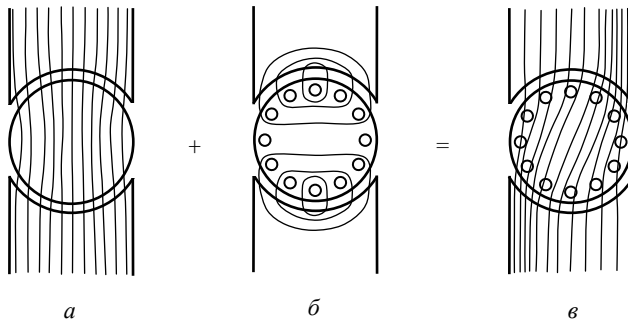


Рис. 3.2

Определить полярность полюсов генератора и направление тока в обмотке якоря, при которых результирующее поле соответствует рис. 3.2, в.

Указать геометрическую и физическую нейтраль.

Решение. Из рис. 3.2, б следует, что реакция якоря имеет поперечный характер, т. е. ось симметрии поля реакции якоря перпендикулярна оси главных полюсов. Это имеет место при размещении щеток на геометрической нейтральной линии. Из картины результирующего магнитного поля, представленного на рис. 3.2, в, видно, что поле несимметрично относительно оси главных полюсов: под одним краем полюса магнитная индукция увеличивается, а под другим – уменьшается.

Увеличение индукции объясняется согласным направлением силовых линий основного поля и поля реакции якоря в воздушном зазоре, а уменьшение – их встречным направлением. Картина силовых линий результирующего магнитного поля, данная на рис. 3.2, в может иметь место при сочетании определяющих факторов: а) полярности главных полюсов статора; б) направлении токов в секциях якорной обмотки, приведенном на рис. 3.3, б. Очевидно, что при одинаковых факторах а) и б) направления вращения ротора в двигательном и генераторном режимах работы машины будут встречными. Положение физической нейтральной линии б–б для этих режимов также приведено на рис. 3.3, в. Смещение нейтральной линии б–б относительно геометрической нейтральной линии а–а тем больше, чем больше нагрузка машины, когда в большей степени проявляется реакция якоря.

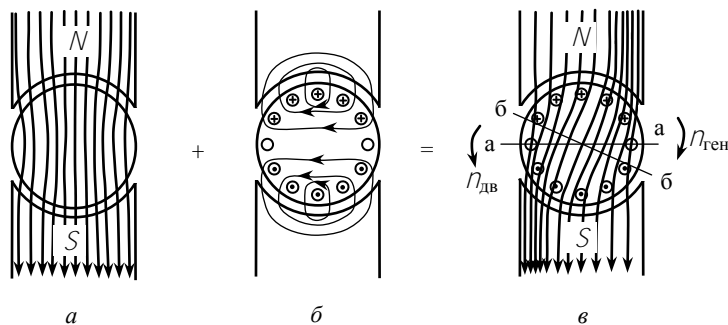


Рис. 3.3

Такую же картину результирующего магнитного поля (рис. 3.2, в) можно получить, изменив направления факторов а) и б) на противоположные относительно указанных на рис. 3.3 при неизменных направлениях вращения ротора.

Задача 3.3. Напряжение на зажимах генератора независимого возбуждения (рис. 3.4) в режиме холостого хода $U_x = 230$ В. Частота вращения якоря при этом $n_x = 1000$ мин⁻¹.

Найти напряжение на зажимах генератора под нагрузкой, если частота вращения якоря при этом уменьшилась до $n_n = 975$ мин⁻¹, а ток в цепи якоря с сопротивлением $R_y = 0,44$ Ом $I_y = 25$ А. Влиянием реакции якоря пренебречь.

Решение. При холостом ходе ЭДС генератора равна напряжению на его зажимах ($E = U_x = 230$ В). Считая магнитный поток неизменным в обоих режимах можно записать $E = C_E n_k \Phi$ и $E_n = C_E n_n \Phi$.

$$\text{Отсюда} \quad \frac{E}{E_n} = \frac{n_x}{n_n}$$

$$\text{и} \quad E_n = E \frac{n_n}{n_x} = 230 \frac{975}{1000} = 224,25 \text{ В.}$$

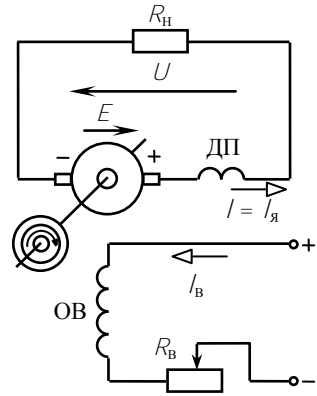


Рис. 3.4

Напряжение на зажимах генератора под нагрузкой $U_n = E_n - R_y I_y = 224,25 - 0,44 \cdot 25 = 213,25$ В.

Сопротивление нагрузки $R_l = U_n / I_y = 213,25 / 25 = 8,53$ Ом.

Задача 3.4. Рассчитать ток якоря и ЭДС генератора параллельного возбуждения (рис. 3.5), если напряжение на его зажимах в номинальном режиме $U_{ном} = 230$ В, а сопротивления цепи якоря $R_y = 0,425$ Ом, обмотки возбуждения $R_B = 115$ Ом, внешней цепи $R_H = 3,8$ Ом.

Решение.

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_H} = \frac{230}{3,8} = 60,5 \text{ А};$$

$$I_a = \frac{U_{\text{ном}}}{R_a} = \frac{230}{115} = 2 \text{ А};$$

$$I_{y\dot{\Gamma}} = I_{\dot{\Gamma}} + I_a = 60,5 + 2 = 62,5 \text{ \AA}.$$

ЭДС генератора

$$E = U_{\dot{\Gamma}} + R_y I_y = 230 + 0,425 \cdot 62,5 = 230 + 26,5 = 256,5 \text{ \AA}.$$

Задача 3.5. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения (рис. 3.5) имеет следующие номинальные данные: $P_{\text{ном}} = 16,5 \text{ кВт}$, $U_{\text{ном}} = 230 \text{ В}$, $\eta_{\text{ном}} = 82,5 \%$. Сопротивление цепи якоря в нагретом состоянии $R_y = 0,34 \text{ Ом}$, сопротивление цепи возбуждения $R_b = 60 \text{ Ом}$.

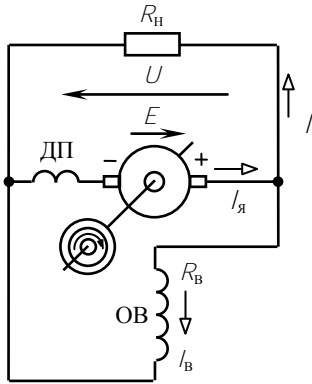


Рис. 3.5

Характеристика холостого хода задана табл. 3.1.

Определить ток якоря, мощность на валу генератора.

Рассчитать и построить внешнюю характеристику генератора, пренебрегая реакцией якоря.

Таблица 3.1

$I_b, \text{ А}$	0	0,76	1,52	2,28	3,04	3,81	4,57	5,72
$E, \text{ В}$	12,8	115	186,7	225	243	255,7	263,4	273

Решение. Номинальный ток генератора

$$I_{\dot{\Gamma}} = \frac{P_{\dot{\Gamma}}}{U_{\dot{\Gamma}}} = \frac{16500}{230} = 71,74 \text{ \AA}.$$

$$\text{Ток возбуждения } I_{a,\dot{\Gamma}} = \frac{U_{\dot{\Gamma}}}{R_a} = \frac{230}{60} = 3,83 \text{ \AA}.$$

$$\text{Номинальный ток якоря } I_{y,\dot{\Gamma}} = I_{\dot{\Gamma}} + I_{a,\dot{\Gamma}} = 75,57 \text{ \AA}.$$

Механическая мощность на валу генератора в номинальном

$$\text{режиме} \quad P_{\text{в}} = \frac{P_{\text{м}}}{\eta_{\text{м}}} = \frac{16500}{0,825} = 20 \text{ кВт.}$$

Построим внешнюю характеристику. В случае неучета реакции якоря можно пренебречь характеристическим треугольником, что значительно упростит построение характеристики. По данным табл. 3.1 строим характеристику холостого хода $E(I_{\text{в}})$ (рис. 3.6, а), на этом же графике строим зависимость $U = R_{\text{а}} I_{\text{а}}$ по двум точкам: первая – начало координат; вторая – $U_{\text{ном}} = 230 \text{ В}$, $I_{\text{в ном}} = 3,83 \text{ А}$ (точка в).

Задаваясь набором значений тока $I_{\text{в}}$, находим соответствующие значения $U = R_{\text{а}} I_{\text{а}}$. Так как $I_{\text{в}} \ll I_{\text{я}}$, то, пренебрегая током возбуждения $I_{\text{в}}$, рассчитываем

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{а}} \approx I_{\text{я}} = \frac{E - R_{\text{а}} I_{\text{а}}}{R_{\text{я}}},$$

где E – ЭДС, определенная по характеристике $E(I_{\text{в}})$ для соответствующего значения тока $I_{\text{в}}$.

Результаты расчетов, выполненные для набора значений $I_{\text{в}}$, приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

$I_{\text{в}}, \text{ А}$	0	0,76	1,52	2,28	3,04	3,81	3,83
$E, \text{ В}$	12,8	115	186,7	225	243	255,7	256
$U = I_{\text{в}} R_{\text{а}}, \text{ В}$	0	45,6	91,2	136,8	182,4	228,6	230
$E - U, \text{ В}$	12,8	69,4	95,5	88,2	60,6	27,1	26
$I, \text{ А}$	37,6	204,1	280,8	259,4	178,2	79,7	76,47

Предварительно рассчитаем также характерные точки внешней характеристики: критический (максимальный) ток $I_{\text{кр}}$ и ток короткого замыкания $I_{\text{к}}$.

