

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Национальный университет кораблестроения
имени адмирала Макарова

Я. Б. ВОЛЯНСКАЯ, С. М. ВОЛЯНСКИЙ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям
по курсу "ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ"

В двух частях

Часть 1

Рекомендовано Методическим советом НУК

Николаев 2007

УДК 681.3.06

Волянская Я.Б., Волянский С.М. Методические указания к практическим занятиям по курсу "Энергосбережение в электроприводе": В 2 ч. – Николаев: НУК, 2007. – Ч. 1. – 72 с.

Кафедра электрооборудования судов

Методические указания предназначены для студентов пятого курса специальности 8.092201 "Электрические системы и комплексы транспортных средств".

Главной задачей практических занятий по дисциплине "Энергосбережение в электроприводе" является закрепление и расширение знаний, которые получают студенты на лекциях, во время самостоятельной работы с литературой, а также приобретение практических навыков проведения расчетов и решения конкретных задач.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Кутковецкий В.Я.

Згідно з наказом № 110 від 25.04.07 "методичні вказівки публікуються в авторській редакції, і відповідальність за їх редагування несе автор".

© Издательство НУК, 2007

ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Обозначение	Название измеряемой величины	Единицы измерения
A	Энергия (работа)	Дж
a, a_u	Коэффициент потерь при номинальном и ненормальном напряжениях	—
α_n, α_u	Коэффициенты качества электродвигателя при номинальном и ненормальном напряжениях ($\alpha = \eta \cos \varphi$)	—
C	Теплоемкость	Дж/°С
c	Постоянные коэффициенты	—
$\cos \varphi_n, \cos \varphi_u$	Коэффициент мощности при номинальном и ненормальном напряжениях	—
E	Электродвижущая сила (ЭДС)	В
e	Мгновенное значение ЭДС	В
h	Число включений двигателя за час	—
f	Частота переменного тока	Гц
φ	Угол поворота	рад
Φ	Магнитный поток	Вб
Ψ	Потокоцепление	Вб
J	Момент инерции	кг · м ²
I_n, I_u, I_0	Токи электродвигателя при номинальном и ненормальном напряжениях, холостого хода	А
i_n, i_u, i_0	Относительные токи при номинальном и ненормальном напряжениях, холостого хода	о.е.

Обозначение	Название измеряемой величины	Единицы измерения
K_E	Коэффициент пропорциональности между ЭДС и ω	—
K_M	Коэффициент пропорциональности между моментом (M) и током (I)	—
L	Индуктивность	Гн
K_R	Коэффициент трансформации сопротивлений	—
k_e	Коэффициент трансформации ЭДС	—
m	Масса	кг
m	Число фаз	—
M, M_n, M_k	Моменты нагрузки: текущий, номинальный, критический	Н · м
m, m_k	Относительные моменты: текущий, критический ($m_n = 1$)	о.е.
n	Скорость вращения	об/мин
η_n, η_u	Коэффициент полезного действия при номинальном и ненормальном напряжениях	—
Ω	Частота колебаний	с ⁻¹
$P_n, P_u, P_{\text{потр.н}}, P_{\text{потр.у}}, P_{\text{полн.н}}, P_{\text{полн.у}}$	Мощности: полезные, потребляемые, полные при номинальном и ненормальном напряжениях	Вт
$P_n, P_u, P_{\text{потр.н}}, P_{\text{потр.у}}, P_{\text{полн.н}}, P_{\text{полн.у}}$	Относительные мощности: полезные, потребляемые, полные при номинальном и ненормальном напряжениях	о.е.
$\Delta P_{\text{мех.н}}, \Delta P_{\text{мех.у}}, \Delta P_n, \Delta P_u, \Delta P_{\text{доб.н}}, \Delta P_{\text{доб.у}}, \Delta P_{1\varphi_n}, \Delta P_{1\varphi_u}, \Delta P_{с_н}, \Delta P_{с_u}, \Delta P_{ст.н}, \Delta P_{ст.у}, \Delta P_{1M_n}, \Delta P_{1M_u}, \Delta P_{2M_n}, \Delta P_{2M_u}$	Потери мощности: механические, полные, добавочные, переменные, постоянные, потери в стали, потери в меди статора, потери в меди ротора при номинальном и ненормальном напряжениях	Вт

Обозначение	Название измеряемой величины	Единицы измерения
$\Delta p_{\text{мех.н}}, \Delta p_{\text{мех.и}}, \Delta p_{\text{н}}, \Delta p_{\text{и}},$ $\Delta p_{\text{доб.н}}, \Delta p_{\text{доб.и}}, \Delta p_{1\vartheta_{\text{н}}}, \Delta p_{1\vartheta_{\text{и}}},$ $\Delta p_{\text{сн}}, \Delta p_{\text{су}}, \Delta p_{\text{ст.н}}, \Delta p_{\text{ст.и}},$ $\Delta p_{1\text{Мн}}, \Delta p_{1\text{Ми}}, \Delta p_{2\text{Мн}}, \Delta p_{2\text{Ми}}$	Относительные потери мощности: механические, полные, добавочные, переменные, постоянные, потери в стали, потери в меди статора, потери в меди ротора при номинальном и ненормальном напряжениях	о.е.
p	Число пар полюсов	—
R	Активное сопротивление	Ом
s	Скольжение	—
$s_{\text{н}}, s_{\text{и}}$	Скольжения при номинальном и ненормальном напряжениях	—
T	Постоянная времени	с
t	Время	с
t°	Температура	$^{\circ}\text{C}$
τ	Температура перегрева	$^{\circ}\text{C}$
$U, U_{\text{н}}, u$	Напряжения: текущее, номинальное; текущее относительное	В; о.е.
u	Мгновенное значение напряжения	В
w	Число витков обмоток	—
ω	Угловая скорость	рад/с
X	Реактивное сопротивление	Ом
Z	Полное сопротивление цепи переменного тока	Ом

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Основные положения и методические рекомендации

Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором упрощенная схема замещения представлена на рис. 1.1. Все параметры на этой

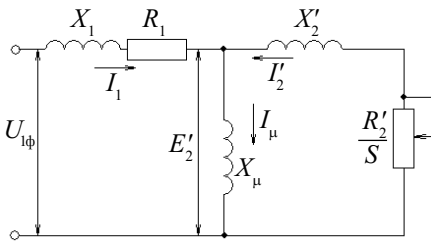


Рис. 1.1. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

схеме обозначены как фазные величины: $U_{1\phi}$ – первичное напряжение сети; I_1 – ток статора; I_μ – ток намагничивания; I'_2 – приведенный ток ротора; X_1 – индуктивное сопротивление рассеивания обмотки статора; X'_2 – приведенное индуктивное сопротивление рассеивания обмотки ротора; X_μ – индуктивное сопротивление обмотки статора; R_1 –

активное сопротивление обмотки статора; R'_2 – приведенное активное сопротивление обмотки ротора; E'_2 – приведенная ЭДС ротора.

Схема приведена без учета потерь в стали.

Синхронная угловая скорость двигателя

$$\omega_0 = 2\pi n_0 / 60 = 2\pi f_1 / p, \quad (1.1)$$

где f_1 – частота питания сети, Гц; p – число пар полюсов двигателя.

Скольжение двигателя

$$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0, \quad (1.2)$$

где ω_0 – синхронная угловая скорость, рад/с; ω – текущая угловая скорость двигателя, рад/с.

Приведенное активное сопротивление роторной обмотки для номинального режима

$$R'_{2н} = M_n \omega_c s_n / 3I_{2н}^2;$$

для режима пуска

$$R'_{2п} = M_n \omega_c m_n / 3I_{2п}^2, \quad (1.3)$$

где $I'_{2н}$ – номинальный ток ротора ($I'_{2н} = I_{2н} / k_e$); $I'_{2п}$ – пусковой ток ротора ($I'_{2п} = I_{п} - I_0$); $R'_2 = k_e^2 R_2$.

Коэффициент трансформации k_e можно определить приблизительно, зная номинальное линейное напряжение статора $U_{1н}$ и ЭДС между кольцами неподвижного разомкнутого ротора $E_{2н}$:

$$k_e = 0,95 U_{1н} / E_{2н}. \quad (1.4)$$

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = Z_k \cos \varphi_n - C_1 R'_{2п}, \quad (1.5)$$

где $Z_k = U_1 / i_n I_{1н}$ – полное сопротивление короткого замыкания.

Индуктивное сопротивление короткого замыкания двигателя в номинальном режиме

$$X_{к.н} = \sqrt{(C_1 R'_{2п} / s_{кр})^2 - R_1^2}, \quad (1.6)$$

в режиме пуска

$$X_{к.п} = \sqrt{Z_k^2 - (R_1 + C_1 R'_{2п})^2}. \quad (1.7)$$

Индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора двигателя с короткозамкнутым ротором

$$X_1 = X'_{2н} = X_{к.н} / 2. \quad (1.8)$$

Используя схему замещения, определим приведенный ток ротора:

$$I'_2 = U_{1ф} / \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}. \quad (1.9)$$

Момент асинхронного двигателя можно определить из выражения потерь скольжения:

$$M = 3(I'_2)^2 R'_2 / \omega_0 s. \quad (1.10)$$

С учетом (1.9) запишем уравнение для механической характеристики двигателя:

$$M = \frac{3 U_{1ф}^2 R'_2}{\omega_0 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right] s}. \quad (1.11)$$

Кривая момента $M = f(s)$ имеет два максимума: один – в генераторном режиме, другой – в двигательном.

Критическое скольжение, при котором двигатель развивает максимальный (критический) момент,

$$s_{\kappa} = \pm R_2' / \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}. \quad (1.12)$$

С учетом (1.12) максимальный (критический) момент

$$M_{\kappa} = \frac{3 U_{1\Phi}^2}{2\omega_0 \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right)}. \quad (1.13)$$

Знак "+" в уравнении (1.13) относится к двигательному режиму (или торможения противовключением), знак "-" – к генераторному режиму работы параллельно с сетью (при $\omega > \omega_0$ или $s < 0$).

Для расчета механической характеристики двигателя используют формулу Клосса

$$M = 2M_{\kappa} (1 + \alpha s_{\kappa}) / s / s_{\kappa} + s_{\kappa} / s + 2\alpha s_{\kappa}, \quad (1.14)$$

где $\alpha = R_1 / R_2'$ – отношение активных сопротивлений статора к приведенному ротору.

Механическая характеристика двигателя имеет следующие характерные точки:

$s = 0$; $M = 0$ – режим холостого хода, в этом случае угловая скорость двигателя совпадает с синхронной ($\omega = \omega_0$);

$s = s_{\Pi}$; $M = M_{\Pi}$ – режим соответствует номинальной скорости и номинальному моменту;

$s = s_{\kappa}$; $M = M_{\kappa,д}$ – точка максимального или критического момента в двигательном режиме;

$s = 1$; $M = M_{\Pi} = [2M_{\kappa}(1 + \alpha s_{\kappa})s_{\kappa}] / (1 + s_{\kappa}^2(1 + 2\alpha))$ – точка начального пускового момента, режим короткого замыкания;

$s = s_{\kappa}$; $M = -M_{\kappa,г}$ – точка максимального или критического момента двигателя в генераторном режиме работы параллельно с сетью.

Абсолютные значения s_{κ} в двигательном и генераторном режимах одинаковы, а максимальные моменты различны:

$$M_{\kappa} = m U_1^2 / 2\omega_0 \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\kappa}^2} \right), \quad (1.15)$$

где $X_{\kappa} = X_1 + X_2'$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания;

знак "+" используется для двигательного режима, знак "-" для генераторного, поэтому $M_{к.г}$ всегда больше $M_{к.д}$.

Иногда для практических расчетов механической характеристики двигателя используют упрощенную формулу Клосса

$$M = 2M_k / (s / s_k + s_k / s), \quad (1.16)$$

где $s_k = \pm R'_2 / X_k$; $M_k = 3 U_{1ф}^2 / 2\omega_0 X_k$ при пренебрежении сопротивлением R_1 .

Зная из каталожных данных номинальное скольжение s_n и кратность максимального момента двигателя $m_k = M_k / M_n$, можно определить критическое скольжение:

$$s_k = s_n \left(m_k + \sqrt{m_k^2 - 1} \right). \quad (1.17)$$

Режим преобразования энергии в асинхронном двигателе определяется значением и знаком скольжения:

$s = 0$; $\omega = \omega_0$ – режим идеального холостого хода;

$s = 1$; $\omega = 0$ – режим короткого замыкания;

$0 < s < 1$; $0 < \omega < \omega_0$ – двигательный режим;

$s < 0$; $\omega > \omega_0$ – рекуперативный режим (рекуперация энергии в сеть);

$s > 1$; $\omega < 0$ – режим торможения противовключением.

Порядок расчета естественной механической характеристики асинхронного двигателя

По паспортным и каталожным данным для асинхронных двигателей (АД) (P_n , n_n , ω_n , m_k , p , f_1) определяют:

угловую скорость идеального холостого хода – ω_0 , рад/с ($\omega_0 = 2\pi f_1 / p$);

номинальный момент M_n , Н·м ($M_n = P_n / \omega_n$);

номинальное скольжение $s_n = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$.

Полученных данных достаточно для построения рабочего участка механической характеристики по двум точкам – ω_n и M_n ; ω_0 и $M = 0$;

критический момент M_k , Н·м ($M_k = m_k M_n$);

критическое скольжение s_k определяют по (1.17);

полученные значения M_k и s_k подставляют в (1.16) и, задавшись значениями скольжения s от 0 до 1, строят механическую характеристику двигателя $M = f(s)$. Если в распоряжении проектировщика есть параметры схемы замещения, то механическую характеристику рассчитывают и строят по полной, несокращенной формуле (1.11).

Пример 1.1

Асинхронный двигатель имеет следующие номинальные данные: $P_n = 40$ кВт; $U_{1н} = 380$ В; $I_{1н} = 83,5$ А; $n_n = 965$ об/мин; $\cos \varphi_n = 0,83$; $f_{1н} = 50$ Гц; $2p = 6$; $I_0 = 46$ А; $M_{\max} = 706$ Н·м; $I_{2н} = 65$ А; $R_1 = 0,093$ Ом; $X_1 = 0,31$ Ом; $R_2 = 0,109$ Ом; $X_2 = 0,64$ Ом; $k_e = 0,975$. Вычислить пусковой и критический моменты двигателя, если частоту и напряжение сети уменьшить в два раза.