Для расчета $I_{\text{кр}}$ нужно провести касательную MN к характеристике холостого хода, параллельную линии $0eC$. Точка $a_{\text{кр}}$ касания этих линий определяет $U_{\text{е0}} = R_{\text{а}} I_{\text{а.е0}} = 60 \cdot 1,6 = 96 \text{ В}$, $E_{\text{кр}} = 195 \text{ В}$ и позволяет

$$I_{\text{е0}} = \frac{E_{\text{е0}} - U_{\text{е0}}}{R_{\text{я}}} = \frac{195 - 96}{0,34} = 291 \text{ А.}$$

рассчитать

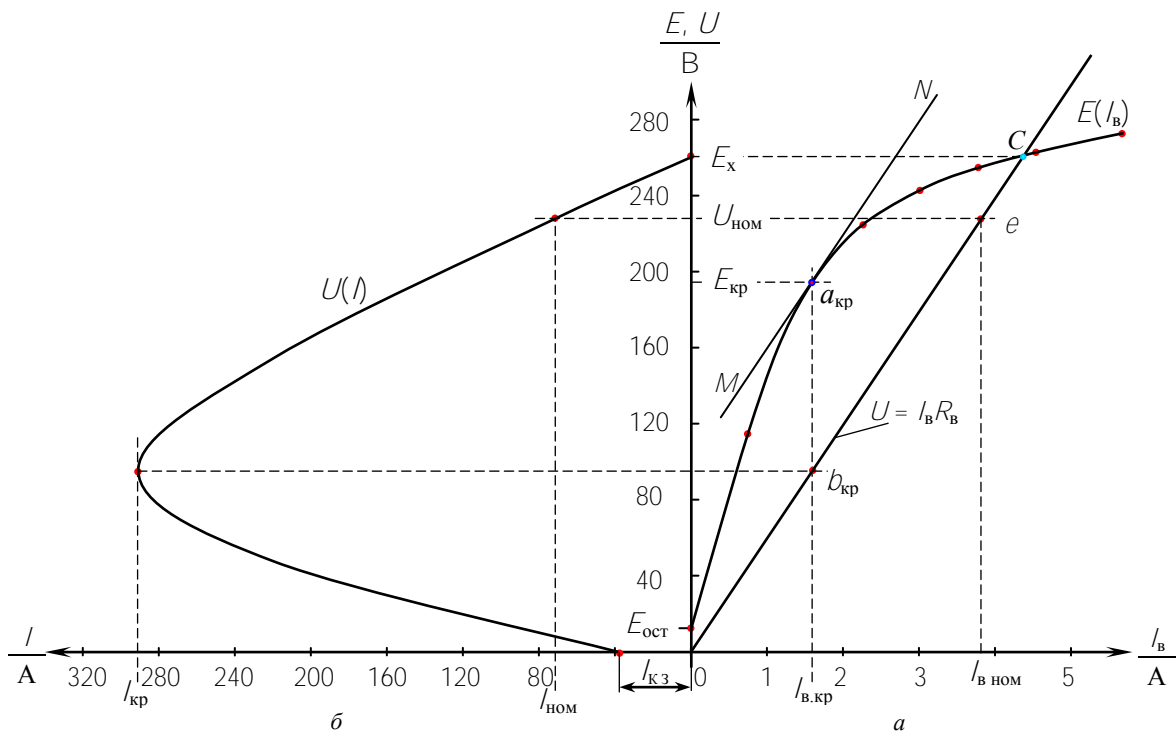


Рис. 3.6

Ток короткого замыкания генератора (при $U = 0, I_{в.} = 0$)

$$I_{\hat{e}} = E_{i\hat{n}0} / R_{\hat{y}} = 12,8 / 0,34 = 37,6 \text{ \AA},$$

где $E_{\text{ост}}$ – остаточная ЭДС генератора

Внешняя характеристика $U \curvearrowright$ дана на рис. 3.6, б.

В практике расчетов часто ограничиваются построением $U \curvearrowright$ по четырем характерным точкам: 1) $I = 0, U = E_x$; 2) $I = I_{\text{ном}}, U = U_{\text{ном}}$; 3) $I = I_{\text{кр}}, U = U_{\text{кр}}$; 4) $I = I_{\text{кз}}, U = 0$.

Задача 3.6. Частота вращения якоря генератора смешанного возбуждения $n = 1450 \text{ мин}^{-1}$. Полезный момент на валу первичного двигателя в этом режиме $M = 23,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$, ток якоря генератора $I_{\text{я}} = 12,2 \text{ А}$, механические потери мощности $\Delta P_M = 60 \text{ Вт}$, магнитные потери $\Delta P_C = 140 \text{ Вт}$. Сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} = 2,68 \text{ Ом}$, сопротивление последовательной обмотки возбуждения главных полюсов $R_{\text{пос}} = 0,85 \text{ Ом}$, сопротивление параллельной обмотки $R_{\text{в}} = 236 \text{ Ом}$, сопротивление регулировочного реостата в цепи возбуждения параллельной обмотки $R_{\text{р}} = 244 \text{ Ом}$.

Определить ЭДС и напряжение генератора, отдаваемую во внешнюю цепь мощность и КПД генератора.

Решение. Мощность на валу генератора

$$P_1 = \frac{M \cdot n}{9550} = \frac{23,7 \cdot 1450}{9550} = 3,6 \text{ кВт}.$$

Электромагнитная мощность генератора

$$P_{\text{yi}} = P_1 - \Delta P_1 - \Delta P_{\text{N}} = 3600 - 60 - 140 = 3,4 \text{ кВт}.$$

ЭДС и напряжение на зажимах якоря

$$E = \frac{P_{\text{yi}}}{I_{\text{я}}} = \frac{3,4 \cdot 10^3}{12,2} = 278,7 \text{ В};$$

$$U_{\text{я}} = E - R_{\text{я}} I_{\text{я}} = 278,7 - 2,68 \cdot 12,2 = 240 \text{ В}.$$

Ток возбуждения параллельной обмотки

$$I_a = U_y / (R_a + R_0) = \frac{240}{236 + 244} = 0,5 \text{ \AA}.$$

Ток генератора

$$I = I_y - I_a = 12,2 - 0,5 = 11,7 \text{ \AA}.$$

Напряжение на зажимах генератора меньше напряжения на зажимах якоря на величину падения напряжения на последовательной обмотке возбуждения

$$U = U_y - R_{\text{п.н.}} I = 240 - 0,85 \cdot 11,7 = 230 \text{ \AA}.$$

Мощность, отдаваемая генератором во внешнюю цепь,

$$P_2 = U \cdot I = 230 \cdot 11,7 \approx 2,7 \text{ \AA}\cdot\text{В}.$$

Определяем КПД генератора

$$\eta = P_2 / P_1 = \frac{2,7}{3,6} = 0,75.$$

Задача 3.7. На рис. 3.1, а изображен эскиз двигателя постоянного тока. Якорь 2 вращается в радиальном магнитном поле, созданном обмоткой возбуждения 1, среднее значение магнитной индукции $B = 0,8$ Тл. Обмотка якоря 3 имеет $N = 200$ проводников длиной $l = 200$ мм каждый, диаметр якоря $D = 200$ мм.

Определить момент M и мощность P , развиваемые двигателем, если ток якоря $I_a = 20$ А, частота вращения $n = 1000$ мин⁻¹.

Решение. Среднее значение магнитного потока полюса

$$\hat{\Phi} = BS_i,$$

где $S_i = \frac{\pi D}{2} l = \frac{3,14 \cdot 0,2}{2} \cdot 0,2 = 0,0628$ м² – площадь полюса.

Тогда $\Phi = 0,8 \cdot 0,0628 = 0,0502$ Вб.

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем

$$M = C_1 I_y \dot{\phi} = 31,83 \cdot 20 \cdot 0,0502 = 31,96 \text{ Г} \cdot \text{с},$$

где $C_1 = \frac{\rho \cdot N}{2\pi a} = \frac{1 \cdot 200}{2\pi \cdot 1} = 31,83.$

Мощность на валу двигателя

$$P = \frac{nM}{9550} = \frac{1000 \cdot 31,96}{9550} = 3,35 \text{ кВт}.$$

Задача 3.8. На щитке двигателя параллельного возбуждения имеются следующие данные: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 3,2$ кВт, номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 110$ В, ток $I_{\text{ном}} = 37,3$ А, частота вращения $n_{\text{ном}} = 750 \text{ мин}^{-1}$. Сопротивление обмотки якоря $R_y = 0,20$ Ом, ток возбуждения $I_{\text{в ном}} = 2$ А.

Определить: 1) КПД двигателя при номинальной нагрузке, ЭДС при этой же нагрузке; 2) ЭДС и частоту вращения при включении последовательно с якорем сопротивления $R = 0,5$ Ом и токе якоря $I_y = 41$ А. Сопротивление параллельной обмотки остается при этом неизменным. Действием реакции якоря пренебречь.

Решение. 1) КПД двигателя $\eta = \frac{P_{\text{м}}}{P_{\text{н}}} = \frac{3,2}{110 \cdot 37,3} = 0,78,$

где $P_{\text{н}} = U_{\text{н}} I_{\text{н}}$ – мощность, потребляемая двигателем от сети.