Решение

Приведенное к цепи статора индуктивное сопротивление обмотки ротора при номинальной частоте напряжения питания

$$X'_2 = X_2 k_e^2; \quad X'_2 = 0,64 \cdot 0,975^2 = 0,61 \text{ Ом.}$$

Приведенное к цепи статора активное сопротивление обмотки ротора

$$R'_2 = R_2 k_e = 0,109 \cdot 0,975^2 = 0,103 \text{ Ом.}$$

Пусковой момент двигателя из уравнения механической характеристики при $s = 1$, $f = 0,5 f_{1н}$ и $U_{1ф} = 0,5 U_{1н}$

$$\begin{aligned} M_n &= \frac{3 U_{1ф}^2 R'_2 p}{2\pi f_1 s \left((R_1 + R'_2 / s)^2 + f^2 / f_1^2 (X_1 + X'_2)^2 \right)} = \\ &= \frac{3 \cdot (0,5 \cdot 220)^2 \cdot 0,103 \cdot 3}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 50 \cdot 1 \left[\left(0,093 + \frac{0,103}{1} \right)^2 + \left(\frac{0,5 \cdot 50}{50} \right)^2 (0,31 + 0,64)^2 \right]} = 285 \text{ Н} \cdot \text{м.} \end{aligned}$$

Критический момент двигателя (в двигательном режиме)

$$\begin{aligned} M_k &= \frac{3 U_{1ф}^2 p}{2\pi f_1 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + f^2 / f_1^2 (X_1 + X'_2)^2} \right)} = \\ &= \frac{3 \cdot (0,5 \cdot 220)^2 \cdot 3}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 50 \left[0,093 + \sqrt{0,093^2 + \left(\frac{0,5 \cdot 50}{50} \right)^2 (0,31 + 0,61)^2} \right]} = 616 \text{ Н} \cdot \text{м.} \end{aligned}$$

Пример 1.2

В Украине производятся асинхронные двигатели с номинальными данными: $U_{1н} = 380 \text{ В}$; $f_n = 50 \text{ Гц}$; в США – с $U_{1н} = 380 \text{ В}$; $f_n = 60 \text{ Гц}$. Проанализировать возможность использования украинских двигателей в США и двигателей производства США в Украине при их одинаковой номинальной мощности. Какие ограничения необходимо учитывать? Постройте механические характеристики в общем виде.

Решение

1. *Украинские двигатели.* При питании с повышенной частотой повышается скорость ротора, уменьшаются ток намагничивания и магнитный поток. Поэтому уменьшается критический момент или перегрузочная способность двигателя, а номинальный момент можно получить только при увеличении тока ротора выше номинального. Это возможно только при увеличении скольжения и потерь в обмотке. Для механизмов с режимом работы $M_c = \text{const}$ необходимо делать ограничения по моменту: $M_c < M_n$. Номинальная мощность остается такой же самой или близкой к номинальной, поскольку ограничения по моменту будут скомпенсированы за счет повышения скорости. Эти особенности наиболее отвечают требованиям электроприводов с $P = \text{const}$. Для электроприводов вентиляторов и насосов последствия могут быть наиболее тяжелыми, поскольку в этом случае образуется "вилка": перегрузочная способность двигателя по моменту уменьшается, а момент нагрузки механизма, наоборот, увеличивается.

2. *Двигатели США.* При уменьшении частоты тока уменьшается сопротивление контура намагничивания и увеличивается ток намагничивания. Учитывая высокую степень насыщения стали в номинальном режиме в современных электрических машинах, ток вырастет непропорционально сильно по сравнению с уменьшением частоты. Если не принимать во внимание выросший магнитный поток, не удастся получить номинальный момент при номинальном токе статора, поэтому здесь также необходимо ограничивать момент для защиты двигателя от перегрева. В совокупности с уменьшенной скоростью это дает значительное уменьшение мощности двигателя. Положительным можно считать увеличение критического момента и перегрузочной способности. Что касается механизмов, то электроприводу с вентиляторным характером нагрузки будет легче, хотя он и не будет развивать номинальной мощности. Электроприводу механизмов с постоянным моментом необходимо ограничение по моменту, а наиболее тяжелый, недопустимый по нагреву режим будет в электроприводе механизмов с постоянной мощностью.

Пример 1.3

Асинхронный двигатель типа 4A160S имеет следующие паспортные данные: $P_n = 15$ кВт; $n_n = 1465$ об/мин; $I_{1н} = 29,3$ А; $m_k = 2,3$; $i_n = 7$; $p = 2$; $f_1 = 50$ Гц; $U_{1н} = 380$ В. Рассчитать сопротивление добавочного резистора $R_{1д} = 380$ В, включение которого в три фазы двигателя уменьшит пусковой ток в два раза ($\alpha = 0,5$).

Решение

Определим пусковой ток АД при отсутствии резисторов в цепи статора:

$$I_{п} = i_{п} I_{1н} = 7 \cdot 29,3 = 205 \text{ А.}$$

Определим полное сопротивление короткого замыкания:

$$Z_k = U_{1н} / \sqrt{3} I_{п} = 380 / \sqrt{3} \cdot 205 = 1,08 \text{ Ом.}$$

Принимая $\cos \varphi_{п} = 0,4$, определим $R_k = Z_k \cos \varphi_{п} = 1,08 \cdot 0,4 = 0,43 \text{ Ом}$;

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{1,08^2 - 0,43^2} = 1,0 \text{ Ом.}$$

Находим искомое сопротивление:

$$R_{1д} = \sqrt{(Z_k / \alpha)^2 - X_k^2} - R_k = \sqrt{(1,08 / 0,5)^2 - 1^2} - 0,43 = 1,5 \text{ Ом.}$$

Задача 1.1. Рассчитать и построить естественную механическую характеристику асинхронного двигателя, имеющего следующие технические данные: $P_n = 20$ кВт; $U_{1н} = 380$ В; $I_{1н} = 77$ А; $n_n = 1450$ об/мин; $f_1 = 50$ Гц; $p = 2$; $I_0 = 25$ А; $M_{\max} = 215$ Н·м; $\eta_n = 0,89$.

Задача 1.2. В каких режимах работает асинхронный двигатель на рис. 1.2, если ω_0 – частота вращения магнитного поля статора, а ω – частота вращения ротора?

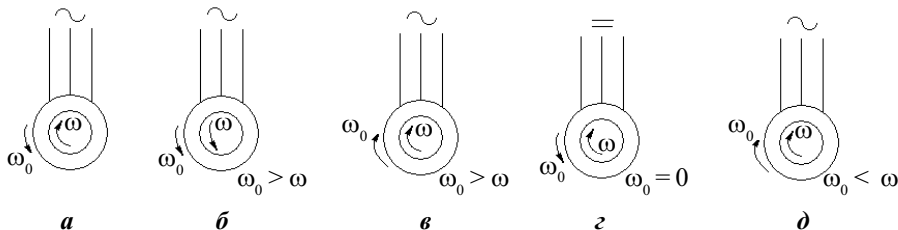


Рис. 1.2. Варианты режимов работы асинхронного двигателя

Задача 1.3. Назовите способы, позволяющие регулировать скорость асинхронного двигателя в режиме идеального холостого хода. Поясните их ограниченное количество.

Задача 1.4. Изобразить схемы соединения полуобмоток статора асинхронного двигателя, позволяющие изменять его скорость при постоянном моменте сопротивления.

Задача 1.5. Рассчитать и построить механические характеристики асинхронного двигателя ($P_n = 4$ кВт; $U_{1н} = 380$ В; $I_{1н} = 27$ А; $f_{1н} = 50$ Гц; $p = 3$; $I_0 = 10$ А; $M_{\max} = 80$ Н·м; $E_k = 100$ В; $I_{2н} = 30$ А; $R_1 = 0,305$ Ом; $X_1 = 2,07$ Ом; $R_2 = 0,085$ Ом; $X_2 = 0,43$ Ом; $k_e = 3,96$; $n_n = 965$ об/мин; $\eta_n = 0,81$) для следующих условий: а) $f_1 = 50$ Гц; б) $f_1 = 60$ Гц; в) $f_1 = 20$ Гц. Причем, при частоте $f_1 = 50$ Гц напряжение на статоре двигателя номинальное, а при частоте $f_1 = 20$ Гц – уменьшается по закону $U_1 / f_1 = \text{const}$.

Задача 1.6. На сколько процентов и в какую сторону изменится скорость асинхронного двигателя при уменьшении напряжения питания на 10 %, если на его валу момент сопротивления равен: а) M_n ; б) $-1,5 M_n$.

Данные двигателя: $P_n = 7,5$ кВт; $n_n = 1435$ об/мин; $U_{1н} = 380$ В; $I_{1н} = 16$ А; $\eta_n = 0,86$; $M_{\max} / M_n$.

Задача 1.7. Трехфазный асинхронный двигатель включен в трехфазную сеть с частотой $f_1 = 50$ Гц. Технические данные двигателя: количество полюсов $2p = 6$; номинальное скольжение $s_n = 0,03$; перегрузочная способность $m_k = 2,2$.

Определить синхронную частоту вращения поля статора, диапазон частот вращения, в котором возможна стабильная работа двигателя на прямолинейном участке механической характеристики.

Задача 1.8. Трехфазный асинхронный двигатель имеет следующие технические данные: номинальная мощность на валу двигателя $P_{2н} = 0,55$ кВт; номинальное линейное напряжение $U_1 = 380/220$ В при частоте $f_1 = 50$ Гц; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{1н} = 0,65$; номинальный КПД $\eta_n = 0,64$; кратность пускового тока $m_{1н} = I_{п} / I_{1н} = 3,5$; линейное напряжение сети $U_c = 220$ В.

Определить номинальную мощность $P_{1н}$, потребляемую двигателем из сети; номинальный $I_{1н}$ и пусковой $I_{п}$ токи двигателя.

Задача 1.9. Трехфазный асинхронный двигатель включен в сеть с линейным напряжением $U_c = 380$ В и имеет следующие характеристики: номинальная мощность на валу двигателя $P_{2н} = 11$ кВт; номинальное напряжение $U_1 = 380/220$ В при частоте $f_1 = 50$ Гц; номинальный КПД $\eta_n = 0,88$; номинальное скольжение $s_n = 0,04$; количество полюсов $2p = 4$.

Определить номинальные линейный $I_{л.н}$ и фазный $I_{ф.н}$ токи двигателя.

ля, угловую скорость поля статора ω_0 и угловую скорость ротора $\omega_{2н}$, вращающий момент M_n .

Задача 1.10. Трехфазный асинхронный двигатель с номинальными мощностью $P_{2н} = 0,55$ кВт и частотой вращения поля статора $n_{1н} = 750$ об/мин имеет кратность максимального момента $m_k = M_{\max}/M_n = 1,7$ и номинальное скольжение $s_n = 0,091$.

Рассчитать и построить механические характеристики двигателя $\omega(M)$ и $M(s)$ при $U = 380$ В = const, определить пусковой момент M_n и его кратность K_n по отношению к номинальному моменту.

Задача 1.11. Определить, какое реактивное сопротивление необходимо включить в цепь статора асинхронного короткозамкнутого двигателя ($P_n = 2,8$ кВт; $n_c = 1500$ об/мин; $R_1 = 1,92$ Ом; $R_2 = 2,29$ Ом; $X_1 = 2,62$ Ом; $X'_2 = 2,04$ Ом), чтобы уменьшить пусковой момент в два раза. Ток намагничивания при расчете не учитывать.

Задача 1.12. Определить сопротивление двигателя с такими техническими характеристиками: $N_n = 875$ кВт; $U_n = 6$ кВ; $I_n = 100$ А; $\cos \varphi_n = 0,88$; $n_n = 985$ об/мин; $i_n = 5,5$; $m_n = 1,2$; $m_k = 2,6$; $\eta_n = 0,93$; $s_n = 0,015$; $\omega_c = 104,7$ с⁻¹; $\omega_n = 103,1$ с⁻¹.

Принять для данного двигателя $C_1 = 1,03$.

Задача 1.13. Рассчитать и построить механическую характеристику асинхронного двигателя, имеющего следующие технические данные: $P_n = 13$ кВт; $n_n = 1450$ об/мин; $\omega_n = 151$ рад/с; $m_k = 2$; $p = 2$; $f_1 = 50$ Гц.

Задача 1.14. Рассчитать и построить естественные электромеханическую и механическую характеристики асинхронного двигателя со следующими данными: $P_n = 17,5$ кВт; $n_n = 945$ об/мин; $U_{1н} = 380$ В; $f_1 = 50$ Гц; $I_{1н} = 43$ А; $R_1 = 0,34$ Ом; $X_1 = 0,43$ Ом; $R_2 = 0,12$ Ом; $X_2 = 0,25$ Ом; $k = 2,66$; $m_k = 2,5$.

Задача 1.15. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А160S имеет следующие паспортные данные: $P_n = 15$ кВт; $n_n = 1465$ об/мин; $I_{1н} = 29,3$ А; $m_k = 2,3$; $i_n = 7$; $p = 2$; $f_1 = 50$ Гц; $U_{1н} = 380$ В. Рассчитать естественную механическую характеристику АД.

Задача 1.16. По данным трехфазного асинхронного двигателя напряжением 220/380 В при $f_1 = 50$ Гц (табл. 1.1) и заданной схеме соединения обмоток статора выполнить следующее:

выбрать линейное напряжение U_c трехфазной сети питания и определить синхронную частоту вращения поля статора, номинальную и критическую частоты вращения ротора;

определить потребляемую двигателем из сети мощность P_1 , номинальный I_n и пусковой I_n токи двигателя, номинальный M_n и максимальный $M_{\max}$ вращающиеся моменты двигателя;

построить зависимость $M(s)$ при $U_c = \text{const}$ и определить кратность

пускового момента $m_n = M_n / M_n$;

построить механическую характеристику $\omega_2(M)$ при $U_c = \text{const}$ и определить диапазон частот вращения ротора, при которых возможна стабильная работа двигателя;

построить характеристики $M(s)$ и $\omega_2(M)$ при $U_1 = 0,9U_c = \text{const}$.

Таблица 1.1. Варианты заданий для асинхронного двигателя

Номер варианта	Схема соединения обмоток статора	$P_{2н},$ кВт	$2p$	s_n	m_k	i_n	η_n	$\cos\varphi_n$
1	Δ	0,10	2	0,075	2,2	4,0	0,68	0,77
2	Y	0,12	4	0,080	2,2	4,0	0,70	0,68
3	Y	0,18	6	0,108	2,2	3,0	0,59	0,62
4	Δ	0,25	2	0,083	2,2	4,5	0,75	0,77
5	Y	0,37	4	0,090	2,2	4,0	0,61	0,68
6	Δ	0,55	6	0,092	2,2	4,0	0,64	0,69
7	Y	0,75	8	0,089	1,7	3,5	0,66	0,70
8	Y	1,10	2	0,085	2,2	4,5	0,73	0,81
9	Δ	1,50	8	0,090	1,7	3,5	0,65	0,69
10	Y	2,20	2	0,059	2,2	5,5	0,77	0,82
11	Δ	3,70	4	0,075	2,2	4,5	0,72	0,79
12	Y	5,60	2	0,063	2,2	5,5	0,78	0,83
13	Δ	7,80	4	0,054	2,2	5,0	0,75	0,80
14	Y	9,30	6	0,080	2,2	4,0	0,74	0,81
15	Δ	10,7	8	0,070	1,9	3,5	0,80	0,83
16	Y	13,5	2	0,050	2,6	6,5	0,81	0,81
17	Y	17,8	4	0,059	2,2	5,0	0,85	0,87
18	Δ	20,1	6	0,064	2,2	4,5	0,83	0,80
19	Δ	22,6	2	0,045	2,6	6,5	0,87	0,83
20	Y	29,3	4	0,051	2,4	6,0	0,77	0,77
21	Y	33,7	6	0,052	2,2	5,0	0,88	0,85
22	Δ	38,1	8	0,060	2,2	5,0	0,83	0,85
23	Y	45,7	2	0,080	2,2	3,5	0,86	0,84
24	Δ	55,3	4	0,090	2,2	2,5	0,89	0,9
25	Y	61,8	4	0,1	2,2	2,5	0,85	0,81
26	Δ	69,5	2	0,080	2,2	3,5	0,81	0,83
27	Y	77,2	4	0,040	2,2	3,5	0,79	0,82
28	Δ	81,6	2	0,090	2,2	4,0	0,84	0,84
29	Y	87,4	4	0,110	2,2	3,5	0,88	0,85
30	Δ	90,3	6	0,070	2,2	3,0	0,85	0,87

Задача 1.17. Асинхронный двигатель приводит в движение конвейер, имеющий механическую характеристику $M_c = M_n(0,2 + 0,8(\omega/\omega_0)^2)$. Параметры двигателя выбираются из табл. 1.2. Необходимо обеспечить работу двигателя конвейера со скоростью $\omega = 0,3\omega_0$ двумя способами: 1) за счет изменения напряжения, которое подается на статор; 2) при частотном регулировании.

Таблица 1.1. Технические данные электродвигателей с коротко

Номер вари- анта	Типоразмер двигателя	$P_{\text{н}}$, кВт	Энергетические показатели		Механическая характеристика		
			$\eta_{\text{н}}$	$\cos\varphi$	$m_{\text{к}}$	$s_{\text{н}}$	$s_{\text{к}}$
						%	
Синхронная угловая							
1	4A80B2Y3	2,2	0,830	0,87	2,6	4,3	38,0
2	4A112M2Y3	7,5	0,875	0,88	2,8	2,5	17,0
3	4A160S2Y3	15,0	0,880	0,91	2,2	2,1	12,0
4	4A180M2Y3	30,0	0,905	0,90	2,5	1,8	12,5
5	4A200L2Y3	45,0	0,910	0,90	2,5	1,8	11,5
6	4A225M2Y3	55,0	0,910	0,92	2,5	1,8	11,0
7	4A280S2Y3	110,0	0,910	0,89	2,2	2,0	8,50
8	4A355S2Y3	250,0	0,925	0,90	1,9	1,9	7,0
Синхронная угловая							
9	4A80A4Y3	1,1	0,75	0,81	2,2	5,4	34,0
10	4A100L4Y3	4,0	0,84	0,84	2,4	4,6	31,5
11	4A132M4Y3	11,0	0,875	0,87	3,0	2,8	19,5
12	4A180S4Y3	22,0	0,90	0,90	2,3	2,0	14,0
13	4A200M4Y3	37,0	0,910	0,90	2,5	1,7	10,0
14	4A280M4Y3	90,0	0,930	0,91	2,0	2,3	6,50
15	4A280M4Y3	132,0	0,930	0,90	2,0	2,3	6,50
16	4A355M4Y3	315,0	0,945	0,92	2,0	1,0	4,0
17	4A80L6Y3	1,5	0,750	0,74	2,2	6,4	31,0
18	4A132S6Y3	5,5	0,850	0,80	2,5	3,3	36,0
Синхронная угловая							
19	4A180M6Y3	18,5	0,880	0,87	2,0	2,4	13,5
20	4A200M6Y3	22,0	0,90	0,90	2,4	2,3	13,5
21	4A280S6Y3	75,0	0,920	0,89	2,2	2,0	8,30
22	4A315M6Y3	132,0	0,935	0,90	2,2	1,7	8,20
23	4A355S6Y3	160,0	0,935	0,90	2,2	1,4	6,50
24	4A355M6Y3	200,0	0,940	0,90	2,2	1,3	6,40

При определении напряжения учитывать необходимость сохранения перегрузочной способности не менее чем $2M_c$ в заданной точке.

Найти значения U_1 (п. 1), а также f_1 , U_1 (п. 2). Построить механическую характеристику двигателя.

замкнутым ротором

Параметры схемы замещения				
X_μ	R'_1	X'_1	R''_2	X''_2
скорость 3000 об/мин				
2,7	0,076	0,050	0,049	0,087
3,8	0,050	0,054	0,036	0,11
4,0	0,052	0,092	0,022	0,12
3,8	0,030	0,073	0,018	0,11
4,9	0,027	0,088	0,020	0,13
5,6	0,023	0,092	0,019	0,12
3,8	0,017	0,097	0,013	0,10
5,7	0,013	0,091	0,011	0,10
скорость 1500 об/мин				
1,7	0,120	0,078	0,068	0,12
2,4	0,067	0,079	0,053	0,14
3,2	0,048	0,085	0,032	0,13
4,0	0,041	0,080	0,021	0,12
4,4	0,030	0,085	0,018	0,14
5,0	0,024	0,093	0,014	0,12
4,5	0,021	0,115	0,018	0,15
5,7	0,012	0,099	0,014	0,14
1,8	0,110	0,110	0,088	0,21
1,9	0,067	0,072	0,041	0,11
скорость 1000 об/мин				
2,0	0,056	0,110	0,026	0,13
4,1	0,650	0,110	0,024	0,14
3,7	0,032	0,120	0,021	0,13
3,5	0,023	0,090	0,018	0,12
3,8	0,020	0,1	0,015	0,14
3,6	0,018	0,091	0,014	0,13

Продолж. табл. 1.1

Номер вари- анта	Типоразмер двигателя	$P_{\text{н}}$, кВт	Энергетические показатели		Механическая характеристика		
			$\eta_{\text{н}}$	$\cos\varphi$	$m_{\text{к}}$	$s_{\text{н}}$	$s_{\text{к}}$
						%	
Синхронная угловая							
25	4A90LA8Y3	0,75	0,680	0,62	1,9	6,0	27,0
26	4A112MB8Y3	3,0	0,735	0,74	2,2	5,8	35,0
27	4A180M8Y3	15,0	0,870	0,82	2,0	2,6	13,0
28	4A225M8Y3	30,0	0,905	0,81	2,1	1,8	11,5
29	4A315S8Y3	90,0	0,930	0,85	2,3	1,5	7,0
30	4A315M8Y3	110,0	0,930	0,85	2,2	1,3	5,50

Примечания к табл. 1.2. Номинальное напряжение всех двигателей 380 В или $U_{н.ф} = 220$ В, схема соединения обмоток статора "звезда". Данные схемы замещения приведены в относительных единицах для Г-образной схемы замещения.

По условию задачи предварительно рассчитываются: 1) номинальный ток двигателя $I_{н} = P_n / 3U_{н.ф} \eta_n \cos \varphi_n$; 2) приведенные активные и реактивные сопротивления ротора: $R'_2 = R''_2$; $X'_2 = X''_2$; базовое сопротивление $R_6 = U_n / I_n$; 3) активные и индуктивные сопротивления в абсолютных единицах $R = rR_6$, $X = xX_6$, $\omega_0 = 2 \pi f_1 / p$, где p – число пар полюсов (число полюсов указано в типоразмере двигателя), $\omega_n = \omega_0(1 - s_n)$, $M_n = P_n / \omega_n$; 4) приводятся сопротивления к Т-образной схеме замещения и пересчитываются в абсолютные единицы:

$$X_1 = 2X'_1X_\mu / (X_\mu + \sqrt{X_\mu^2 + 4X'_1X_\mu}); \quad R_1 = R'_1X_1 / X$$

Задача 1.18. При пуске асинхронного короткозамкнутого двигателя с целью уменьшения пускового тока используют следующее уменьшение напряжения статора:

1. Во сколько раз можно уменьшить пусковой ток за счет уменьшения напряжения, если на естественной характеристике пусковой момент $M_n = 0,5M_n$? Рассмотреть случаи с пуском при $M_c = 0,5M_n$ и $M_c = M_n$.

2. Какие ограничения имеет момент нагрузки при пуске, если в номинальном режиме используется схема соединения обмотки статора "треугольник", а ограничение пускового тока достигается за счет переключения обмотки статора на схему "звезда"?

Параметры схемы замещения				
X_μ	R'_1	X'_1	R''_2	X''_2
скорость 750 об/мин				
1,3	0,140	0,150	0,110	0,29
1,6	0,080	0,110	0,083	0,17
2,4	0,064	0,130	0,030	0,17
2,3	0,045	0,120	0,022	0,022
2,6	0,023	0,110	0,019	0,13
2,4	0,023	0,1	0,019	0,12

Задача 1.19. Для асинхронного двигателя типа 4А160S (см. пример 1.3) рассчитать сопротивление $R_{1д}$, включение которого в цепь статора обеспечивает снижение пускового момента на 20 % ($\mu = 0,8$).

Раздел 2

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

2.1. Потери мощности и энергии в установившемся режиме работы электропривода

Основные положения и методические рекомендации

Потери мощности в электродвигателях условно можно разделить на постоянные и переменные:

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_c + \Delta P_g, \quad (2.1)$$

где ΔP_c – постоянные потери; ΔP_g – переменные потери.

Под *постоянными* потерями мощности понимают такие потери, которые не зависят от нагрузки двигателя. К ним относятся потери в стали магнитопровода, механические потери от трения в подшипниках, вентиляционные потери. Для асинхронного двигателя к постоянным потерям относятся также потери в обмотке статора от тока намагничивания. Постоянными их называют потому, что ранее наиболее распро-

раненным был нерегулируемый электропривод, для которого обычно они неизменны и равны номинальным постоянным потерям. В действительности в регулируемом электроприводе постоянные потери не являются неизменными, а зависят от скорости двигателя, амплитуды и частоты напряжения питания.

Под *переменными* потерями понимают потери, которые происходят в меди обмоток двигателей при прохождении через обмотки переменного (в общем случае) тока нагрузки.

Номинальные потери мощности определяются как

$$\Delta P = P_{\text{н}} (1/\eta_{\text{н}} - 1), \quad (2.2)$$

где $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность двигателя; $\eta_{\text{н}}$ – номинальный КПД.

Для трехфазного асинхронного двигателя суммарные потери мощности

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{г}} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} + 3(I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2'), \quad (2.3)$$

где $\Delta P_{\text{ст}}$ – потери мощности в стали двигателя; $\Delta P_{\text{мех}}$ – механические потери; I_1 и I_2' – соответственно ток в обмотке статора и приведенный ток в обмотке ротора; R_1 и R_2' – соответственно активное сопротивление обмотки статора и приведенное сопротивление обмотки ротора.

Переменные потери мощности $\Delta P_{\text{г}}$ могут быть вычислены через электромагнитный момент, ток ротора и относительную скорость (скольжение):

$$\Delta P_{\text{г}} = M \omega_0 s (1 + R_1 / R_2') = P_{\text{эм}} s (1 + R_1 / R_2'), \quad (2.4)$$

где $P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность; ω_0 – синхронная скорость; s – скольжение двигателя. Тогда суммарные потери

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2' = 3I_2'^2 \left(R_2' + \frac{R_1}{\sigma^2} \right) = \\ &= 3I_{2\text{н}}'^2 \left(R_2' + \frac{R_1}{\sigma_{\text{н}}^2} \right) \left(\frac{I_2'^2}{I_{2\text{н}}'^2} \right)^2 = \Delta P_{\text{гн}} \left(\frac{I_2'^2}{I_{2\text{н}}'^2} \right)^2, \end{aligned} \quad (2.5)$$

где $\Delta P_{\text{гн}} = 3I_{2\text{н}}'^2 (R_2' + R_1 / \sigma_{\text{н}}^2)$ – номинальные переменные потери мощно-

сти АД; $\sigma_n = I'_{2n} / I_{1n} \approx 0,85...0,95$ – номинальная кратность приведенного тока ротора и статора; $\sigma = I'_2 / I_1$ – текущая кратность приведенного тока ротора и статора.

При реостатном регулировании двигателей переменного тока суммарные переменные потери распределяются между обмотками ротора и внешними сопротивлениями пропорционально их значениям. Это связано с тем, что суммарные потери входят в общую потребленную энергию и влияют на КПД, а на нагрев двигателя влияют только потери в обмотках. Это же необходимо учитывать и при питании двигателя от преобразователя, если его внутренним сопротивлением нельзя пренебречь.

При работе двигателей в номинальном режиме, определив по (2.2) номинальные потери мощности, легко рассчитать постоянные потери мощности:

$$\Delta P_c = \Delta P_n - \Delta P_{9n}. \quad (2.6)$$

На базе всех составляющих потерь двигателя строится его нагрузочная диаграмма.

При расчете энергетических характеристик важно как можно точнее определить коэффициент потерь a . Сама по себе величина a изменяется в довольно узких пределах, но то или иное ее значение существенно отражается на результатах расчета. В работе [3] приводятся следующие ориентировочные значения коэффициента a для асинхронных электродвигателей:

для двигателей нормального типа $a = 0,5...1,0$;
 для быстроходных и крановых $a = 1,0...2,0$ и более.
 В общем виде коэффициент потерь

$$a = \Delta P_{cn} / \Delta P_{9n}. \quad (2.7)$$

Коэффициенты потерь a могут быть также вычислены, если известны значения КПД при разных долевых нагрузках. При этом выражение

$$\eta_m = \frac{1 + \Delta P_n (a + M^2)}{M(a + 1)} = \frac{M(a + 1)}{M(a + 1) + \Delta P_n (a + M^2)} \text{ решаем относительно } a:$$

$$a = \frac{1 - \eta_m (1 + \Delta P_n M)}{\eta_m (1 + \Delta P_n / M) - 1}. \quad (2.8)$$

Потери энергии в двигателе. За время работы t_p двигателя с постоянной нагрузкой полные потери энергии, обусловленные постоянными и переменными потерями,

$$\Delta A = \Delta P t_p. \quad (2.9)$$

При работе двигателя с циклически изменяющейся нагрузкой полные потери энергии за весь цикл

$$\Delta A = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt \approx \sum_{i=1}^m \Delta P_i t_i, \quad (2.10)$$

где ΔP_i , t_i – потери мощности и время работы на i -м участке цикла; m –

число отдельных участков цикла; $\sum_{i=1}^m t_i = t_{\text{ц}}$ – время цикла.

КПД электропривода. В общем случае, когда электропривод работает в некотором цикле с различными скоростями или нагрузками на валу как в установившемся, так и переходном режимах, цикловой (или средневзвешенный) КПД

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{потр}}} = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{пол}} + \Delta A} = \frac{\sum_1^n P_{\text{пол}i} t_i}{\sum_1^n P_{\text{пол}i} t_i + \sum_1^n \Delta P_i t_i}, \quad (2.11)$$

где $A_{\text{пол}}$, $A_{\text{потр}}$ – соответственно полезная механическая и потребленная электрическая энергия; ΔA – потери энергии; $P_{\text{пол}i}$ – полезная электрическая мощность на i -м участке цикла; ΔP_i – потери мощности на i -м участке цикла; n – число участков работы электропривода.