Ток якоря двигателя при номинальной нагрузке

$$I_{\text{я ном}} = I_{\text{н}} - I_{\text{а ном}} = 37,3 - 2 = 35,3 \text{ А}.$$

ЭДС двигателя при номинальной нагрузке

$$E_{\text{н}} = U_{\text{н}} - R_y I_{\text{я ном}} = 110 - 0,2 \cdot 35,3 \approx 103 \text{ В}.$$

2) ЭДС двигателя при токе якоря 41 А и при включении в цепь якоря сопротивления $R = 0,5$ Ом

$$E_2 = U_{\text{н}} - I_y (R_y + R) = 110 - 41(0,2 + 0,5) = 81,3 \text{ В}.$$

Пренебрегая реакцией якоря, можно записать соотношение

$$n_2 = \frac{A_2}{E_{\text{ин}}}$$

отсюда
$$n_2 = n_{\text{ин}} \cdot \frac{E_2}{E_{\text{ин}}} = 750 \cdot \frac{81,3}{103} = 592 \text{ об}^{-1}.$$

Задача 3.9. Для двигателя параллельного возбуждения, у которого $P_{\text{ном}} = 8 \text{ кВт}$, $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, $n_{\text{ном}} = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $I_{\text{ном}} = 43,5 \text{ А}$, рассчитать сопротивление пускового реостата $R_{\text{п}}$ и отдельных его ступеней, чтобы пусковой ток не превышал номинальный более чем в 2,5 раза, а число ступеней равнялось трем. Сопротивления обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,22 \text{ Ом}$, обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 150 \text{ Ом}$.

Решение. Находим ток возбуждения

$$I_{\text{а.ин}} = \frac{U_{\text{ин}}}{R_{\text{а}}} = \frac{220}{150} = 1,47 \text{ А}.$$

Ток якоря номинального режима

$$I_{\text{я.ин}} = I_{\text{ин}} - I_{\text{а.ин}} = 43,5 - 1,47 \approx 42 \text{ А}.$$

Пусковой ток

$$I_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ин}}}{R_{\text{п}} + R_{\text{я}}} = 2,5 I_{\text{я.ин}} = 105 \text{ А}.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} R_{\text{п}} &= \frac{U_{\text{ин}} - 2,5 I_{\text{я.ин}} R_{\text{я}}}{2,5 I_{\text{я.ин}}} = \frac{U_{\text{ин}}}{2,5 I_{\text{я.ин}}} - R_{\text{я}} = \\ &= \frac{220}{2,5 \cdot 42} - 0,22 = 2,1 - 0,22 = 1,88 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Для определения сопротивлений отдельных ступеней пускового реостата воспользуемся рис. 3.7, на котором построены прямые Od ,

Oe, Of, Og , представляющие собой зависимость $E(I_{я})$ при различных сопротивлениях цепи якоря. Они описываются уравнением

$$E = U - I_{я} R_{i}, \quad i = \overline{1,4},$$

где $R_{i1} = R_{\gamma} + R_1 + R_2 + R_3$ соответствует прямой Od , когда введены все ступени пускового реостата;

$R_{i2} = R_{\gamma} + R_2 + R_3$ соответствует прямой Oe , когда закорочена первая ступень реостата;

$R_{i3} = R_{\gamma} + R_3$ соответствует прямой Of , когда закорочены первая и вторая ступени реостата;

$R_{i4} = R_{\gamma}$ соответствует прямой Og (естественная характеристика), когда реостат закорочен полностью.

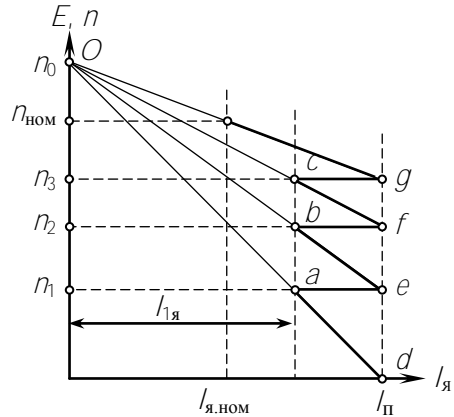


Рис. 3.7

Пуск начинается по характеристике Od , для которой справедливы соотношения, определяющие предельный диапазон изменения тока якоря при пуске:

точка d
$$I_i = U / R_{i1} \quad (3.1)$$

точка a
$$I_{1\dot{y}} = (U - E_1) / R_{i1}, \quad (3.2)$$

где $I_{1\dot{y}}$ – наименьший пусковой ток.

Полагая, что закорачивание ступени пускового реостата сопровождается мгновенным переходом двигателя на соответствующую характеристику, для точки e имеем

$$I_i = (U - E_1) / R_{i2}. \quad (3.3)$$

Аналогично для точек b и f , c и g можно записать

$$I_{1\dot{y}} = (U - E_2) / R_{i2}, \quad (3.4)$$

$$I_i = (U - E_2) / R_{i3}, \quad (3.5)$$

$$I_{1\bar{y}} = \mathcal{U} - E_3 \int R_{i3}, \quad (3.6)$$

$$I_{\bar{i}} = \mathcal{U} - E_3 \int R_{i4} = \mathcal{U} - E_3 \int R_{\bar{y}}. \quad (3.7)$$

Из отношения уравнений (3.3) и (3.2), (3.5) и (3.4), (3.7) и (3.6) получим соответственно:

$$\left. \begin{aligned} I_{\bar{i}} / I_{1\bar{y}} &= R_{i1} / R_{i2} ; \\ I_{\bar{i}} / I_{1\bar{y}} &= R_{i2} / R_{i3} ; \\ I_{\bar{i}} / I_{1\bar{y}} &= R_{i3} / R_{\bar{y}} . \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

Решив полученную систему уравнений (3.8) найдем, что $\mathcal{U}_{\bar{i}} / I_{1\bar{y}} = R_{i1} / R_{\bar{y}}$. Из последнего выражения (с учетом того, что $R_{i1} = R_{\bar{y}} + R_{\bar{i}} = 0,22 + 1,88 = 2,1 \text{ Ом}$) получим

$$I_{1\bar{y}} = \sqrt[3]{I_{\bar{i}}^3 \cdot R_{\bar{y}} / R_{i1}} = \sqrt[3]{105^3 \cdot 0,22 / 2,1} = 49,5 \text{ А}.$$

Из уравнений (3.8) найдем $R_1 = 1,12 \text{ Ом}$; $R_2 = 0,527 \text{ Ом}$; $R_3 = 0,25 \text{ Ом}$.

Задача 3.10. Двигатель параллельного возбуждения имеет номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, ток $I_{\text{ном}} = 12,5 \text{ А}$, сопротивление обмоток якоря и добавочных полюсов $R = 1,25 \text{ Ом}$, сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 860 \text{ Ом}$, частоту вращения $n_{\text{ном}} = 3000 \text{ мин}^{-1}$, число проводников обмотки якоря $N = 432$, число полюсов $2p = 4$, число параллельных ветвей $2a = 2$, падение напряжения в щеточных контактах $\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В}$.

Рассчитать величину добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$, которое необходимо включить в цепь якоря, чтобы частота вращения двигателя снизилась до $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ при неизменных токах якоря и возбуждения.

Решение. Ток возбуждения

$$I_{\bar{a}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\bar{a}}} = \frac{220}{860} = 0,26 \text{ А}.$$

Номинальный ток якоря $I_{я.ном} = I_{ном} - I_B = 12,5 - 0,26 = 12,24 \text{ А}$.
 ЭДС двигателя при частоте вращения $n_{ном} = 3000 \text{ мин}^{-1}$

$$E_{ном} = U_{ном} - I_{я.ном} \cdot R_{я} - \Delta U_{щ} = 220 - 12,24 \cdot 1,25 - 2 = 202,7 \text{ В},$$

где $\Delta U_{щ}$ – падение напряжения в щеточных контактах.

Магнитный поток

$$\hat{O}_{\hat{m}} = \frac{E_{\hat{m}}}{n_{\hat{m}} C_E} = \frac{202,7}{14,4 \cdot 3000} = 4,7 \cdot 10^{-3} \hat{А},$$

где $C_E = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} = \frac{2 \cdot 432}{60 \cdot 1} = 14,4$.

Так как по условию задачи ток возбуждения не изменяется, то неизменным остается магнитный поток. Следовательно

$$E = C_E n \hat{O} = 14,4 \cdot 2000 \cdot 4,7 \cdot 10^{-3} = 135,4 \hat{А}.$$

Величину добавочного сопротивления найдем из равенства

$$U_{\hat{m}} = E + I_{\hat{y}.\hat{m}} \cdot R_{\hat{y}} + I_{\hat{y}.\hat{m}} \cdot R_{\hat{a}\hat{a}} + \Delta U_{\hat{u}}.$$

Отсюда

$$R_{\hat{a}\hat{a}} = \frac{U_{\hat{m}} - E - \Delta U_{\hat{u}}}{I_{\hat{y}.\hat{m}}} - R_{\hat{y}} = \frac{220 - 135,4 - 2}{12,24} - 1,25 = 5,5 \hat{\Omega}.$$

Электромагнитная мощность при частоте вращения $n_{ном} = 3000 \text{ мин}^{-1}$

$$P_{\hat{y}i.\hat{m}} = E_1 \cdot I_{\hat{y}.\hat{m}} = 202,7 \cdot 12,24 = 2,48 \cdot 10^3 \hat{А}\hat{д} = 2,48 \hat{е}\hat{А}\hat{д}.$$

Электромагнитная мощность при частоте вращения $n_2 = 2000 \text{ мин}^{-1}$

$$P_{\hat{y}i} = E \cdot I_{\hat{y}.\hat{m}} = 135,4 \cdot 12,24 = 1,66 \cdot 10^3 \hat{А}\hat{д} = 1,66 \hat{е}\hat{А}\hat{д}.$$

Изменение электромагнитной мощности

$$\Delta P_{\hat{y}i} = P_{\hat{y}i.\hat{m}} - P_{\hat{y}i} = 2,48 - 1,66 = 0,82 \hat{е}\hat{А}\hat{д}.$$

Вращающий момент двигателя

$$M = C_M \hat{O} I_{\dot{y}} = 137,6 \cdot 4,7 \cdot 10^{-3} \cdot 12,24 = 7,9 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\text{где } C_M = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a} = \frac{2 \cdot 432}{2 \cdot 3,14 \cdot 1} = 137,6.$$

Вращающий момент остается неизменным, т. к. ток якоря и поток не изменились.