Если электропривод работает в установившемся режиме, то формула (2.11) упрощается и принимает вид

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{пол}} + \Delta P}, \quad (2.12)$$

где $P_{\text{пол}}$ – полезная механическая мощность; $P_{\text{пол}} = P_{\text{мех}} = M_c \omega_c$.

Коэффициент мощности электропривода. Если электропривод работает в каком-то цикле при различных нагрузках или скоростях в установившемся и переходном режимах, то он как потребитель реактивной энергии характеризуется средневзвешенным или цикловым ко-

эffiциентом мощности, который определяется отношением потребленной активной энергии за цикл A_a к полной (или кажущейся энергии) A_{Π} в соответствии с формулой

$$\cos \varphi_{\Pi} = A_a / A_{\Pi} = \sum_{i=1}^n P_{a_i} t_i / \sum_{i=1}^n S_i t_i, \quad (2.13)$$

где $S_i = \sqrt{P_{a_i}^2 + Q_i^2}$.

Активная P_a и реактивная Q мощности применительно к установившемуся режиму работы трехфазного АД могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$P_a = P_1 + P_{\text{мех}} = M\omega + \Delta P_c + \Delta P_g; \quad (2.14)$$

$$Q = 3I_{\mu}^2 X_{\mu} + 3I_1^2 X_1 + 3I_2^2 X_2'. \quad (2.15)$$

Пример. 2.1

Вычислить потери и КПД двигателя переменного тока, который работает при номинальном моменте на его валу, если частоту и напряжение питания уменьшить в два раза. Номинальные механические потери $\Delta P_{\text{мех.н}} = 300$ Вт.

Данные двигателя: $P_{\text{н}} = 40$ Вт; $U_{\text{н}} = 380$ В; $I_{\text{лн}} = 835$ А; $\cos \varphi = 0,83$; $n_{\text{н}} = 965$ об/мин; $f_1 = 50$ Гц; $2p = 6$; $I_0 = 46$ А; $M_{\text{max}} = 706$ Н·м; $E_{2\text{н}} = 390$ В; $I_{2\text{н}} = 65$ А; $R_1 = 0,093$ Ом; $X_1 = 0,31$ Ом; $R_2 = 0,109$ Ом; $K_c = 0,975$.

Решение

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{н}} = P_{\text{н}} / \omega_{\text{н}} = 40000 / 101 = 396 \text{ Н·м},$$

где $\omega_{\text{н}} = n_{\text{н}} \pi / 30 = 965 \cdot 3,14 / 30 = 101$ рад/с.

Номинальное скольжение двигателя

$$s = (\omega_0 - \omega_{\text{н}}) / \omega_0 = (104,7 - 101,0) / 104,7 = 0,035,$$

где $\omega_0 = 2\pi f_1 / p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 3 = 104,7$ рад/с.

Номинальные потери в двигателе

$$\Delta P_{\text{н}} = 3U_{\text{лн}} I_{\text{лн}} \cos \varphi - P_{\text{н}} = 3 \cdot 220 \cdot 83,5 \cdot 0,83 - 40000 = 5741 \text{ Вт}.$$

Номинальные потери в меди статора и ротора

$$\Delta P_{\text{м.н}} = M_{\text{н}} \omega_0 s_{\text{н}} (1 + R_1 / R_2') = 396 \cdot 104,7 \cdot 0,035 (1 + 0,093 / 0,103) = 2757 \text{ Вт}.$$

Если задаться рядом значений s , то получим ряд $\Delta P_{\text{м}}$.

Номинальные потери в меди статора от тока намагничивания или же практически от тока холостого хода двигателя

$$\Delta P_0 = 3I_0^2 R_1 = 3 \cdot 46^2 \cdot 0,093 = 590 \text{ Вт.}$$

Номинальные потери в стали статора

$$\Delta P_{\text{ст.н}} = \frac{\Delta P_{\text{н}} - \Delta P_{\text{м.н}} - \Delta P_0 - \Delta P_{\text{мех}}}{1 + s_{\text{н}}^{1,3}} = \frac{5741 - 2757 - 590 - 300}{1 + 0,035^{1,3}} = 2063 \text{ Вт.}$$

Скольжение двигателя при $f = 0,5 f_1$, $U = 0,5 U_{1\text{н}}$ и $M = M_{\text{н}}$ определяется как

$$\begin{aligned} s &= s_{\text{к}} / \left(M_{\text{к}} / M_{\text{н}} + \sqrt{M_{\text{к}}^2 / M_{\text{н}}^2 - 1} \right) = \\ &= 0,219 / \left(616 / 396 + \sqrt{616^2 / 396^2 - 1} \right) = 0,079, \end{aligned}$$

где $s_{\text{к}} = R_2' / \sqrt{R_1^2 + (f / f')^2 (X_1 + X_2')^2} = 0,219$.

При этом потери в меди статора и ротора составят

$$\Delta P_{\text{м}} = M \omega_0' s_{\text{н}} (1 + R_1 / R_2') = 396 \cdot 52,3 \cdot 0,079 (1 + 0,093 / 0,103) = 3113 \text{ Вт,}$$

где $\omega_0' = 2\pi f / p = 2\pi 0,5 f_1 / p = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 50 / 3 = 52,3 \text{ рад/с}$.

Скорость двигателя при снижении частоты и напряжения

$$\omega' = \omega_0' (1 - s) = 52,3 (1 - 0,079) = 48 \text{ рад/с.}$$

Механические потери при скорости ω

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{мех.н}} (\omega' / \omega_{\text{н}})^2 = 300 (48 / 101)^2 = 68 \text{ Вт.}$$

Потери в стали статора и ротора при скорости ω'

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ст}} &= \Delta P_{\text{ст.н}} (U / U_{1\text{н}})^2 (f / f_1)^2 (1 + s^{1,3}) = \\ &= 2063 (0,5 \cdot 220 / 220)^2 (0,5 \cdot 50 / 50)^2 (1 + 0,079^{1,3}) = 217 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Ток намагничивания двигателя определим по выражению $I_0 = E_1 / X_{\mu} = U_1 / X_{\mu}$, где E_1 – ЭДС статора; X_{μ} – индуктивное сопротивление цепи намагничивания.

Таким образом, потери от тока намагничивания в данном случае останутся неизменными.

Суммарные потери в двигателе при $M = M_n$ и $\omega = \omega'$

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_0 + \Delta P_{\text{ст}} = 3113 + 68 + 590 + 217 = 3988 \text{ Вт.}$$

Мощность на валу двигателя

$$P_{\text{дв}} = M_n \omega' = 396 \cdot 48 = 19008 \text{ Вт.}$$

При этом КПД двигателя может быть определен как

$$\eta = P_{\text{дв}} / (P_{\text{дв}} + \Delta P) = 19008 / (19008 + 3988) = 0,82.$$

Пример 2.2

Асинхронный двигатель имеет следующие данные: $P_n = 18,5 \text{ кВт}$; $\omega_n = 152 \text{ рад/с}$; $I_{1n} = 36,5 \text{ А}$; $\eta_n = 0,88$; $\cos \varphi_n = 0,87$; $m_k = 2,1$; $J = 0,37 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $p = 2$. Вычислить мощность постоянных и переменных потерь при работе двигателя с моментом $M_c = 0,9M_n$ на естественной характеристике при соотношении активных сопротивлений статора и приведенного ротора $R_1 / R_2' = 0,6$.

Решение

Принимая во внимание, что режим работы задан величиной момента нагрузки, воспользуемся формулами расчета через механические координаты.

Синхронная скорость

$$\omega_0 = 2\pi f / p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 2 = 157 \text{ рад/с.}$$

Номинальное скольжение

$$s = (\omega_0 - \omega_n) / \omega_0 = (157 - 152) / 157 = 0,033.$$

Номинальный момент

$$M_n = P_n / \omega_n = 18500 / 152 = 122 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Считая рабочий участок механической характеристики АД линейным, найдем скольжение при $M_c = 0,9M_n$:

$$M_c = 0,9M_n = 0,9 \cdot 122 = 110 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$s_c = s_n M_c / M_n = 0,033 \cdot 0,9 = 0,03.$$

Мощность переменных потерь в заданной точке ($\sigma \approx 1$)

$$\Delta P_9 = M_c \omega_0 s_c (1 + R_1 / R_2') = 110 \cdot 157 \cdot 0,03(1 + 0,6) = 829 \text{ Вт.}$$

Мощность потерь АД при работе в номинальном режиме

$$\Delta P_n = P_n / \eta_n - P_n = 18500 / 0,88 - 18500 = 2523 \text{ Вт.}$$

Мощность переменных потерь в номинальном режиме

$$\Delta P_{9n} = M_n \omega_0 s_n (1 + R_1 / R_2') = 122 \cdot 157 \cdot 0,033(1 + 0,6) = 1011 \text{ Вт.}$$

Мощность постоянных потерь

$$\Delta P_c = \Delta P_n - \Delta P_{9n} = 2523 - 1011 = 1512 \text{ Вт.}$$

Задача 2.1. Вычислить потери, которые выделяются в четырех-скоростном короткозамкнутом асинхронном двигателе с синхронными скоростями $n_{c1} = 3000$ об/мин, $n_{c2} = 1500$ об/мин, $n_{c3} = 1000$ об/мин, $n_{c4} = 500$ об/мин. При ступенчатом пуске вхолостую до максимальной скорости:

в одну ступень с $n = 0$ до $n_{c1} = 3000$ об/мин;

в две ступени:

1-я ступень от $n = 0$ до $n_{c2} = 1500$ об/мин;

2-я ступень от $n_{c2} = 1500$ об/мин до $n_{c1} = 3000$ об/мин;

в три ступени

1-я ступень от $n = 0$ до $n_{c3} = 1000$ об/мин;

2-я ступень от $n_{c3} = 1000$ об/мин до $n_{c2} = 1500$ об/мин;

3-я ступень от $n_{c2} = 1500$ об/мин до $n_{c1} = 3000$ об/мин;

в четыре ступени

1-я ступень от $n = 0$ до $n_{c4} = 500$ об/мин;

2-я ступень от $n_{c4} = 500$ об/мин до $n_{c3} = 1000$ об/мин;

3-я ступень от $n_{c3} = 1000$ об/мин до $n_{c2} = 1500$ об/мин;

4-я ступень от $n_{c2} = 1500$ об/мин до $n_{c1} = 3000$ об/мин.

Задача 2.2. Определить постоянные и переменные потери в асинхронном короткозамкнутом двигателе мощностью $P_n = 5,2$ кВт, работающем с нагрузкой $P = 0,5P_n$, если известно, что КПД при половинной загрузке составляет 85,5 %, а при полной – 86 %.

Задача 2.3. Электродвигатель имеет следующие технические характеристики: $P_n = 17$ кВт; $s_n = 0,05$; $n_n = 1425$ об/мин; $n_c = 1500$ об/мин;

$I_n = 33,3 \text{ А}; R_1 = 0,255 \text{ Ом}; \eta_n = 0,845; \cos\varphi_n = 0,86$. Определить коэффициент a .

Задача 2.4. Для двигателя 4А80А4У3 с $\eta_n = 0,75$ значения КПД при различных долевых нагрузках приведены ниже:

М	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
η_n	0,64	0,74	0,76	0,75	0,72

Определить коэффициенты потерь a , соответствующие разным долевым нагрузкам, а также его среднее значение. Построить зависимость $\eta(M)$ при разных a .

Момент инерции, приведенный к валу двигателя, равен $0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, отношение сопротивления фазы статора к приведенному сопротивлению фазы ротора для всех скоростей равно $1,5$. Потерями в стали статора и механическими потерями можно пренебречь.

Задача 2.5. Определить потери в асинхронном двигателе и КПД при уменьшении его скорости до $0,2\omega_n$ в результате введения дополнительного резистора в цепь статора при моменте сопротивления, равном $1,2M_n$. При этом номинальные механические потери составляют 8 % от номинальных постоянных потерь.

Данные двигателя: $P_n = 4 \text{ кВт}; U_{1n} = 380 \text{ В}; n_n = 965 \text{ об/мин}; I_0 = 8,8 \text{ А}; I_{1n} = 22 \text{ А}; I_{2n} = 27,3 \text{ А}; E_{2n} = 100 \text{ В}; p = 3; M_{\max} = 78 \text{ Н}\cdot\text{м}; \eta_n = 0,79; R_1 = 0,305 \text{ Ом}; X_1 = 2,07 \text{ Ом}; R_2 = 0,085 \text{ Ом}; X_2 = 0,43 \text{ Ом}; K_e = 3,96$.

Задача 2.6. Определить потери и КПД асинхронного двигателя, данные которого приведены в задаче 2.5 при номинальном моменте и уменьшении частоты f , и напряжения питания U на 20 %, но при разных законах управления: а) $U_1 = U_{1n}$; б) $U_1/f_1 = \text{const}$; в) $U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}$.

Механические потери в двигателе при номинальной скорости составляют 8 % от величины номинальных постоянных потерь. Насыщением стали пренебречь.

Задача 2.7. Рассчитать и сравнить КПД двух способов достижения скоростью значения $0,9\omega_n$ при номинальном моменте сопротивления, если обозначенную скорость получить путем изменения: а) частоты напряжения по закону $U_1/f_1 = \text{const}$; б) величины напряжения питания.

Данные двигателя приведены в задаче 2.5. Механические потери в двигателе при номинальной скорости составляют 7 % от величины номинальных постоянных потерь.

Задача 2.8. Асинхронный двигатель типа 4АН160S4 имеет номинальные мощность $P_n = 18,5$ кВт; скорость $n_n = 1450$ об/мин; ток статора $I_{1n} = 36,5$ А; КПД $\eta_n = 0,88$; $\cos\varphi_n = 0,87$; $m_n = 1,3$; $J = 0,37$ кг·м².

Рассчитать потери мощности в АД при его работе на естественной характеристике с моментом $M_c = 0,9M_n$, если соотношение $R_1 / R'_2 = 0,6$.

Задача 2.9. По условию задачи 2.8 определить количество энергии, потребляемой из сети АД в номинальном режиме и в заданной точке за один час.

Задача 2.10. Рассчитать КПД двигателя типа 4АН160S4 при его работе в заданной точке (см. данные задачи 2.8).

Задача 2.11. Асинхронный двигатель типа МТКН 412-6 имеет следующие паспортные данные: $P_n = 36$ кВт при продолжительности включения ПВ = 25 %; $n_n = 920$ об/мин; $I_{1n} = 81$ А; $I_\mu = I_{1x.x} = 41,5$ А; $R_1 = 0,13$ Ом; $X_1 = 0,2$ Ом; $R'_2 = 0,24$ Ом; $X'_2 = 0,25$ Ом.

Определить коэффициент мощности при его работе на естественной характеристике с моментом нагрузки $M_c = 0,5M_n$.

Задача 2.12. Двигатель МТКН 412-6 (см. данные задачи 2.11) работает в течение 7 мин с моментом нагрузки $M_{c1} = 0,9M_n$, в течение 12 мин – с $M_{c2} = 0,4M_n$ и в течение 4 мин – с $M_{c3} = M_n$.

Определить средневзвешенный коэффициент мощности АД за этот цикл работы.

2.2. Потери мощности и энергии в переходных режимах электропривода

Основные положения и методические рекомендации

Определение энергетических показателей работы электропривода в переходных режимах очень важно особенно потому, что в переходных режимах токи в обмотках двигателя существенно превышают номинальные значения, следовательно, вызывают повышенные потери энергии и дополнительный нагрев двигателя.

Для общего случая потери энергии за время переходного процесса

$$\Delta A = \Delta A_c + \Delta A_g, \quad (2.16)$$

где ΔA_c и ΔA_g – потери энергии, которые обусловлены постоянными и переменными потерями мощности.

Составляющая потерь энергии ΔA_c легко определяется при посто-

янных потерях мощности ΔP_c за время переходного процесса. Тогда

$$\Delta A_c = \Delta P_c t_{п.п}, \quad (2.17)$$

где $t_{п.п}$ – время переходного процесса.

Составляющая потерь энергии ΔA_9 может быть определена с использованием формул (2.4), (2.5), в которых переменные потери мощности выражены через электрические величины – момент, ток, сопротивление.

Потери энергии:

в роторе при работе двигателя с $M_c = 0$ и постоянным напряжением питания в общем виде определяются как

$$\Delta A_{20} = (J/2) (\omega_{0кон}^2 - \omega_{0нач}^2), \quad (2.18)$$

где J – суммарный момент инерции привода; ω_0 – скорость идеального холостого хода;

при пуске асинхронных двигателей вхолостую со скорости $\omega_{0нач} = 0$ до скорости $\omega_{0кон} = \omega_0$

$$\Delta A_{20} = J\omega_0^2 / 2; \quad (2.19)$$

при торможении противовключением со скорости $\omega_{0нач} = \omega_0$ до скорости $\omega_{0кон} = 0$

$$\Delta A_{20} = 3J\omega_0^2 / 2; \quad (2.20)$$

при реверсе электропривода с $\omega_{0нач} = -\omega_0$ до $\omega_{0кон} = 0$ потери энергии равны сумме потерь при противовключении и пуске:

$$\Delta A_{20} = 4(J\omega_0^2 / 2). \quad (2.21)$$

Для определения потерь энергии в статоре АД потери в роторе пересчитывают в потери в статоре пропорционально их сопротивлениям по уравнению

$$\Delta A_{10} = \Delta A_{20} R_1 / R_2'. \quad (2.22)$$

Потери энергии в роторе $\Delta A_{2н}$ при работе двигателей под нагрузкой ($M_c \neq 0$)

$$\Delta A_{2н} = M_{ср} / (M_{ср} \pm M_c) \Delta A_{20}, \quad (2.23)$$

где $M_{ср}$ – средний, неизменный за время переходного процесса, момент двигателя; ΔA_{20} – потери энергии в роторе при пуске с $M_c = 0$.

В соответствии с (2.23) потери энергии в двигателе при его работе с реактивной нагрузкой по сравнению с потерями при работе холостую увеличиваются в режиме пуска и уменьшаются в режиме торможения, (знак "-" в (2.23)).

Потери энергии в статоре

$$\Delta A_{1н} = \Delta A_{2н} R_1 / R_2'. \quad (2.24)$$

Общие потери энергии в АД $\Delta A_g = \Delta A_{1н} + \Delta A_{2н}$.

Потери энергии при ступенчатом пуске двигателя уменьшаются, и, в общем случае, когда скорость идеального холостого хода в переходном процесса имеет n ступеней регулирования, потери энергии в роторе уменьшаются в n раз:

$$\Delta A_{2ст} = J\omega_{0н}^2 / 2n, \quad (2.25)$$

где $\omega_{0н}$ – максимальная скорость идеального холостого хода двигателя, по отношению к последней ступени.

Существенного уменьшения потерь достигают при изменении напряжения питания двигателей. Если допустить, что время переходного процесса $t_{п.п}$ значительно больше, чем электромеханическая постоянная привода ($t_{п.п} \gg T_{эм}$), что характерно для большинства случаев переходного процесса в электроприводе, то потери энергии при пуске с линейным изменением напряжения питания (а значит, и скорости идеального холостого хода ω_0) и $M_c = 0$ имеют вид

$$\Delta A_{2ст} = J\omega_{0н}^2 / \left(2(T_{эм} / t_{п.п}) \right) = \Delta A_{20} \left(2(T_{эм} / t_{п.п}) \right), \quad (2.26)$$

где ΔA_{20} – потери энергии при пуске двигателя с неизменным напряжением и $M_c = 0$.

Из (2.26) видно, что потери энергии при пуске с линейным изменением напряжения в несколько раз меньше, чем при пуске с постоянным напряжением питания.

Пуск асинхронного двигателя происходит при частотном управлении и $M_c = 0$. Общие потери энергии

$$\Delta A_{g0} = \left(J\omega_{1н}^2 / 2 \right) \left[1 + \left(R_1 / R_2' \right) \right] \left(2T_{эм} / t_{п.п} \right). \quad (2.27)$$

Пример 2.3

Рассчитать потери энергии при двух- и одноступенчатом пуске на максимальную скорость при помощи изменения числа пар полюсов и динамическом торможении двухскоростного асинхронного двигателя

со следующими данными: $p_1 = 4$; $p_2 = 2$; $R_1 / R'_2 = 0,9$; $J = 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Момент сопротивления на валу двигателя отсутствует.

Решение

Скорость идеального холостого хода двигателя при $p_1 = 4$

$$\omega_{01} = 2\pi f_1 / p_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 4 = 78,5 \text{ рад/с.}$$

Скорость идеального холостого хода двигателя при $p_2 = 2$

$$\omega_{02} = 2\pi f_1 / p_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 2 = 157 \text{ рад/с.}$$

Потери энергии при пуске до скорости ω_{01}

$$\Delta A_1 = \left(\frac{J\omega_{01}^2}{2} \right) \left[1 + \left(\frac{R_1}{R'_2} \right) \right] (s_{\text{нач}1}^2 - s_{\text{кон}1}^2) = 1,2 \cdot \frac{78,5^2}{2} (1 + 0,9) (1^2 - 0^2) = 7024 \text{ Дж,}$$

$$\text{где } s_{\text{нач}1} = \frac{\omega_{01} - \omega_{\text{нач}}}{\omega_{01}} = \frac{78,5 - 0}{78,5} = 1; \quad s_{\text{кон}1} = \frac{\omega_{01} - \omega_{\text{кон}}}{\omega_{01}} = \frac{78,5 - 78,5}{78,5} = 0.$$

Потери энергии при разгоне двигателя от скорости ω_{02} до скорости ω_{02}

$$\Delta A_2 = \left(\frac{J\omega_{02}^2}{2} \right) \left[1 + \left(\frac{R_1}{R'_2} \right) \right] (s_{\text{нач}2}^2 - s_{\text{кон}2}^2) = 1,2 \cdot \frac{157^2}{2} (1 + 0,9) (0,5^2 - 0^2) = 7024 \text{ Дж,}$$

$$\text{где } s_{\text{нач}2} = \frac{\omega_{02} - \omega_{01}}{\omega_{02}} = \frac{157 - 78,5}{157} = 0,5; \quad s_{\text{кон}2} = \frac{\omega_{02} - \omega_{\text{кон}}}{\omega_{02}} = \frac{157 - 157}{157} = 0.$$

Суммарные потери энергии при двухступенчатом пуске

$$\Delta A_{\text{п}} = \Delta A_1 + \Delta A_2 = 7024 + 7024 = 14048 \text{ Дж.}$$

Потери энергии в двигателе при одноступенчатом пуске от $\omega_{01} = 0$ до $\omega_{02} = 157 \text{ рад/с}$ определяются как

$$\Delta A_2 = \left(\frac{J\omega_{02}^2}{2} \right) \left[1 + \left(\frac{R_1}{R'_2} \right) \right] (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) = 1,2 \cdot \frac{157^2}{2} (1 + 0,9) (1 + 0,9) = 28099 \text{ Дж,}$$

$$\text{где } s_{\text{нач}} = \frac{\omega_{02} - \omega_{\text{нач}}}{\omega_{02}} = \frac{157 - 0}{157} = 1; \quad s_{\text{кон}} = \frac{\omega_{02} - \omega_{\text{кон}}}{\omega_{02}} = \frac{157 - 157}{157} = 0.$$

Таким образом, потери энергии при одноступенчатом пуске вдвое больше потерь энергии при двухступенчатом пуске.

Потери энергии в двигателе при динамичном торможении со скорости ω_{02} до скорости $\omega = 0$

$$\Delta A_{\text{т}} = \left(\frac{J\omega_{02}^2}{2} \right) \left[1 + \left(\frac{R_1}{R'_2} \right) \right] (s_{\text{нач.т}}^2 - s_{\text{кон.т}}^2) = 1,2 \cdot \frac{157^2}{2} (1 + 0,9)(1^2 - 0^2) = 28099 \text{ Дж},$$

$$\text{где } s_{\text{нач}} = \frac{\omega_{\text{нач}}}{\omega_{02}} = \frac{157}{157} = 1; \quad s_{\text{кон}} = \frac{\omega_{\text{кон}}}{\omega_{02}} = \frac{0}{157} = 0.$$

Пример 2.4

Двухскоростной асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие данные: $P_{\text{н}} = 2,5$ кВт; $n_{01} = 1500$ об/мин; $n_{02} = 3000$ об/мин; $J = 0,23$ кг·м²; $R_1 / R'_2 = 1,6$. Нагрузка на валу двигателя отсутствует, т. е. $M_{\text{с}} = 0$.

Определить полные потери энергии при прямом и ступенчатом пусках на высокую скорость и прямом и ступенчатом торможении с высокой скорости.

Решение

1. Определим высокую и низкую угловые синхронные скорости АД:

$$\omega_{01} = 2\pi n_{01} / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1500 / 60 = 157 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{02} = 2\pi n_{02} / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 3000 / 60 = 314 \text{ рад/с}.$$

2. Полные потери в АД при прямом пуске

$$\Delta A_{\text{п}} = \left(\frac{J\omega_{02}^2}{2} \right) \left[1 + \left(\frac{R_1}{R'_2} \right) \right] (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) = 0,23 \cdot \frac{314^2}{2} (1 + 1,6)(1^2 - 0^2) = 29480 \text{ Дж}.$$

3. Потери при ступенчатом пуске:

$$\text{пуск до скорости } \omega_{01} \quad \Delta A_{\text{п1}} = 0,23 \cdot 157^2 / 2 (1 + 1,6)(1^2 - 0^2) = 7370 \text{ Дж};$$

$$\text{пуск от } \omega_{01} \text{ до } \omega_{02} \quad \Delta A_{\text{п2}} = 0,23 \cdot 314^2 / 2 (1 + 1,6)(0,5^2 - 0^2) = 7370 \text{ Дж};$$

суммарные потери при ступенчатом пуске

$$\Delta A_{\text{п1-2}} = \Delta A_{\text{п1}} + \Delta A_{\text{п2}} = 14740 \text{ Дж}.$$

Убеждаемся, что потери энергии при ступенчатом пуске вдвое меньше потерь при прямом пуске.

4. Потери энергии при одноступенчатом торможении противовключением со скорости ω_{02} до нуля

$$\Delta A_T = 3 \cdot 0,23 \cdot 314^2 / 2 \cdot (1 + 1,6)(2^2 - 1^2) = 88440 \text{ Дж.}$$

5. Потери энергии при двухступенчатом торможении:
генераторное торможение от скорости ω_{02} до скорости ω_{01}

$$\Delta A_{T1} = 4 \cdot 0,23 \cdot 314^2 / 2 \cdot (1 + 1,6)(0,5^2 - 0^2) = 7370 \text{ Дж;}$$

торможение противовключением от скорости ω_{01} до нуля

$$\Delta A_{T2} = 3 \cdot 0,23 \cdot 157^2 / 2 \cdot (1 + 1,6)(2^2 - 1^2) = 22110 \text{ Дж;}$$

суммарные потери в АД при ступенчатом торможении

$$\Delta A_{T1-2} = \Delta A_{T1} + \Delta A_{T2} = 7370 + 22110 = 29480 \text{ Дж.}$$

Очевидно, что суммарные потери при двухступенчатом торможении втрое меньше, чем при одноступенчатом.

Задача 2.13. Двухскоростной асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие технические данные: $P_n = 2,5$ кВт; $J = 0,23$ кг·м²; $n_{01} = 1500$ об/мин; $n_{02} = 3000$ об/мин; $R_1 / R'_2 = 1,6$. Нагрузка на валу двигателя отсутствует.

Рассчитать потери энергии:

при прямом и ступенчатом пусках на более высокую скорость;

при прямом и ступенчатом торможениях с более высокой скорости до нуля.

Задача 2.14. Рассчитать полную работу, произведенную двигателем за время разгона до скорости 800 об/мин, если средний вращающий момент, который развивает двигатель, составляет 250 Н·м, статический момент на валу двигателя 100 Н·м, а приведенный к валу двигателя момент инерции 10 кг·м².

Задача 2.15. Двухскоростной асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие данные: $P_n = 4,5$ кВт; $n_{01} = 1500$ об/мин; $n_{02} = 3000$ об/мин; $J = 0,33$ кг·м²; $R_1 / R'_2 = 1,48$. Нагрузка на валу двигателя отсутствует, т. е. $M_c = 0$.

Определить потери энергии при прямом и ступенчатом пусках на

высокую скорость и прямом и ступенчатом торможениях с высокой скоростью.

Задача 2.16. Определить потери энергии в двухскоростном АД с короткозамкнутым ротором и энергию, отдаваемую в сеть, при ступенчатом торможении в две ступени с $n_{c1} = 3000$ об/мин до $n_{c2} = 1500$ об/мин переключением полюсов, а с $n_{c2} = 1500$ об/мин до $n = 0$ об/мин – противовключением. Момент инерции ротора $J = 0,2$ кг·м², момент статического сопротивления при торможении отсутствует. Отношение сопротивления статора к приведенному сопротивлению ротора 1 : 2. Потерями энергии в стали и механическими потерями пренебречь.