Задача 3.11. Двигатель параллельного возбуждения, подключенный к сети напряжением $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ имеет следующие данные: $I_{\text{ном}} = 136 \text{ А}$, сопротивление обмотки якоря и добавочных полюсов $R_{y20^\circ} = 0,102 \text{ Ом}$, обмотки возбуждения $R_{a20^\circ} = 44 \text{ Ом}$. КПД двигателя при номинальной нагрузке $\eta_{\text{ном}} = 83,5 \%$.

Определить: мощность, потребляемую двигателем от сети; номинальную мощность двигателя; суммарные потери в двигателе; потери мощности в обмотке якоря и добавочных полюсов; потери мощности в обмотке возбуждения; потери в щеточных контактах; механические и магнитные потери; ток якоря при холостом ходе. Добавочные потери принять равными 1 % от мощности, потребляемой двигателем от сети;

Решение. Мощность, потребляемая двигателем от сети,

$$P_1 = U_{\text{н}} I_{\text{н}} = 220 \cdot 136 = 29,92 \text{ кВт}.$$

Номинальная мощность двигателя (полезная на валу)
 $P_{\text{н}} = P_1 \cdot \eta_{\text{н}} = 29,92 \cdot 0,835 \approx 25 \text{ кВт}.$

Суммарные потери в двигателе

$$\sum \Delta P = P_1 - P_{\text{н}} = 29,92 - 25 = 4,92 \text{ кВт}.$$

Сопротивления обмотки якоря и добавочных полюсов R_{y75° , обмотки возбуждения R_{a75° при $t = 75^\circ \text{С}$:

$$R_{y75^\circ} = R_{y20^\circ} \cdot \frac{235+t}{235+t_0} = 0,102 \cdot \frac{235+75}{235+20} = 0,124 \hat{\text{и}};$$

$$R_{a75^\circ} = R_{a20^\circ} \cdot \frac{235+t}{235+t_0} = 44 \cdot \frac{235+75}{235+20} = 53,5 \hat{\text{и}}.$$

Ток в обмотке возбуждения $I_{a.\hat{\text{и}}} = U_{\hat{\text{и}}} / R_{a75^\circ} = 4,12 \hat{\text{А}}.$

Ток в обмотке якоря

$$I_{y.\hat{\text{и}}} = I_{\hat{\text{и}}} - I_{a.\hat{\text{и}}} = 136 - 4,12 = 131,88 \hat{\text{А}}.$$

Потери в обмотке якоря

$$\Delta P_y = I_{y.\hat{\text{и}}}^2 \cdot R_{y75^\circ} = 131,88^2 \cdot 0,124 = 2460 \hat{\text{А}}\hat{\text{д}}.$$

Потери в обмотке возбуждения

$$\Delta P_a = I_{a.\hat{\text{и}}}^2 \cdot R_{a75^\circ} = 4,12^2 \cdot 53,5 = 91 \hat{\text{А}}\hat{\text{д}}.$$

Потери в щеточных контактах

$$\Delta P_u = \Delta U_u I_{y.\hat{\text{и}}} = 2 \cdot 131,88 \approx 264 \hat{\text{А}}\hat{\text{д}}.$$

Добавочные потери $\Delta P_a = 0,01 \cdot P_1 = 0,01 \cdot 29920 = 299,2 \hat{\text{А}}\hat{\text{д}}.$

Механические и магнитные потери

$$\begin{aligned} \Delta P_{1a0} + \Delta P_{1aa} &= \sum \Delta P - \Delta P_y + \Delta P_a + \Delta P_u + \Delta P_a \hat{=} \\ &= 4920 - 2460 + 91 + 264 + 299,2 \hat{=} 2206 \hat{\text{А}}\hat{\text{д}}. \end{aligned}$$

Ток якоря при холостом ходе определяется механическими и магнитными потерями

$$I_{y.0} = \frac{\Delta P_{1a0} + \Delta P_{1aa}}{U_{\hat{\text{и}}}} = \frac{2206}{220} \approx 10 \hat{\text{А}}.$$

Задача 3.12. Для двигателя задачи 3.11 построить диаграмму $\eta(I_a)$ при $U = \text{const}$ в диапазоне изменения нагрузки от холостого хода до номинальной, если поток на один полюс двигателя равен

$\Phi = 41,12 \cdot 10^{-3}$ Вб (реакцией якоря пренебречь), число проводников якоря $N = 420$, число пар полюсов $p = 2$, число пар параллельных ветвей $a = 2$.

Определить электромагнитный момент при номинальной нагрузке.

Решение. Частота вращения якоря

$$n = \frac{U - I_{\bar{y}} R_{\bar{y}}}{C_E \Phi}$$

где $\bar{N}_E = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} = \frac{2 \cdot 420}{60 \cdot 2} = 7$.

Тогда частота вращения при холостом ходе ($I_{\bar{y},x} = 10$ А)

$$n_0 = \frac{220 - 10 \cdot 0,124}{7 \cdot 41,12 \cdot 10^{-3}} = 760 \text{ мин}^{-1}$$

Задаваясь значениями тока якоря, равными 25; 50; 75 и 100 % $I_{\bar{y},\text{ном}}$ найдем соответствующие этим значениям частоты вращения якоря. Результаты расчета сводим в табл. 3.3. Диаграмма $n \sim I_{\bar{y}}$ двигателя приведена на рис. 3.8.

Таблица 3.3

$I_{\bar{y}}, \text{А}$	10	33	66	99	132
$n, \text{мин}^{-1}$	760	750	736	722	707

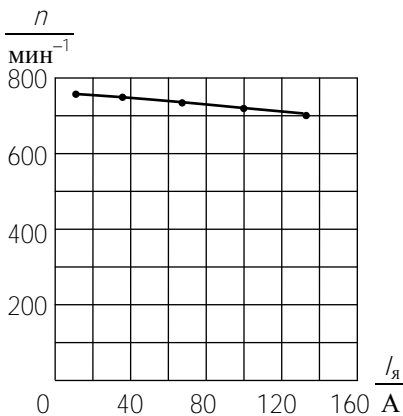


Рис. 3.8

Электромагнитный момент двигателя при номинальной нагрузке

$$M = 9550 \frac{P_{\text{нн}}}{n_{\text{нн}}} = \frac{9550 \cdot 25}{707} = 337,7 \text{ Г} \cdot \text{м}$$

Задача 3.13. Двигатель параллельного возбуждения имеет

следующие данные: $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, $I_{\text{ном}} = 93 \text{ А}$, $n_{\text{ном}} = 750 \text{ мин}^{-1}$. Сопротивления обмотки якоря и добавочных полюсов в нагретом состоянии $R_{\text{я}} = 1,92 \text{ Ом}$, обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 80 \text{ Ом}$.

Определить, как изменится частота вращения двигателя при неизменном моменте на валу, если подведенное к обмотке якоря напряжение уменьшить до 200 В , а ток возбуждения оставить неизменным.

Решение. Находим номинальный ток якоря

$$I_{\text{я.н}} = I_{\text{н}} - I_{\text{а.н}} = 93 - 2,75 = 90,25 \text{ А},$$

где $I_{\text{а.н}} = U_{\text{н}} / R_{\text{а}} = \frac{220}{80} = 2,75 \text{ А}$.

Вращающие моменты двигателя при обоих напряжениях будут

$$M_{\text{н}} = C_M \hat{O}_{\text{н}} I_{\text{я.н}} \quad \text{и} \quad M_1 = C_I \hat{O}_1 I_{\text{в1}}$$

Но так как по условию задачи остаются неизменными момент на валу двигателя и ток возбуждения, то и токи якоря в обоих случаях тоже будут равны, т. е. $I_{\text{я.н}} = I_{\text{я1}}$.

Записав выражения для частот вращения двигателя

$$n_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{я.н}} \cdot R_{\text{я}}}{C_E \hat{O}_{\text{н}}} \quad \text{и} \quad n_1 = \frac{U_1 - I_{\text{я1}} \cdot R_{\text{я}}}{C_E \hat{O}_1},$$

получим
$$\frac{n_1}{n_{\text{н}}} = \frac{U_1 - I_{\text{я.н}} \cdot R_{\text{я}}}{U_{\text{н}} - I_{\text{я.н}} \cdot R_{\text{я}}}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} n_1 &= n_{\text{н}} \cdot \frac{U_1 - I_{\text{я.н}} \cdot R_{\text{я}}}{U_{\text{н}} - I_{\text{я.н}} \cdot R_{\text{я}}} = 750 \cdot \frac{200 - 90,25 \cdot 1,92}{220 - 90,25 \cdot 1,92} = \\ &= \frac{200 - 173,3}{220 - 173,3} = 429 \text{ об}^{-1}. \end{aligned}$$

Задача 3.14. Двигатель последовательного возбуждения потребляет из сети мощность $P_{1\text{ном}} = 3,2$ кВт при напряжении $U_{\text{ном}} = 220$ В и вращается с частотой $n_{\text{ном}} = 1000$ мин⁻¹. Сопротивление цепи якоря при температуре 75°C $R_{\text{я}} = 0,94$ Ом. Падение напряжения в щеточных контактах $\Delta U_{\text{щ}} = 2$ В.

Как изменится ток якоря $I_{\text{я}}$, ЭДС обмотки якоря E , полезная мощность на валу P , КПД и частота вращения двигателя, если напряжение сети понизилось на 20 %, а момент на валу $M = 26,50$ Н · м остался неизменным.

Решение. Находим ток и ЭДС якоря при номинальном напряжении

$$I_{\text{я.ном}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{3200}{220} = 14,5 \text{ А},$$

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{я.ном}} \cdot R_{\text{я}} - \Delta U_{\text{щ}} = 220 - 14,5 \cdot 0,94 - 2 = 204,4 \text{ В}.$$

Полезная мощность и КПД при номинальном напряжении

$$P_{\text{ном}} = \frac{M \cdot n_{\text{ном}}}{9550} = \frac{26,5 \cdot 1000}{9550} = 2,8 \text{ кВт},$$

$$\eta_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{P_{1\text{ном}}} = \frac{2,8}{3,2} = 0,875 \text{ или } 87,5\%.$$

Поскольку в двигателе последовательного возбуждения поток пропорционален току, то момент $M = C_M \Phi I_{\text{я}}$ будет пропорционален квадрату тока $M = C_M \Phi I_{\text{я}} \equiv C_M I_{\text{я}}^2$. Следовательно, при $M = \text{const}$ ток якоря не изменится ($I_{\text{я}} = I_{\text{я.ном}} = 14,5$ А).

При снижении напряжения сети на 20 % напряжение питания двигателя $U = 0,8 U_{\text{ном}} = 0,8 \cdot 220 = 176$ В и ЭДС якоря

$$E = U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} - \Delta U_{\text{щ}} = 176 - 14,5 \cdot 0,94 - 2 = 160,4 \text{ В}.$$

Потребляемая двигателем мощность

$$P_1 = U \cdot I_y = 176 \cdot 14,5 = 2,55 \text{ кВт}.$$

Так как магнитный поток не изменился, то

$$\frac{E_{\text{ин}}}{E} = \frac{C_E \cdot n_{\text{ин}} \cdot \Phi}{C_E \cdot n \cdot \Phi} = \frac{n_{\text{ин}}}{n};$$

$$n = \frac{E}{E_{\text{ин}}} n_{\text{ин}} = \frac{160,4}{204,4} \cdot 1000 = 785 \text{ об}^{-1}.$$

Полезная мощность и КПД при пониженном напряжении

$$P = \frac{I \cdot n}{9550} = \frac{26,5 \cdot 785}{9550} = 2,18 \text{ кВт},$$

$$\eta = \frac{P}{P_1} \cdot 100 = \frac{2,18}{2,53} \cdot 100 = 85,5\%.$$

Относительные изменения:

ЭДС $\Delta E = \frac{E_{\text{ин}} - E}{E} \cdot 100 = \frac{204,4 - 160,4}{204,4} \cdot 100 = 21,5\%;$

мощности $\Delta P = \frac{P_{\text{ин}} - P}{P} \cdot 100 = \frac{2,8 - 2,18}{2,8} \cdot 100 = 22,1\%;$

частоты вращения $\Delta n = \frac{n_{\text{ин}} - n}{n} \cdot 100 = \frac{1000 - 785}{1000} \cdot 100 = 21,5\%.$

Таким образом, в результате снижения напряжения сети на 20% при неизменном моменте на валу двигателя ток якоря не изменился, ЭДС уменьшилась на 21,5%, полезная мощность на валу уменьшилась на 22,1%, частота вращения понизилась на 21,5% и КПД уменьшился на 2,0%.

Задача 3.15. Двигатель последовательного возбуждения имеющий номинальную мощность $P_{\text{ном}} = 1,5$ кВт, номинальное напряже-

ние $U_{\text{ном}} = 220$ В вращается с частотой $n_{\text{ном}} = 1500$ мин⁻¹. Сопротивление цепи якоря в нагретом состоянии $R_{\text{я}} = 0,706$ Ом. Момент на валу двигателя $M_{\text{ном}} = 9,55$ Н · м, номинальный ток $I_{\text{ном}} = 17,4$ А.

Построить скоростную характеристику и кривую КПД двигателя при следующих соотношениях момента на валу двигателя: $M / M_{\text{ном}} = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$ и $1,25$. При расчетах принять, что магнитопровод машины не насыщен.

Решение. При малом насыщении стали можно считать, что

$$\frac{I_{\text{м}}}{I} = \frac{I_{\text{я.м}}^2}{I_{\text{я}}^2} \quad \text{и} \quad \frac{E_{\text{м}}}{E} = \frac{C_E n_{\text{м}} \Phi_{\text{м}}}{C_E n \Phi} = \frac{n_{\text{м}} I_{\text{я.м}}}{n \cdot I_{\text{я}}}$$

Тогда $I_{\text{я}} = I_{\text{я.м}} \sqrt{I / I_{\text{м}}}$ и $n = n_{\text{м}} \frac{I_{\text{я.м}} E}{I_{\text{я}} E_{\text{м}}}$.

ЭДС двигателя $E = U_{\text{м}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$.

Полезная мощность на валу двигателя $P = \frac{I \cdot n}{9550}$.

КПД двигателя $\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P}{U_{\text{м}} I_{\text{я}}}$,

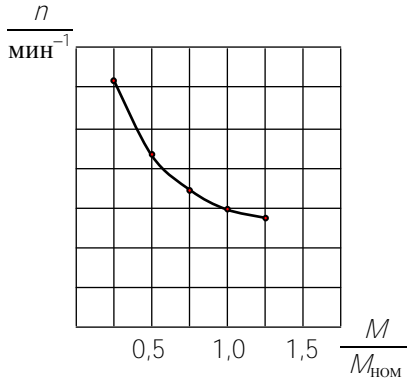
где $P_1 = U_{\text{ном}} I_{\text{я}}$ – мощность, потребляемая двигателем от сети.

Результаты расчета сводим в табл. 3.4.

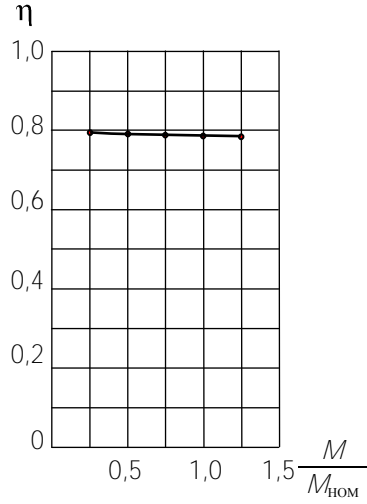
Таблица 3.4

$M/M_{\text{ном}}$	$\sqrt{I / I_{\text{м}}}$	$I_{\text{я}}, \text{А}$	$E, \text{В}$	$n, \text{мин}^{-1}$	$P_1, \text{кВт}$	$P, \text{кВт}$	η
0,25	0,5	4,34	216,9	3045	0,955	0,76	0,796
0,5	0,707	6,14	215,7	2140	1,351	1,07	0,792
0,75	0,866	7,52	214,7	1740	1,654	1,305	0,789
1,0	1,0	8,69	213,9	1500	1,912	1,5	0,785
1,25	1,12	9,73	2131	1335	2,141	1,67	0,78

Зависимости $n = f(I / I_{\text{м}})$ и $\eta = f(I / I_{\text{м}})$ построены по данным табл. 3.4, приведены на рис. 3.9, а, б.



а



б

Задача 3.16. Генератор параллельного возбуждения имеет следующие номинальные данные: $P_{\text{ном}} = 5 \text{ кВт}$, $U_{\text{ном}} = 230 \text{ В}$, $I_{\text{в ном}} = 2 \text{ А}$, $n_{\text{ном}} = 1450 \text{ мин}^{-1}$, $\eta_{\text{ном}} = 80,5 \%$, сопротивление цепи якоря в нагретом состоянии $R_{\text{я}} = 0,95 \text{ Ом}$.

Какую частоту вращения разовьет данная машина, работая в режиме двигателя при $U_{\text{д.ном}} = 220 \text{ В}$ и $P_{\text{д.ном}} = 4,5 \text{ кВт}$, если магнитный поток полюсов и КПД считать одинаковыми в обоих режимах.

Определить также изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу (влиянием тока якоря при холостом ходе и реакцией якоря пренебречь).

Решение. Находим номинальные токи генератора $I_{\text{г.ном}} = 2 \text{ А}$ и двигателя $I_{\text{д.ном}}$:

$$I_{\text{а.г}} = \frac{P_{\text{а.г}}}{U_{\text{а.г}}} = \frac{5000}{230} = 21,74 \text{ А},$$

$$I_{\text{а.д}} = \frac{P_{\text{а.д}}}{\eta_{\text{д}} U_{\text{а.д}}} = \frac{4500}{0,805 \cdot 220} = 25,4 \text{ А}.$$

Так как по условию задачи магнитный поток полюсов одинаков, то токи возбуждения в обоих режимах остаются неизменными.

Номинальный ток обмотки якоря генератора

$$I_{y.a.\dot{m}} = I_{a.\dot{m}} + I_{\dot{a}.\dot{m}} = 21,74 + 2 = 23,74 \text{ \AA}.$$

Номинальный ток обмотки якоря двигателя

$$I_{y.a.\dot{m}} = I_{a.\dot{m}} - I_{\dot{a}.\dot{m}} = 25,4 - 2 = 23,4 \text{ \AA}.$$

При номинальной нагрузке ЭДС генератора

$$\begin{aligned} E_{a.\dot{m}} &= U_{a.\dot{m}} + I_{y.a.\dot{m}} \cdot R_y + \Delta U_u = \\ &= 230 + 23,74 \cdot 0,95 + 2 = 254,55 \text{ \AA}, \end{aligned}$$

где $\Delta U_u = 2 \text{ В}$ для угольных и угольно-графитных щеток.