Задача 2.17. Определить потери энергии в четырехскоростном асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором, имеющим следующие скорости: $n_{c1} = 3000$ об/мин, $n_{c2} = 1500$ об/мин, $n_{c3} = 1000$ об/мин, $n_{c4} = 500$ об/мин при ступенчатом торможении (рекуперативном и противовключением) вхолостую с максимальной скорости:

1) в одну ступень противовключением с $n_{c1} = 3000$ об/мин до $n = 0$ об/мин;

2) в две ступени

а) с $n_{c1} = 3000$ об/мин до $n_{c2} = 1500$ об/мин, переключение числа пар полюсов;

б) с $n_{c2} = 1500$ об/мин до $n = 0$ об/мин противовключением;

3) в три ступени

а) с $n_{c1} = 3000$ об/мин до $n_{c2} = 1500$ об/мин, переключением числа пар полюсов;

б) с $n_{c2} = 1500$ об/мин до $n_{c3} = 1000$ об/мин, переключением числа пар полюсов;

в) с $n_{c3} = 1000$ об/мин до $n = 0$ об/мин, противовключением;

4) в четыре ступени

а) с $n_{c1} = 3000$ об/мин до $n_{c2} = 1500$ об/мин, переключением числа пар полюсов;

б) с $n_{c2} = 1500$ об/мин до $n_{c3} = 1000$ об/мин, переключением числа пар полюсов;

в) с $n_{c3} = 1000$ об/мин до $n_{c4} = 500$ об/мин, переключением числа пар полюсов;

г) с $n_{c4} = 500$ об/мин до $n = 0$ об/мин, противовключением.

Потерями энергии в стали ротора и механическими потерями пренебречь.

Задача 2.18. Определить переменные потери энергии в АД типа 4АН160S4 при пуске вхолостую и при номинальном моменте нагрузки (см. данные задачи 2.8).

Задача 2.19. Для АД (см. данные задачи 2.8) определить переменные потери энергии в двигателе при динамическом торможении и реверсе вхолостую, а также при номинальном моменте нагрузке $M_c = M_n$, считая, что при торможении и реверсе двигатель развивает момент $M_{cp} = 207 \text{ Н}\cdot\text{м} = \text{const}$.

Раздел 3

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

3.1. Выбор установленной мощности и типа двигателя

Основные положения и методические рекомендации

Одним из важнейших организационно-технических мероприятий энергосбережения является правильный выбор установленной мощности асинхронного двигателя. При завышении номинальной мощности двигателя по сравнению с требуемой возрастают капитальные затраты на электропривод, не в полной мере используются заложенные в двигатель активные материалы (медь и сталь), снижаются КПД и коэффициент мощности двигателя.

Основой для расчета мощности и выбора электродвигателя являются нагрузочная диаграмма $M_c(t)$ и диаграмма скорости (тахограмма) $\omega(t)$ исполнительного органа рабочей машины. После выбора мощности электродвигателя производится проверка двигателя по нагреву прямыми или косвенными методами.

Прямой метод проверки двигателей по нагреву имеет один существенный недостаток: для его использования необходимо знать тепловые параметры – теплоотдачу A и теплоемкость C . Обычно в справочниках эти параметры не указываются, поэтому в большинстве случаев проверка двигателей по нагреву осуществляется косвенными методами, а именно методами средних потерь и эквивалентных величин.

Метод средних потерь – наиболее точный и универсальный из косвенных методов. Сущность этого метода заключается в определении средних потерь мощности ΔP_{cp} за цикл работы двигателя и сопоставлении их с номинальными потерями мощности ΔP_n , после чего делается заключение о нагреве двигателя:

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n. \quad (3.1)$$

Методы эквивалентных величин основаны на методе средних потерь.

Метод эквивалентного тока целесообразно использовать в том случае, когда известен график изменения тока двигателя во времени, который может быть получен расчетным путем или экспериментально.

Представим средние потери мощности в двигателе как сумму постоянных и переменных потерь:

$$\Delta P_{\text{ср}} = 1/t_{\text{ц}} \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i = 1/t_{\text{ц}} \sum_{i=1}^n P_c t_i + 1/t_{\text{ц}} \sum_{i=1}^n P_{\text{эп}} (I_i / I_{\text{н}})^2 t_i, \quad (3.2)$$

где ΔP_i , I_i , t_i – потери мощности, ток двигателя и продолжительность i -го участка рабочего цикла; n – число участков в цикле; $t_{\text{ц}}$ – время цикла.

С учетом (3.2) условие проверки двигателя по нагреву (3.1) будет иметь вид

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i / t_{\text{ц}}} = I_{\text{экв}} \leq I_{\text{н}}. \quad (3.3)$$

Формула (3.3) справедлива, если постоянные потери не изменяются за цикл работы, а сопротивления главных цепей двигателя остаются неизменными в цикле работы, иначе метод эквивалентного тока даст погрешность в оценке теплового состояния двигателя.

Метод эквивалентного момента удобно использовать в том случае, когда известен график изменения момента двигателя во времени $M(t)$. В дополнение к указанным условиям применения метода эквивалентного тока при использовании метода эквивалентного момента должно соблюдаться еще одно условие – постоянство магнитного потока двигателя на протяжении всего цикла работы.

Если это условие выполняется, то, умножив обе части выражения (3.3) на $k\Phi_{\text{н}}$, получим

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i / t_{\text{ц}}} = M_{\text{экв}} \leq M_{\text{н}}, \quad (3.4)$$

где $M_{\text{экв}}$ – эквивалентный по условиям нагрева среднеквадратичный момент двигателя за рабочий цикл.

Метод эквивалентной мощности используется, если известен гра-

фик изменения мощности во времени и при условии постоянства постоянных потерь, магнитного потока и скорости двигателя на всех участках рабочего цикла.

Допустим, что скорость двигателя на всех участках цикла равна номинальной. Умножив обе части соотношения (3.4) на ω_n , получим

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i / t_{\text{ц}}} = M_{\text{экв}} \omega_n = P_{\text{экв}} \leq P_n, \quad (3.5)$$

где $P_{\text{экв}}$ – эквивалентная по условиям нагрева мощность, определяемая как среднеквадратичная механическая мощность двигателя на рабочий цикл.

Формулы (3.3)–(3.5) выведены из условий, что скорость и теплоотдача близки к номинальным, независимо от способа охлаждения. Если рассматривать регулируемый электропривод, то при снижении скорости теплоотдача тоже снижается и при одинаковых потерях мощности перегрев двигателя будет большим. С учетом этого в формулах эквивалентных величин коэффициент ухудшения охлаждения (КУО), который представляет собой отношение теплоотдачи двигателя на пониженной скорости к теплоотдаче в номинальном режиме, $\beta \leq 1$. У двигателей с искусственной принудительной вентиляцией при снижении скорости снижение теплоотдачи не происходит, и для них всегда $\beta = 1$. У двигателей с самовентилиацией для каждой скорости ω_i можно рассчитать значение β_i :

$$\beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \omega_i / \omega_n, \quad (3.6)$$

где β_0 – коэффициент ухудшения охлаждения неподвижного двигателя, который принимается:

$\beta_0 = 0,9 \dots 1,0$ – для двигателей с независимым охлаждением;

$\beta_0 = 0,45 \dots 0,55$ – для двигателей с охлаждением от собственного вентилятора с внешним обдувом;

$\beta_0 = 0,25 \dots 0,35$ – для двигателей с самовентилиацией.

Для динамических режимов пуска и торможения используют приблизительное значение КУО за время пуска или торможения:

$$\beta = (\beta_0 + 1) / 2. \quad (3.7)$$

С учетом условий охлаждения при скоростях, отличных от номи-

нальной, формулы эквивалентных величин (3.3)–(3.5) принимают вид:

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i / t_{\text{ц}} \beta}; \quad (3.8) \quad M_{\text{экв}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i / t_{\text{ц}} \beta}; \quad (3.9)$$

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n P_i^2 (\omega_{\text{н}} / \omega_i)^2 t_i / t_{\text{ц}} \beta}. \quad (3.10)$$

Работу всех, без исключения, двигателей по характеру нагрева можно отнести к следующим номинальным режимам:

S1 продолжительный номинальный по нагреву режим работы. Относятся двигатели, работающие продолжительное время с постоянной нагрузкой, при этом превышение температуры всех частей двигателя достигает установившихся значений.

S2 кратковременный номинальный по нагреву режим работы. Относятся двигатели, работающие значительно меньше времени паузы, на протяжении которой они неподвижны. При этом периоды нагрузки не настолько велики, чтобы превышения температуры двигателя могли достигать постоянных значений, а периоды остановки настолько велики, что все части двигателя охлаждаются до температуры окружающей среды. Двигатели для этого режима работы производятся для нормированной продолжительности рабочего периода 10, 30, 60 и 90 мин.

S3 повторно-кратковременный номинальный по нагреву режим работы. Относятся двигатели, часть времени которые работают, а часть – находятся в неподвижном состоянии. При этом режиме кратковременные периоды постоянной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами отключений двигателя (паузами). Рабочие периоды и паузы не настолько продолжительны, чтобы превышения температуры могли достичь постоянных значений. Продолжительность цикла при этом режиме не превышает 10 мин. Такой режим характеризуется относительной продолжительностью включения (ПВ): ПВ = 15, 20, 40 и 60 %, которая определяется как

$$\text{ПВ}\% = (t_{\text{р}} / (t_{\text{р}} + t_{\text{н}})) \cdot 100 \% = (t_{\text{р}} / T_{\text{н}}) \cdot 100 \%, \quad (3.11)$$

где $t_{\text{р}}$, $t_{\text{н}}$, $T_{\text{н}}$ – соответственно время работы, паузы и всего цикла.

Кроме основных номинальных по нагреву режимов работы существуют дополнительные, которые уточняют режим работы двигателя и условия его охлаждения [4].

*Расчет мощности и проверка выбранного двигателя
для продолжительного режима работы*

1. В соответствии с заданной нагрузочной диаграммой электропривода определяют одну из эквивалентных величин по (3.3)–(3.5).

2. Рассчитанные эквивалентные величины $I_{\text{экв}}$, $M_{\text{экв}}$, $P_{\text{экв}}$ сравниваются с соответствующими номинальными значениями выбранного двигателя.

3. Если номинальные величины выбранного двигателя больше или равны соответствующим значениям эквивалентных величин, т. е. $I_{\text{н}} \geq I_{\text{экв}}$, $M_{\text{н}} \geq M_{\text{экв}}$, $P_{\text{н}} \geq P_{\text{экв}}$, то двигатель по условию нагрева выбран правильно.

4. Выбранный двигатель проверяется по условию перегрузки. Если приближенные значения выбранных величин двигателя превышают или равны максимальным величинам по нагрузочной диаграмме ($I_{\text{доп}} \geq I_{\text{max}}$, $M_{\text{доп}} \geq M_{\text{max}}$, $P_{\text{доп}} \geq P_{\text{max}}$), значит, двигатель по условию перегрузки выбран правильно.

Допустимые значения тока и момента определяются с учетом соответствующих коэффициентов перегрузки двигателей. Если условия 3 и 4 не выполняются, то следует выбрать двигатель большей мощности и произвести повторную проверку.

*Расчет мощности и проверка выбранного двигателя
для кратковременного режима работы*

Для такого режима промышленность производит специальные двигатели, имеющие повышенную перегрузочную способность и более полное использование их по нагреву.

Расчет производится в следующей последовательности:

в соответствии с нагрузочной диаграммой определяют, например, эквивалентную мощность $P_{\text{экв}}$ по (3.5);

рассчитывают коэффициент a – отношение постоянных потерь к переменным при номинальной нагрузке: $a = \Delta P_{\text{сн}} / \Delta P_{\text{эв}}$;

определяют допустимую мощность двигателя с реальным временем работы $t_{\text{р}}$

$$P^{(\kappa)} = P_{\text{н}} \sqrt{(a+1) \left(1 - e^{-t_{\text{р.кат}}/T_{\text{н}}} - a\right) / \left(1 - e^{-t_{\text{р}}/T_{\text{н}}} - a\right)}, \quad (3.12)$$

где $t_{\text{р.кат}}$ – каталожное время работы двигателя; $T_{\text{н}}$ – постоянная времени нагрева; $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность двигателя.

Если рассчитанная допустимая мощность $P^{(к)} \geq P_{\text{экв}}$, то двигатель по условию нагрева выбран правильно.

В случае, когда необходимо выбрать для кратковременного режима работы двигатель, изготовленный и предназначенный для продолжительного режима работы, производят следующие расчеты:

определяют, например, эквивалентный момент $M_{\text{экв}}$ по (3.4) и нагрузочной диаграмме;

определяют момент $M_{\text{н}}^{(к)}$, который способен развивать данный двигатель в кратковременном режиме согласно уравнению

$$M_{\text{н}}^{(к)} = M_{\text{н}} \sqrt{(a+1) / \left(1 - e^{-t_p / T_{\text{н}}} - a\right)}, \quad (3.13)$$

где $M_{\text{н}}$ – номинальный момент двигателя в продолжительном режиме работы.

Если выполняется условие $M_{\text{н}}^{(к)} \geq M_{\text{экв}}$, то двигатель по условию его нагрева выбран правильно, в противном случае выбирается двигатель большей мощности. Выбранный по условиям нагрева двигатель проверяют на соответствие условию перегрузки.

Расчет мощности и проверка выбранного двигателя для повторно-кратковременного режима работы

Если в повторно-кратковременном режиме работы параметры нагрузочной диаграммы (мощность и ПВ) равны или близки к номинальным, то проверка двигателя по нагреву не нужна.

Выбор двигателя и проверка его по условию нагрева для случаев, когда ПВ не совпадает с нормированным $PВ_{\text{н}}$, производится в следующей последовательности.

По нагрузочной диаграмме определяют

$$ПВ = \left(\frac{t_1 + t_2 + \dots + t_i}{t_1 + t_2 + \dots + t_i + t_0} \right) \cdot 100 \%, \quad (3.14)$$

а с помощью (3.3)–(3.5) – $I_{\text{экв}}$, $M_{\text{экв}}$, $P_{\text{экв}}$.

Примечание. В повторно-кратковременном режиме эквивалентные величины рассчитываются только на интервале суммарного времени работы. Поэтому в знаменателе уравнений (3.3)–(3.5) не учитываются интервалы неподвижного состояния t_0 .

Если выполняются условия

$$I_{\text{н}} \geq I_{\text{экв}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{экв}} / (a(\text{ПВ}_{\text{н}} - \text{ПВ}_{\text{экв}}) + \text{ПВ}_{\text{н}})} ; \quad (3.15)$$

$$M_{\text{н}} \geq M_{\text{экв}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{экв}} / (a(\text{ПВ}_{\text{н}} - \text{ПВ}_{\text{экв}}) + \text{ПВ}_{\text{н}})} ; \quad (3.16)$$

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{экв}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{экв}} / (a(\text{ПВ}_{\text{н}} - \text{ПВ}_{\text{экв}}) + \text{ПВ}_{\text{н}})} , \quad (3.17)$$

то температура двигателя не будет превышать допустимого значения.