При номинальной нагрузке ЭДС двигателя

$$\begin{aligned} E_{\dot{a}.\dot{m}} &= U_{\dot{a}.\dot{m}} - I_{y.a.\dot{m}} \cdot R_y - \Delta U_u = \\ &= 220 - 23,4 \cdot 0,95 - 2 = 195,77 \text{ \AA}. \end{aligned}$$

Так как по условию $\Phi_r = \Phi_d = \Phi$, то из выражений для ЭДС генератора и двигателя

$$E_{a.\dot{m}} = C_E n_a \dot{\Phi} \text{ и } E_{\dot{a}.\dot{m}} = C_E n_a \dot{\Phi}$$

находим, что

$$\frac{E_{\dot{a}.\dot{m}}}{E_{a.\dot{m}}} = \frac{n_a}{n_a}.$$

$$\text{Отсюда } n_a = n_a \frac{E_{\dot{a}.\dot{m}}}{E_{a.\dot{m}}} = 1450 \cdot \frac{195,77}{254,55} = 1115 \text{ в}^{-1}.$$

На холостом ходу ЭДС двигателя можно считать равной напряжению ($E_{d.x} \approx U_{d.ном}$). Тогда, пренебрегая реакцией якоря, получим:

$$\frac{n_{\dot{a},\ddot{o}}}{n_{\dot{a}}} = \frac{E_{\dot{a},\ddot{o}}}{E_{\dot{a},\ddot{m}}} \text{ и}$$

$$n_{\dot{a},\ddot{o}} = n_{\dot{a}} \cdot \frac{E_{\dot{a},\ddot{o}}}{E_{\dot{a},\ddot{m}}} = 1115 \cdot \frac{220}{195,77} = 1253 \text{ в}^{-1}.$$

Изменение частоты вращения при переходе от номинального режима к холостому ходу

$$\Delta n = \frac{n_{\dot{a},\ddot{o}} - n_{\dot{a}}}{n_{\dot{a}}} \cdot 100 = \frac{1253 - 1115}{1115} \cdot 100 = 12,4\%.$$

Задача 3.17. Двигатель постоянного тока, номинальные данные которого: $P_{\text{ном}} = 10 \text{ кВт}$, $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, $I_{\text{ном}} = 58 \text{ А}$, $R_{\text{я}} = 0,432 \text{ Ом}$, $R_{\text{в}} = 110 \text{ Ом}$, $n_{\text{ном}} = 750 \text{ мин}^{-1}$, $\eta_{\text{ном}} = 78,5\%$, хотят использовать в качестве генератора напряжением $U_{\text{г}} = 230 \text{ В}$. Падение напряжения в щеточных контактах $\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В}$.

Определить номинальную мощность этого генератора, его КПД и номинальную частоту вращения.

Решение. Токи якоря двигателя и генератора

$$I_{\dot{y},\ddot{a}} = I_{\dot{y},\ddot{a}} = I_{\dot{m}} - I_{\dot{a}} = I_{\dot{m}} - U_{\dot{m}} / R_{\dot{a}} = 58 - 220/110 = 56 \text{ А}.$$

Определяем ЭДС двигателя и генератора:

$$E_{\dot{a},\ddot{a}} = U_{\dot{m}} - I_{\dot{y},\ddot{a}} \cdot R_{\dot{y}} - \Delta U_{\dot{u}} = 220 - 56 \cdot 0,432 - 2 = 193,8 \text{ В},$$

$$E_{\dot{a}} = U_{\dot{a}} + I_{\dot{y},\ddot{a}} \cdot R_{\dot{y}} + \Delta U_{\dot{u}} = 230 + 56 \cdot 0,432 + 2 = 256,2 \text{ В}.$$

Так как по условию задачи $\Phi_{\text{г}} = \Phi_{\text{д}} = \Phi$, то из соотношений $E_{\dot{a}} = C_E \cdot n_{\dot{a}} \cdot \hat{\Phi}$ и $E_{\dot{a},\ddot{a}} = C_E \cdot n_{\dot{a},\ddot{a}} \cdot \hat{\Phi}$ находим

$$n_{\dot{a}} = \frac{E_{\dot{a},\ddot{a}}}{E_{\dot{a}}} \cdot n_{\dot{a},\ddot{a}} = \frac{256,2}{193,8} \cdot 750 \approx 990 \text{ в}^{-1}.$$

Номинальная мощность генератора

$$P_{\text{а.н}} = U_{\text{а}} \cdot I_{\text{а.н}} = 230 \cdot 54 = 12,42 \text{ кВт},$$

а его электромагнитная мощность

$$P_{\text{yi}} = E_{\text{а}} \cdot I_{\text{yа}} = 256,2 \cdot 56 = 14,35 \text{ кВт}.$$

Тогда
$$\eta_{\text{а}} = \frac{P_{\text{а.н}}}{P_{\text{yi}}} = \frac{12,42}{14,35} = 0,865.$$

Задача 3.18. Двигатель постоянного тока смешанного возбуждения имеет следующие технические данные: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 11 \text{ кВт}$, номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, номинальный ток $I_{\text{ном}} = 59,5 \text{ А}$, частота вращения $n_{\text{ном}} = 1500 \text{ мин}^{-1}$, КПД $\eta_{\text{ном}} = 84\%$. Сопротивления обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,162 \text{ Ом}$, дополнительной обмотки $R_{\text{д}} = 0,062 \text{ Ом}$, последовательной обмотки возбуждения $R_{\text{пос}} = 0,0072 \text{ Ом}$, параллельной обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 162 \text{ Ом}$

Построить зависимость КПД и полезной мощности от тока нагрузки при следующих коэффициентах загрузки двигателя $\beta = I / I_{\text{ном}} = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$.

Решение. Ток возбуждения параллельной обмотки

$$I_{\text{а}} = U_{\text{н}} / R_{\text{в}} = 220 / 162 = 1,36 \text{ А}.$$

Ток якоря $I_{\text{y.н}} = I_{\text{н}} - I_{\text{а}} = 59,5 - 1,36 = 58,14 \text{ А}$.

Переменные потери при номинальной нагрузке:

$$\Delta P_{\text{ia01}} \approx 2 \cdot I_{\text{y}} \approx 116,3 \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{\text{ia02}} = I_{\text{y.н}}^2 (R_{\text{я}} + R_{\text{а}} + R_{\text{пос}}) + \Delta P_{\text{aia}} =$$

$$= 58,14^2 (0,162 + 0,062 + 0,0072) + \frac{11000}{84} = 912,5 \text{ Вт},$$

где $\Delta P_{\text{тао}1}$ – потери в щеточных контактах; добавочные потери $\Delta P_{\text{доб}}$ приняты равными 1% от потребляемой мощности.

Суммарные потери

$$\sum \Delta P = P_1 - P_{\text{м}} = \frac{P_{\text{м}}}{\eta_{\text{м}}} - P_{\text{м}} = \frac{11000}{0,84} - 11000 = 2095 \text{ Вт}.$$

Постоянные потери

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{пнò}} &= \sum \Delta P - (\Delta P_{\text{тао}1} + \Delta P_{\text{тао}2}) = \\ &= 2095 - (16,3 + 912,5) = 1066,2 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

КПД двигателя при загрузке β

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\beta P_{\text{м}}}{\beta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{пнò}} + \beta \Delta P_{\text{тао}1} + \beta^2 \Delta P_{\text{тао}2}} = \\ &= \frac{P_{\text{м}}}{P_{\text{м}} + \frac{\Delta P_{\text{пнò}}}{\beta} + \Delta P_{\text{тао}1} + \beta \Delta P_{\text{тао}2}}. \end{aligned}$$

При $\beta = 0,25$ КПД двигателя

$$\eta = \frac{11000}{11000 + \frac{1066,2}{0,25} + 116,3 + 0,25 \cdot 919,5} = 0,70.$$

Потребляемая двигателем мощность при $\beta = 0,25$

$$P_1 = U_{\text{м}} (I_{\text{y.м}} + I_a) = 220 (0,25 \cdot 58,14 + 1,36) = 3496,9 \text{ Вт}.$$

Мощность на валу двигателя

$$P = \eta P_1 = 3496,9 \cdot 0,7047 = 2464,3 \text{ Вт}.$$

Расчеты для других значений β представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

β	0,25	0,5	0,75	1,0
η	0,7047	0,8026	0,8325	0,84
$P_1, \text{Вт}$	3496,9	6694,6	9892,3	13095
$P_2, \text{Вт}$	2464,3	5373	8235,3	11000

Кривые $\eta(\beta)$ и $P(\beta)$, построенные по вычисленным значениям, приведены на рис. 3.10.

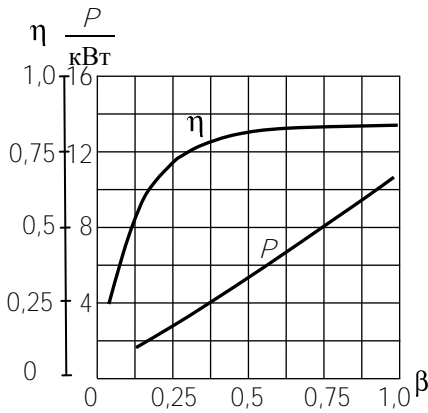


Рис. 3.10

Задача 3.19. Широкорегулируемый двигатель 4ПФ132S постоянного тока с независимым возбуждением имеет следующие номинальные данные:

$$U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}, \quad P_{\text{ном}} = 10 \text{ кВт}, \\ I_{\text{я ном}} = 53 \text{ А}, \quad R_{\text{я}} = 0,29 \text{ Ом}, \\ n_{\text{ном}} = 950 \text{ мин}^{-1}, \\ n_{\text{мах}} = 5000 \text{ мин}^{-1}.$$

Найти частоту его вращения, если $\hat{\omega}^* = \hat{\omega} / \hat{\omega}_{\text{ном}} = 0,4$ при номинальном напряжении и $\hat{\lambda}^* = \hat{\lambda} / \hat{\lambda}_{\text{ном}} = 0,3$.

Решение. Частота вращения двигателя в номинальном режиме

$$n_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{я ном}} R_{\text{я}}}{C_E \hat{\omega}_{\text{ном}}} \quad (3.9)$$

В режиме работы с ослабленным магнитным потоком Φ^* и уменьшенным моментом на валу M^* частоту вращения можно найти из выражения

$$n = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{я ном}} \cdot R_{\text{я}} \cdot \hat{\lambda}^* / \hat{\omega}^*}{C_E \hat{\omega}^* \hat{\omega}_{\text{ном}}} \quad (3.10)$$

Разделив (3.10) на (3.9), получим

$$\frac{n}{n_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{я.н}} \cdot R_{\text{я}} \cdot \lambda^* / \hat{O}^*}{U_{\text{н}} - I_{\text{я.н}} \cdot R_{\text{я}}} \cdot \frac{C_E \hat{O}_{\text{н}}}{C_E \hat{O}^* \hat{O}_{\text{н}}} =$$

$$= \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{я.н}} \cdot R_{\text{я}} \cdot \lambda^* / \hat{O}^*}{U_{\text{н}} - I_{\text{я.н}} \cdot R_{\text{я}}} \cdot \frac{1}{\hat{O}^*}. \quad (3.11)$$

Из (3.11) имеем

$$n = n_{\text{н}} \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{я.н}} \cdot R_{\text{я}} \cdot \lambda^* / \hat{O}^*}{U_{\text{н}} - I_{\text{я.н}} \cdot R_{\text{я}}} \cdot \frac{1}{\hat{O}^*} =$$

$$= 950 \cdot \frac{220 - 53 \cdot 0,29 \cdot 0,3 / 0,4}{220 - 53 \cdot 0,29} \cdot \frac{1}{0,4} = 950 \cdot \frac{208,47}{204,63} \cdot 2,5 = 2420 \text{ в}^{-1}.$$

Контрольные задачи

Задача 3.20. Определить ток якоря и напряжение на зажимах генератора независимого возбуждения при токе возбуждения $I_{\text{в}} = 0,4$ А, если сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} = 0,6$ Ом, нагрузки $R_{\text{н}} = 9,4$ Ом. Характеристика холостого хода $E(I_{\text{в}})$ генератора дана на рис. 3.11.

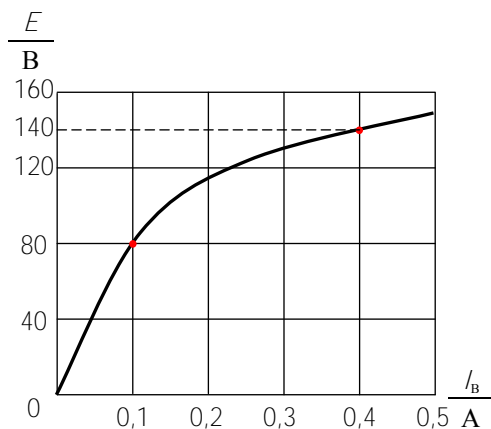


Рис. 3.11

Задача 3.21. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие номинальные данные: $U_{\text{ном}} = 220$ В, сопротивление обмоток якоря и возбуждения в нагретом состоянии $R_{\text{я}} = 0,425$ Ом, $R_{\text{в}} = 110$ Ом. Сопротивление внешней цепи $R_{\text{н}} = 3,8$ Ом.

Найти ЭДС генератора.

Задача 3.22. Сопротивление обмотки якоря генератора параллельного возбуждения $R_{\text{я}} = 0,02$ Ом. Сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 40$ Ом. Сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 2,2$ Ом.

Определить напряжение при номинальной нагрузке, если ЭДС генератора равна 232,1 В.

Задача 3.23. Напряжение на зажимах генератора параллельного возбуждения $U = 115$ В при токе нагрузки $I = 5,2$ А.

Найти ток в цепи якоря и полезную мощность, если сопротивление цепи возбуждения в нагретом состоянии $R_{\text{в}} = 143$ Ом.

Задача 3.24. Генератор постоянного тока смешанного возбуждения имеет следующие данные: $U_{\text{ном}} = 230$ В, сопротивление последовательной обмотки возбуждения в нагретом состоянии $R_{\text{пос}} = 0,02$ Ом, сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} = 0,36$ Ом. Ток нагрузки $I = 60$ А, ток возбуждения обмотки $I_{\text{в}} = 2$ А.

Найти сопротивление параллельной обмотки возбуждения и ЭДС генератора в номинальном режиме.

Задача 3.25. Двигатель параллельного возбуждения имеет следующие данные: $U_{\text{ном}} = 220$ В, $I_{\text{ном}} = 35,71$ А, сопротивление обмоток якоря и добавочных полюсов при температуре 15°C $R_{\text{я}} = 0,376$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения в нагретом состоянии $R_{\text{в}} = 310$ Ом. Число проводников обмотки якоря $N = 744$, число полюсов $2p = 4$, число параллельных ветвей $2a = 2$. Магнитный поток двигателя $\Phi = 0,71 \cdot 10^{-2}$ Вб.

Какое сопротивление необходимо включить в цепь якоря, чтобы при номинальной частоте вращения и неизменном токе якоря поток можно было уменьшить на 20%.

Задача 3.26. Определить частоту вращения, полезную мощность на валу и КПД двигателя последовательного возбуждения данные, которого приведены в задаче 3.14, если напряжение сети повысилось на 10 %, а момент на валу остался прежним.

Задача 3.27. Найти частоты вращения якоря при выключении отдельных ступеней пускового реостата (см. задачу 3.9). Реакцией якоря пренебречь.

Задача 3.28. Определить частоту вращения и ЭДС якоря двигателя постоянного тока смешанного возбуждения при токах якоря: а) $I_{\text{я}} = 0,5 I_{\text{я,ном}}$; б) $I_{\text{я}} = I_{\text{я,ном}}$, если в цепь якоря включено добавочное сопротивление $R_{\text{д}} = 2 \text{ Ом}$.

Данные двигателя: $P_{\text{ном}} = 9 \text{ кВт}$, $n_{\text{ном}} = 900 \text{ мин}^{-1}$, $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, $I_{\text{я,ном}} = 50 \text{ А}$, $R_{\text{я}} + R_{\text{пос}} = 0,338 + 0,062 = 0,4 \text{ Ом}$.

Естественная скоростная характеристика приведена на рис. 3.12.

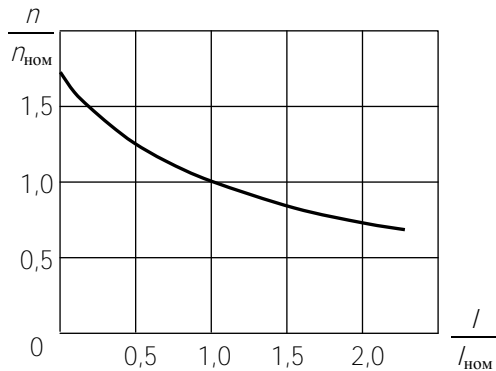


Рис. 3.12

Ответы к контрольным задачам

3.20. $I_{\text{я}} = 14 \text{ А}$, $U = 131,6 \text{ В}$.

3.21. $E = 254 \text{ В}$.

3.22. $U = 230 \text{ В}$.

3.23. $I_{\text{я}} = 6 \text{ А}$, $P = 0,6 \text{ кВт}$.

3.24. $R_{\text{я}} = 115,6 \text{ Ом}$; $E = 253,5 \text{ В}$.

3.25. $R_{\text{д}} = 1,16 \text{ Ом}$.

3.26. $n_1 = 1107 \text{ мин}^{-1}$; $P_2' = 3,1 \text{ кВт}$; $\eta = 0,88$.

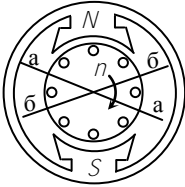
3.27. $n_1 = 826 \text{ мин}^{-1}$; $n_2 = 1217 \text{ мин}^{-1}$; $n_3 = 1402 \text{ мин}^{-1}$.

3.28. а) $n = 860 \text{ мин}^{-1}$; $E = 160 \text{ В}$. б) $n = 450 \text{ мин}^{-1}$; $E = 100 \text{ В}$.

**Тест 3.1 для компьютерного или аудиторного
контроля знаний студентов
Вариант 1**

1. Какой материал используется для изготовления главных полюсов машины постоянного тока: медь, сталь, алюминий, чугун?

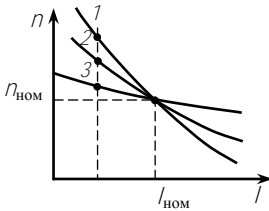
2. Указать направления ЭДС и тока в обмотке якоря генератора постоянного тока, работающего под нагрузкой (+ или •). Каково положение физической нейтрали генератора: а – а или б – б?



3. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения с напряжением $U_{\text{ном}} = 220$ В работает под нагрузкой. При $I_{\text{я1}} = 60$ А частота вращения якоря $n_1 = 980$ мин⁻¹, при $I_{\text{я2}} = 120$ А частота вращения якоря $n_2 = 960$ мин⁻¹. Определить сопротивление $R_{\text{я}}$ цепи якоря и частоту вращения якоря $n_{\text{х}}$ при идеальном холостом ходе.

4. Во сколько раз возрастет ток якоря двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, если момент на валу увеличится в 2 раза? Насыщением магнитопровода пренебречь.

5. Знаками $>$, $<$, $=$ указать соотношение магнитных потоков Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 двигателей постоянного тока параллельного, последовательного и смешанного возбуждения, работающих в точках 1, 2, 3 своих скоростных характеристик. Двигатели имеют одинаковые $P_{\text{ном}}$, $U_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$, $\Phi_{\text{ном}}$, $R_{\text{я}}$.



Ответы

1.	2.	3. $R_{\text{я}}$ $n_{\text{х}}$	4.	5. Φ_1 Φ_2 Φ_3
----	----	--	----	----------------------------------

Вариант 2

1. В какой из точек полюса N двигателя постоянно-го тока (a или b) магнитное поле будет сильнее? В какую сторону по отношению к геометрической нейтрали двигателя (\nearrow – по ходу часовой стрелки или \nwarrow – в противоположном направлении) будет повернута физическая нейтраль?