Проверка по условиям нагрева двигателя, предназначенного для продолжительного режима работы, но используемого для повторно-кратковременной нагрузки, производится по следующим выражениям:

$$I_{\text{н}} \geq I_{\text{экв}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{экв}} / (1 + a - a\text{ПВ}_{\text{экв}} / 100)} ; \quad (3.18)$$

$$M_{\text{н}} \geq M_{\text{экв}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{экв}} / (1 + a - a\text{ПВ}_{\text{экв}} / 100)} ; \quad (3.19)$$

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{экв}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{экв}} / (1 + a - a\text{ПВ}_{\text{экв}} / 100)} , \quad (3.20)$$

где $I_{\text{н}}$, $M_{\text{н}}$, $P_{\text{н}}$ – соответственно номинальные значения тока, момента и мощности для продолжительного режима работы.

Перерасчет мощности на нормированную ПВ производится по выражению

$$P_{\text{норм}} = P_{\text{экв}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{экв}} / \text{ПВ}_{\text{норм}}} . \quad (3.21)$$

Пример 3.1

Определить мощность и выбрать двигатель по каталогу для привода производственного механизма.

График приведенного к валу двигателя момента статической нагрузки с учетом его потерь в передаче изображен на рис. 3.1. К месту установки двигателя подведена трехфазная линия с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 380$ В, частота вращения двигателя должна быть приближена к $n = 1450$ об/мин.

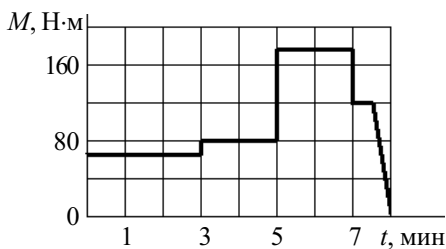


Рис. 3.1. График момента статической нагрузки

Решение

По характеру нагрузки определяем режим работы двигателя как номинальный продолжительный. Эквивалентный момент

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{(120^2 \cdot 1 + 60^2 \cdot 2 + 80^2 \cdot 2 + 180^2 \cdot 2)} / (1 + 2 + 2 + 2) = 119 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Рабочая скорость двигателя $\omega = \pi n / 30 = 3,14 \cdot 1450 / 30 = 151,8 \text{ рад/с}$. Эквивалентная мощность $P_{\text{экв}} = M_{\text{экв}} \omega = 119 \cdot 151,8 = 18,07 \text{ кВт}$.

С учетом условий работы по каталогу выбираем трехфазный асинхронный двигатель типа 4А160М4У3 со следующими техническими характеристиками: $P_{\text{н}} = 18,5 \text{ кВт}$; $U_{\text{н}} = 380/220 \text{ В}$; $\eta_{\text{н}} = 0,895$; $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,86$; $m_{\text{к}} = 2,3$; $n_{\text{н}} = 1460 \text{ об/мин}$.

Номинальные скорость двигателя $\omega_{\text{н}} = 3,14 \cdot 1460 / 30 = 152,9 \text{ рад/с}$, момент $M_{\text{н}} = P_{\text{н}} / \omega_{\text{н}} = 18500 / 152,9 = 121 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Максимальный (критический) момент

$$M_{\text{max}} = m_{\text{к}} M_{\text{н}} = 2,3 \cdot 121 = 278,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По нагрузочной диаграмме максимальный момент статического сопротивления $M_{\text{с}} = 180 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

По перегрузочной способности двигатель выбран правильно, так как выполняется условие $0,9 M_{\text{max}} = 254,5 > M_{\text{с}} = 180$.

Пример 3.2

Для привода транспортера, работающего в продолжительном режиме, предварительно выбран асинхронный двигатель с номинальными данными $P_{\text{н}} = 20 \text{ кВт}$; $U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$; $n_{\text{н}} = 1450 \text{ об/мин}$; $M_{\text{max}} = 289 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Двигатель с нагрузкой $M_{\text{с1}} = 140 \text{ Н} \cdot \text{м}$ работает 70 % рабочего времени, с нагрузкой $M_{\text{с2}} = 65 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – 30 % рабочего времени. Проверить правильность выбора двигателя.

Решение

Номинальная скорость двигателя

$$\omega_{\text{н}} = \pi n_{\text{н}} / 30 = 3,14 \cdot 1450 / 30 = 151,8 \text{ рад/с}.$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{н}} = P_{\text{н}} / \omega_{\text{н}} = 20000 / 151,8 = 131,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Эквивалентный момент

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{(t_{p1} M_{c1}^2 + t_{p2} M_{c2}^2) / (t_{p1} + t_{p2})} = \\ = \sqrt{0,7 t_p \cdot 140^2 + 0,3 t_p \cdot 65^2} / t_p = 122 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где t_{p1} – время работы двигателя с моментом 140 Н·м; t_{p2} – время работы двигателя с моментом 65 Н·м; t_p – время полного цикла.

Поскольку $M_{\text{экв}} < M_n$, то двигатель удовлетворяет условиям нагрева. Так как $M_{d \max} > M_{c \max}$, то двигатель проходит по перегрузочной способности. Таким образом, двигатель выбран правильно.

Пример 3.3

Выбрать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором для привода центробежного насоса, работающего в непродолжительном режиме. Статический момент сопротивления на валу двигателя $M_c = 200 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Время включенного состояния двигателя $t_p = 20 \text{ мин}$, время пуска $t_n = 5 \text{ с}$. Номинальная скорость вала насоса $\omega_1 = 150 \text{ рад/с}$, момент инерции насоса, приведенный к валу двигателя, $J = 0,35 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Решение

Предварительно выбираем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором требуемых мощности и числа оборотов из серии, предназначенной для продолжительной работы, со следующими данными: $P_n = 20 \text{ кВт}$; $U_n = 380 \text{ В}$; $n_n = 1450 \text{ об/мин}$; $M_{\max} = 288 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_n = 235 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $\eta_n = 0,87$; $R_1 = 0,08 \text{ Ом}$; $R'_2 = 0,1 \text{ Ом}$; $J_d = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Постоянная времени двигателя $T_n = 0,5 \text{ мин}$. Номинальная скорость $\omega_n = 3,14 \cdot 1450/30 = 151,8 \text{ рад/с}$. Номинальный момент двигателя

$$M_n = P_n / \omega_n = 20000/151,8 = 131 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент двигателя превышает момент статического сопротивления, что дает возможность нормального пуска.

Угловое ускорение двигателя при пуске

$$\varepsilon = \omega_1 / t_n = 151,8/5 = 30,36 \text{ рад/с}.$$

Динамический момент двигателя

$$M_{\text{дин}} = (J_d + J) \varepsilon = (0,5 + 0,35) \cdot 30,36 = 25,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент двигателя во время пуска

$$M_1 = M_c + M_{\text{дин}} = 200 + 25,8 = 225,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Номинальные потери выбранного двигателя

$$\Delta P_{\text{н}} = P_{\text{н}} (1/\eta_{\text{н}} - 1) = 20000(1/0,87 - 1,0) = 2989 \text{ Вт}.$$

Номинальные переменные потери, зависящие от нагрузки двигателя,

$$\Delta P_{\text{9н}} = M_{\text{н}} \omega_0 s_{\text{н}} (1 + R_1 / R_2') = 131 \cdot 157 \cdot 0,033 (1 + 0,08/0,1) = 1221 \text{ Вт},$$

где $\omega_0 = 2\pi f/p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50/2 = 157 \text{ рад/с}$; $s_{\text{н}} = (\omega_0 - \omega_{\text{н}})/\omega_0 = (157 - 151)/157 = 0,033$.

Постоянные номинальные потери в двигателе, не зависящие от нагрузки на его валу,

$$\Delta P_{\text{сн}} = \Delta P_{\text{н}} - \Delta P_{\text{9н}} = 2989 - 1221 = 1768 \text{ Вт}.$$

Отношение постоянных потерь к номинальным переменным потерям будет

$$a = \Delta P_{\text{сн}} / \Delta P_{\text{9н}} = 1768/1221 = 1,45.$$

Момент, способный развить этот двигатель без перегрузки на протяжении времени t_p в кратковременном режиме без перегрева,

$$\begin{aligned} M^{(\kappa)} &= M_{\text{н}} p_{\text{м}} = M_{\text{н}} \sqrt{(a+1) / \left(1 - e^{-t_p/T_{\text{н}}} - a\right)} = \\ &= 131 \sqrt{(1,45+1) / \left(1 - e^{-20/30} - 1,45\right)} = 247 \text{ Н}\cdot\text{м}, \end{aligned}$$

где $p_{\text{м}}$ – коэффициент механической перегрузки.

Эквивалентный момент двигателя за время работы

$$\begin{aligned} M_{\text{эkv}} &= \sqrt{(M_1^2 t_{\text{п}} + M_c^2 (t_p - t_{\text{п}})) / t_p} = \\ &= \sqrt{(225,5^2 \cdot 5 + 200^2 (1200 - 5)) / 1200} = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}. \end{aligned}$$

Поскольку $M^{(\kappa)} > M_{\text{эkv}}$, то максимальное превышение температуры двигателя не превысит допустимой величины.

Кроме того, $M_1 < M_{\max}$, что свидетельствует об удовлетворении двигателя условиям перегрузки по моменту. Значит, двигатель выбран правильно.

Пример 3.4

Электродвигатель работает в следующем цикле: пуск, статическое движение с номинальной скоростью, торможение, движение по аналогичной тахограмме в обратном направлении, потом пауза. Время пуска и торможения $t_{\text{п}} = t_{\text{т}} = 1,5$ с. Время движения с постоянной скоростью $t_{\text{у}} = 20$ с, время паузы $t_0 = 45$ с. Момент сопротивления на валу двигателя при движении в прямом направлении $M_{\text{с}} = 75$ Н·м, в обратном – $M_{\text{с}2} = 25$ Н·м. Номинальная скорость двигателя должна составлять 950 об/мин, момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя, $J_{\text{м}} = 0,92$ кг·м².

Выбрать для описанных условий работы асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Решение

Определяем среднеквадратичный статический момент двигателя

$$M_{\text{ср}} = K_{\text{з}} \sqrt{\left(M_{\text{с}1}^2 (t_{\text{п}} + t_{\text{у}} + t_{\text{т}}) + M_{\text{с}2}^2 (t_{\text{п}} + t_{\text{у}} + t_{\text{т}}) \right) / 2(t_{\text{п}} + t_{\text{у}} + t_{\text{т}})} = \\ = 1,1 \sqrt{(75^2 (1,5 + 20 + 1,5) + 25(1,5 + 20 + 1,5)) / 2(1,5 + 20 + 1,5)} = 61 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $K_{\text{з}} = 1,1 \dots 1,3$ – коэффициент, учитывающий отличие нагрузочной диаграммы двигателя от диаграммы статической нагрузки. Это отличие образуется из-за неучета в диаграмме статической нагрузки динамической составляющей момента двигателя, поскольку на данном этапе расчета двигатель не известен и, следовательно, не известны его динамические параметры и момент инерции.

Продолжительность включения привода определяется как

$$\text{ПВ} = 2(t_{\text{п}} + t_{\text{у}} + t_{\text{т}}) / (2(t_{\text{п}} + t_{\text{у}} + t_{\text{т}}) + t_0) = \\ = 2(1,5 + 20 + 1,5) / (2(1,5 + 20 + 1,5) + 45) = 0,5.$$

Пересчитываем $M_{\text{ср}}$ на ближайшее стандартное значение $\text{ПВ}_{\text{ст}}$:

$$M'_{\text{ср}} = M_{\text{ср}} \sqrt{\text{ПВ} / \text{ПВ}_{\text{ст}}} = 61 \sqrt{0,5 / 0,4} = 68 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Предварительно выбираем двигатель из условия, что $M_{\text{н}} \geq M_{\text{ср}}$

при $PB_{\text{ст}} = 0,4$. Номинальные данные такого двигателя следующие:
 $P_{\text{н}} = 7,5 \text{ кВт}$; $n_{\text{н}} = 945 \text{ об/мин}$; $M_{\text{max}} = 211 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\eta_{\text{н}} = 0,83$; $J_{\text{д}} = 0,28 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Номинальная скорость двигателя

$$\omega_{\text{н}} = \pi n_{\text{н}} / 30 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 2 = 157 \text{ рад/с}.$$

Номинальный момент выбранного двигателя

$$M_{\text{н}} = P_{\text{н}} / \omega_{\text{н}} = 7500 / 99 = 75,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя,

$$J_{\Sigma} = J_{\text{д}} + J_{\text{м}} = 0,28 + 0,8 = 1,08 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Угловое ускорение двигателя при пуске и торможении

$$\varepsilon = \omega_{\text{н}} / t_{\text{п}} = 99 / 1,5 = 65,9 \text{ рад/с}$$

постоянное.

Моменты двигателя при пуске и торможении при движении в прямом направлении соответственно будут определяться как

$$M_1 = M_{\text{с1}} + J_{\Sigma} \varepsilon = 75 + 1,08 \cdot 65,9 = 154 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_2 = M_{\text{с1}} - J_{\Sigma} \varepsilon = 75 - 1,08 \cdot 65,9 = -4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Моменты двигателя при пуске и торможении в процессе движения в обратном направлении:

$$M_3 = M_{\text{с2}} + J_{\Sigma} \varepsilon = 25 + 1,08 \cdot 65,9 = 104 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_4 = M_{\text{с2}} - J_{\Sigma} \varepsilon = 25 - 1,08 \cdot 65,9 = -54 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Эквивалентный момент двигателя

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\left(M_1^2 t_{\text{п}} + M_{\text{с1}}^2 t_{\text{y}} + M_2^2 t_{\text{т}} + M_3^2 t_{\text{п}} + M_{\text{с2}}^2 t_{\text{y}} + M_4^2 t_{\text{т}} \right) / \left(2(\beta t_{\text{п}} + t_{\text{y}} + \beta t_{\text{т}}) \right)} =$$

$$= \sqrt{\frac{(154^2 \cdot 1,5 + 75^2 \cdot 20 + (-4)^2 \cdot 1,5 + 104^2 \cdot 1,5 + 25^2 \cdot 20 + (-54)^2 \cdot 1,5)}{2(0,62 \cdot 1,5 + 20 + 0,63 \cdot 1,5)}} = 64 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

где $\beta = (1 + \beta_0) / 2 = (1 + 0,25) / 2 = 0,62$ – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения выбранного двигателя с самовентиляцией ($\beta_0 = 0,25$) при пуске и торможении.

Эквивалентный момент приводим к стандартной $PB_{\text{ст}}$:

$$M'_{\text{экв}} = M_{\text{экв}} \sqrt{PB / PB_{\text{ст}}} = 64 \sqrt{0,5 / 0,4} = 71 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Двигатель удовлетворяет условиям нагрева, так как $M_n > M'_{\text{экв}}$, а также условиям допустимой максимальной нагрузки (с учетом возможного уменьшения напряжения в сети на 10 %), а именно: $(0,9)^2 M_{\text{max}}$ должен превышать M_1 , т. е. $(0,9)2 \cdot 211 = 170,9$ Н·м больше $M_1 = 154$ Н·м.

Задача 3.1. Короткозамкнутый асинхронный двигатель с $P_n = 2$ кВт; $n_n = 975$ об/мин; $m_n = 288$ Н·м; работает в кратковременном режиме с постоянным значением статического момента нагрузки и временем включения, которое составляет 0,01 его постоянной времени нагрева.