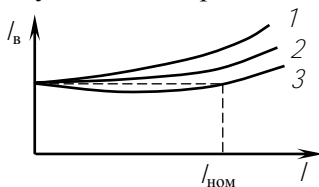


2. Двигатель параллельного возбуждения при напряжении сети $U = 110$ В имеет частоту вращения $n = 1000$ мин⁻¹ и ток возбуждения 1 А. Найти сопротивление $R_{\text{пер}}$ регулировочного реостата цепи возбуждения, позволяющего увеличить частоту вращения до 2500 мин⁻¹.падением напряжения в обмотке якоря пренебречь. Считать, что магнитопровод – ненасыщенный.

3. Обмотка двухполюсного генератора постоянного тока имеет 600 проводников и одну пару параллельных ветвей. Частота вращения якоря $n = 960$ мин⁻¹. При этом в обмотке якоря возникает ЭДС $E = 115$ В. Определить магнитный поток генератора.

4. Во сколько раз увеличится мощность, потребляемая из сети двигателем постоянного тока последовательного возбуждения, если момент на валу двигателя увеличится в 2 раза? Принять, что кривая намагничивания $\Phi(I)$ линейна.

5. На рисунке приведены регулировочные характеристики генераторов постоянного тока различного возбуждения. Перечислить номера характеристик в такой последовательности: генератор независимого возбуждения, генератор смешанного возбуждения, генератор параллельного возбуждения.



Ответы

1.	2.	3. $R_{\text{пер}} =$	4. $\Phi =$	5.
----	----	--------------------------	----------------	----

Вариант 3

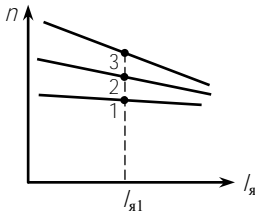
1. Положение физической нейтрали двигателя постоянного тока указано на рисунке. Определить: Направление вращения якоря (\uparrow – по ходу часовой стрелки или \uparrow – в противоположном направлении), а также направление ЭДС и тока в проводе a (+ или \bullet).



2. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения с номинальными параметрами $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, $I_{\text{я.ном}} = 10 \text{ А}$, $n_{\text{ном}} = 2000 \text{ мин}^{-1}$ при идеальном холостом ходе имеет частоту вращения якоря $n_x = 2200 \text{ мин}^{-1}$. Найти ток якоря при частоте вращения $n = 2150 \text{ мин}^{-1}$.

3. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения имеет номинальные параметры $U_{\text{ном}} = 110 \text{ В}$, $I_{\text{ном}} = 40 \text{ А}$, $n_{\text{ном}} = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $R_{\text{я}} + R_{\text{в}} = 0,25 \text{ Ом}$. Найти частоту вращения якоря при токе двигателя $0,5 I_{\text{ном}}$, считая магнитную цепь двигателя линейной.

4. Используя уравнение механической характеристики, показать, как изменятся скорости идеального холостого хода и номинального режима двигателя с независимым возбуждением, если сопротивление якоря $R_{\text{я}}$: а) увеличить; б) уменьшить. Ответ дать в форме \uparrow (возрастет), \downarrow (уменьшится), $=$ (не изменится).



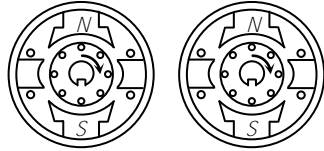
5. Как изменится напряжение холостого хода генератора независимого возбуждения, если при прочих равных условиях: а) площадь сечения обмотки якоря увеличить в 2 раза; б) площадь сечения обмотки возбуждения увеличить в 2 раза. Ответ дать в форме \uparrow (возрастет), \downarrow (уменьшится), $=$ (не изменится).

Ответы

1.	2. $I_{\text{я}} =$	3. $n =$	4. а) б)	5. а) б)
----	------------------------	-------------	----------------	----------------

Вариант 4

1. Указать направление токов в обмотках дополнительных полюсов (+, •) генератора и двигателя.

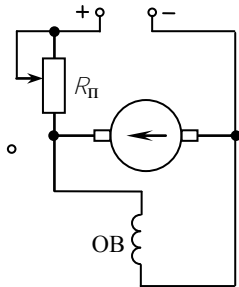


Генератор Двигатель

2. Знаками $>$, $<$, $=$ указать, в каком соотношении находятся моменты M_1 , M_2 , M_3 , развиваемые двигателем постоянного тока при работе в точках 1, 2, 3 своих скоростных характеристик? Точка 3 находится на естественной характеристике.

3. Как изменятся ток якоря I_a двигателя с параллельным возбуждением, его ЭДС E , магнитный поток Φ и частота вращения n , если уменьшить ток возбуждения I_b при неизменных напряжении питания и моменте на валу? Ответ дать в форме \uparrow (возрастет), \downarrow (уменьшится), $=$ (не изменится).

4. Рассчитать пусковой момент в долях от $M_{ном}$, развиваемый двигателем параллельного возбуждения при ошибочном включении пускового реостата сопротивлением $R_{п}$, если $R_{п} = 4R_{я}$, $I_{я п} = 2,5 I_{я.ном}$. Считать, что характеристика намагничивания линейная.



5. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения при напряжении $U_1 = 110$ В создает момент $M_1 = 40$ Н·м. Частота вращения $n_1 = 1000$ мин⁻¹. Частота вращения идеального холостого хода $n_{х1} = 1100$ мин⁻¹. Найти напряжение U_2 , обеспечивающее сохранение частоты вращения якоря при уменьшении момента до $M_2 = 20$ Н·м.

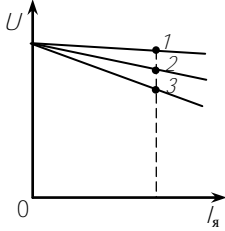
Ответы

1.	2. $M_1 \quad M_2 \quad M_3$	3. I_a , Φ , n , E	4. U_2	5. $M_{п} = M_{ном}$
----	---------------------------------	----------------------------------	----------	-------------------------

Вариант 5

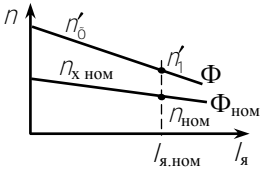
1. Как, имея мегометр, распознать выводы обмоток якоря и возбуждения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения?

2. По внешним характеристикам генератора постоянного тока смешанного возбуждения определить, в каком соотношении находятся ЭДС E_1, E_2, E_3 якоря при работе генератора в режимах 1, 2, 3.

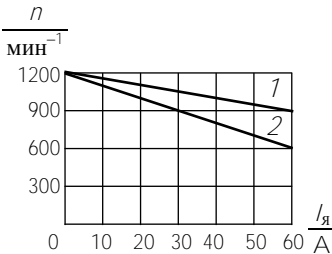


3. Как изменятся ток якоря I_a , ЭДС E и частота вращения n , если увеличить сопротивление реостата R_p в цепи якоря двигателя постоянного тока параллельного возбуждения при неизменных моменте на валу и напряжении питающей сети?

4. Записать выражения, определяющие частоты n'_0 и n' вращения якоря двигателя при работе на искусственной характеристике $n'(I_a)$, по параметрам



естественной характеристики $n(I_a)$ при полном регулировании частоты вращения.



5. По естественной 1 и искусственной 2 характеристикам $n(I_a)$ двигателя постоянного тока найти сопротивление R_p , введенное в цепь якоря, если $R_a = 0,2 \text{ Ом}$.

Ответы

1.	2. $E_1 \quad E_2 \quad E_3$	3. I_a E U_d n	4.	5. $R_p =$
----	---------------------------------	---------------------------------	----	------------

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехника и электроника : учебник для неэлектротехнических специальностей вузов : в 3 кн. / А.М. Киселев [и др.] под ред. В.Г. Герасимова. – М. : Энергоатомиздат, 1997. – Кн. 2 : Электронные устройства и электрические машины.
2. Борисов, Ю.М. Электротехника / Ю.М. Борисов, Д.Н. Липатов, Ю.Н. Зорин. – М. : Высшая школа, 1985. – 537 с.
3. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М. : Высшая школа, 2002. – 542 с.
4. Иванов, И.И. Электротехника / И.И. Иванов, В.С. Равдоник. – М. : Высшая школа, 1984, 2003, 2005. – 496 с.
5. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / под ред. В.Г. Герасимова. – М. : Высшая школа, 1987. – 288 с.
6. Рекус, Г.Г. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Г.Г. Рекус, В.Н. Чесноков. – М. : Высшая школа, 2001. – 416 с.
7. Брускин, Д.Э. Электрические машины и микромашины / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М. : Высшая школа, 1985.
8. Проектирование электрических машин : учебное пособие / под ред. И.П. Копылова. – М. : Энергия, 1980.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 1. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ	3
Задачи с решениями	3
Контрольные задачи	29
Ответы к контрольным задачам	30
Приложение 1.1	31
Тест 1.1 для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов	33
ГЛАВА 2. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ	39
Задачи с решениями	39
Контрольные задачи	65
Ответы к контрольным задачам	68
Тест 2.1 для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов	69
ГЛАВА 3. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	74
Задачи с решениями	74
Контрольные задачи	101
Ответы к контрольным задачам	103
Тест 3.1 для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов	104
ЛИТЕРАТУРА	109

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Сборник задач с контрольными тестами
для студентов неэлектротехнических специальностей*

В 6 частях

Часть 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

С о с т а в и т е л и :

ДОМНИКОВ Сергей Васильевич

РОЗУМ Таисия Терентьевна

БЛАДЫКО Юрий Витальевич и др.

Технический редактор О.В. Песенько
Компьютерная верстка Т.А. Мархель, И.Н. Михневич

Подписано в печать 04.01.2014

Усл. печ. л. 6.45.

Уч.-изд. л. 5.04.

Тираж 200. Заказ 554.