Определить максимальную величину статического момента, которым может быть нагружен двигатель, если известно, что вследствие провала в кривой момента его минимальный момент составляет 0,7 начального пускового. Возможно уменьшение напряжения в сети на 10 %, но при этом необходимо, чтобы наименьший момент ускорения составлял не менее 10 % статического.

Задача 3.2. Определить мощность, которую может развить двигатель в повторно-кратковременном режиме за ПВ = 40 %, не перегреваясь сверх нормы, если его номинальная мощность в продолжительном режиме составляет 20 кВт.

При решении задачи можно допустить, что постоянные потери равны переменным потерям двигателя, теплоотдача не зависит от скорости, а потери при пуске можно считать незначительными.

Задача 3.3. С каким моментом и для какого режима работы относится двигатель, если нагрузочная диаграмма исполнительного органа задана промежутками времени $t_1 = 85$ с, $t_2 = 25$ с, $t_3 = 40$ с, $t_4 = 25$ с, на протяжении которых приведенный к валу двигателя момент нагрузки $M_1 = 40$ Н·м, $M_2 = 180$ Н·м, $M_3 = 40$ Н·м, $M_4 = 10$ Н·м соответственно. После наступила пауза длиной $t_0 = 80$ с, и далее цикл работы повторяется.

Задача 3.4. Двигатель имеет постоянную времени нагрева 50 мин и при длительной нагрузке способен развивать мощность 20 кВт.

Определить его часовую мощность, если при мощности 20 кВт постоянные потери составляют 40 %, а переменные – 60 % от полных потерь. При этом принять допущение, что постоянные потери пропорциональны квадрату мощности.

Задача 3.5. Определить значение постоянной времени нагрева двигателя, если известно, что при работе в кратковременном режиме с продолжительностью рабочего периода 10 мин двигатель способен, нагре-

ваясь до максимально допустимой температуры, развить мощность P_{10} , а на протяжении 20 мин – P_{20} .

Известно, что при нагрузке мощностью P_{20} постоянные потери в двигателе равны переменным, переменные потери пропорциональны квадрату мощности, а $P_{10} = 1,6P_{20}$.

Задача 3.6. Для привода механизма с циклическим графиком статического момента нагрузки: $t_p = 1$ с, $M_c = 720$ Н·м, $t_0 = 4$ с (далее цикл повторяется) использован асинхронный двигатель с $P_n = 19$ кВт, $n_n = 950$ об/мин, $M_k/M_n = 2,0$. Определить минимальное значение момента инерции маховика, приведенного к валу двигателя, при котором выполняются условия допустимой перегрузки и нагрева двигателя.

При расчетах механическую характеристику считать прямолинейной (проходит через номинальную точку и точку синхронной скорости). Максимально допустимый момент нагрузки на двигателе $0,8M_n$.

Пояснение. Двигатель за время разгона t_p набирает скорость ω_1 , за время паузы t_0 эта скорость уменьшается (но не до 0). На протяжении следующего времени t_p скорость увеличивается, и далее цикл повторяется.

Задача 3.7. Имеются два асинхронных двигателя: с $P_n = 28$ кВт; $n_n = 975$ об/мин; $M_k/M_n = 2,5$ и $P_n = 18$ кВт; $n_n = 900$ об/мин; $M_k/M_n = 1,9$. Определить, какой из них следует использовать для привода механизма, работающего по циклическому графику статического момента задачи 3.6, если момент инерции, приведенный к валу двигателя, составляет $4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, а максимально допустимый момент в обоих случаях равен $0,8M_k$. Механическую характеристику двигателей считать прямолинейной по условию задачи 3.6. Моментами инерции двигателей пренебречь. Дополнительные пояснения из задачи 3.6.

Задача 3.8. Двигатель при работе в повторно-кратковременном режиме с относительной продолжительностью включения 25 % способен при номинальном нагреве развить мощность 12 кВт. Какую мощность он может развить при относительной ПВ = 60 %, если при нагрузке мощностью 12 кВт его постоянные потери составляют 30 % полных?

Дополнительные условия: теплоотдача при полной скорости и в неподвижном состоянии одинаковая; расчет провести а) с учетом постоянных потерь; б) по формуле эквивалентной мощности.

Задача 3.9. Проверить правильность выбора асинхронного двигателя, предназначенного для продолжительного режима работы, со следующими данными: $P_n = 20$ кВт; $U_n = 380$ В; $\omega_n = 151$ рад/с; $M_{\max} = 288$ Н·м; $M_n = 235$ Н·м; $\eta_n = 0,87$; $R_1 = 0,08$ Ом; $p = 2$; $f = 50$ Гц;

$R'_2 = 0,1$ Ом. Постоянная времени нагрева $T_n = 30$ мин; момент сопротивления на валу $M_c = 200$ Н·м; скорость $\omega = 150$ рад/с на протяжении 20 мин за период 6 часов.

Задача 3.10. Двигатель, рассчитанный для работы в повторно-кратковременном режиме с ПВ = 25 % и мощностью $P_{25} = 10$ кВт, имеет при такой нагрузке номинальные переменные потери, равные постоянным потерям, а теплоотдачу при неподвижном состоянии вдвое меньше, чем при полной скорости. Определить мощность, которую двигатель может развить, не перегреваясь выше нормы, при относительной ПВ = 60 %. Потери за время пуска не учитывать.

Задача 3.11. Выбрать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором для продолжительной работы в режиме $M_c = 0$ с механизмом, требующим работы в режиме кратковременной нагрузки $P_k = 37$ кВт на протяжении $t_k = 14$ мин. Постоянная времени нагрева $T_n = 50$ мин, коэффициент потерь $a = 0,5$. Данные двигателей:

а) $P_n = 20$ кВт; $n_n = 1450$ об/мин; $M_{\max}/M_n = 2,2$; $M_{\Pi}/M_n = 1,8$;

б) $P_n = 28$ кВт; $n_n = 1450$ об/мин; $M_{\max}/M_n = 2,2$; $M_{\Pi}/M_n = 1,8$.

Задача 3.12. Асинхронный двигатель имеет критический момент, равный 2,5 номинального, а постоянные потери равны номинальным переменным.

Считая, что переменные потери пропорциональны квадрату момента, определить максимально допустимое время работы двигателя в кратковременном режиме, если максимально допустимый момент его нагрузки составляет 0,8 критического, постоянная времени нагрева 25 мин, а пусковые потери можно считать незначительными.

Задача 3.13. Каким должно быть соотношение постоянных потерь к номинальным переменным потерям в двигателе, предназначенном для работы в повторно-кратковременном режиме с ПВ = 25 %, мощностью 10 кВт, для того чтобы он мог за ПВ = 100 % развить мощность 2,5 кВт?

3.2. Определение допустимой частоты включения двигателей

Основные положения и методические рекомендации

В электроприводах большинства производственных механизмов в связи с нуждами технологического процесса возникает необходимость в большой частоте включений двигателей (600...800 и больше на протяжении часа).

Допустимым числом включений в час считается такое, при котором среднее превышение температуры после большого количества ра-

бочих циклов будет равно допустимому, а двигатель полностью используется по условию нагрева.

Если принять по нагрузочной диаграмме время t_n, t_y, t_t, t_0 соответственно как время пуска, установившегося режима, торможения и паузы, то допустимая частота включений двигателя

$$h_{\text{доп}} = 3600 \frac{(\Delta P_n - \Delta P) \text{ПВ} + \Delta P_n \beta_0 (1 - \text{ПВ})}{\Delta A_n + \Delta A_t - (t_n + t_t) \left[\left((\Delta P + (1 + \beta_0) \Delta P_n) / 2 \right) - \Delta P_n \right]}. \quad (3.22)$$

Для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором уравнение (3.22) может быть упрощено при условии, что

$$\Delta A_n + \Delta A_t \gg (t_n + t_t) \left[\left((\Delta P + (1 + \beta_0) \Delta P_n) / 2 \right) - \Delta P_n \right];$$

$$\text{тогда } h_{\text{доп}} = 3600 (\Delta P_n - \Delta P) \text{ПВ} + \Delta P_n \beta_0 (1 - \text{ПВ}) / (\Delta A_n + \Delta A_t). \quad (3.23)$$

При условии работы АД в установившемся режиме с номинальной нагрузкой ($\Delta P = \Delta P_n$) выражение (3.22) упрощается и принимает вид

$$h_{\text{доп}} = 3600 \Delta P_n \beta_0 (1 - \text{ПВ}) / (\Delta A_n + \Delta A_t). \quad (3.24)$$

Для повторно-кратковременного режима работы АД допустимая частота включений определяется как

$$h_{\text{доп}} = 3600 \frac{(\Delta P_n - \Delta P) \text{ПВ} + \Delta P_n \beta_0 (1 - \text{ПВ})}{\Delta A_n - t_n \left[\left((\Delta P + (1 + \beta_0) \Delta P_n) / 2 \right) - \Delta P_n \right]}. \quad (3.25)$$

Пример 3.5

Вычислить допустимое число включений асинхронного короткозамкнутого двигателя ($P_n = 7,5$ кВт; $U_n = 380$ В; $n_n = 945$ об/мин; $M_{\text{max}} = 211$ Н·м; $J_d = 0,28$ кг·м²; $\eta = 0,83$) для приведенных в задаче 3.5 условий работы.

Дополнительные данные о двигателе: $R_1 / R'_2 = 1$; $2p = 6$; $\text{ПВ}_{\text{ст}} = 100\%$.
Торможение двигателя – электродинамическое.

Решение

Номинальные потери в двигателе

$$\Delta P_n = P_n \left((1 - \eta_n) / \eta_n \right) = 7500 \left((1 - 0,83) / 0,83 \right) = 1536 \text{ Вт}.$$

Номинальные потери, зависящие от нагрузки на валу двигателя (переменные потери),

$$\Delta P_{9н} = M_{н} \omega_0 s_{н} (1 + R_1 / R_2') = 75,7 \cdot 104,7 \cdot 0,055 (1 + 1) = 871 \text{ Вт},$$

где $\omega_0 = 2\pi f / p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 3 = 104 \text{ рад/с}$; $s_{н} = (\omega_0 - \omega_{н}) / \omega_0 = (104,7 - 98,9) / 104,7 = 0,055$; $\omega_{н} = \pi n_{н} / 30 = 3,14 \cdot 945 / 30 = 98,9 \text{ рад/с}$; $M_{н} = P_{н} / \omega_{н} = 7500 / 98,9 = 75,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Номинальные постоянные потери в двигателе (не зависят от нагрузки на валу)

$$\Delta P_{сн} = \Delta P_{н} - \Delta P_{9н} = 1536 - 871 = 665 \text{ Вт}.$$

Переменные потери в двигателе при моментах $M_{c1} = 75 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и $M_{c2} = 25 \text{ Н}\cdot\text{м}$ определяются соответственно:

$$\Delta P_{91} = M_{c1} \omega_0 s_1 (1 + R_1 / R_2') = 75 \cdot 104,7 \cdot 0,054 (1 + 1) = 855 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{91} = M_{c1} \omega_0 s_2 (1 + R_1 / R_2') = 25 \cdot 104,7 \cdot 0,018 (1 + 1) = 94 \text{ Вт},$$

где скольжения двигателя на линейной части механической характеристики при заданных моментах определяются соответственно:

$$s_1 = M_{c1} s_{н} / M_{н} = 75 \cdot 0,055 / 75,7 = 0,054;$$

$$s_2 = M_{c2} s_{н} / M_{н} = 25 \cdot 0,055 / 75,7 = 0,01.$$

Потери мощности в двигателе:

$$\Delta P_1 = \Delta P_{сн} + \Delta P_{91} = 665 + 855 = 1520 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{сн} + \Delta P_{92} = 665 + 94 = 759 \text{ Вт}.$$

Средние потери мощности в статическом режиме работы составят

$$\Delta P = (\Delta P_1 t_y + \Delta P_2 t_y) / 2 t_y = (1520 \cdot 20 + 759 \cdot 20) / 2 \cdot 20 = 1140 \text{ В}.$$

Потери энергии в двигателе при пуске с учетом соответствующих значений моментов сопротивления:

$$\begin{aligned} \Delta A_{п1} &= M_1 J_{\Sigma} \omega_0^2 (s_{нач}^2 - s_{кон1}^2) / 2 (M_1 - M_{c1}) = \\ &= 154 \cdot 1,08 \cdot 104,7^2 (1^2 - 0,054^2) / 2 \cdot (154 - 75) = 11539 \text{ Дж}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta A_{п2} &= M_3 J_{\Sigma} \omega_0^2 (s_{нач}^2 - s_{кон2}^2) / 2 (M_3 - M_{c2}) = \\ &= 104 \cdot 1,08 \cdot 104,7^2 (1^2 - 0,018^2) / 2 \cdot (104 - 25) = 7792 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Потери энергии в двигателе при динамическом торможении соответственно:

$$\begin{aligned}\Delta A_{\tau 1} &= M_2 J_{\Sigma} \omega_0^2 (s_{\text{нач}1}^2 - s_{\text{кон}}^2) / 2 (M_2 + M_{c1}) = \\ &= 4 \cdot 1,08 \cdot 104,7^2 (0,946^2 - 0^2) / 2 \cdot (4 + 75) = 299 \text{ Дж}; \\ \Delta A_{\tau 2} &= M_4 J_{\Sigma} \omega_0^2 (s_{\text{нач}2}^2 - s_{\text{кон}}^2) / 2 (M_4 + M_{c2}) = \\ &= 54 \cdot 1,08 \cdot 104,7^2 (0,982^2 - 0^2) / 2 \cdot (4 + 25) = 4046 \text{ Дж}.\end{aligned}$$

В приведенных выше формулах значения J_{Σ} и $M_1 \dots M_4$ взяты из примера 3.4; $s_{\text{нач}}$, $s_{\text{кон}}$ – скольжения двигателя соответственно в начале и конце рассматриваемого переходного процесса:

$$\begin{aligned}s_{\text{нач}1} &= 1 - s_1 = 1 - 0,054 = 0,946; \quad s_{\text{нач}2} = 1 - s_2 = 1 - 0,018 = 0,982; \\ s_{\text{кон}1} &= s_1 = 0,054; \quad s_{\text{кон}2} = s_2 = 0,018.\end{aligned}$$

Средние потери энергии в двигателе при пуске

$$\Delta A_{\text{п}} = (\Delta A_{\text{п}1} t_{\text{п}} + \Delta A_{\text{п}2} t_{\text{п}}) / 2 t_{\text{п}} = (11539 + 7792) \cdot 1,5 / 2 \cdot 1,5 = 9665,5 \text{ Дж};$$

при торможении

$$\Delta A_{\text{т}} = (\Delta A_{\text{т}1} t_{\text{т}} + \Delta A_{\text{т}2} t_{\text{т}}) / 2 t_{\text{т}} = (299 + 4046) \cdot 1,5 / 2 \cdot 1,5 = 2172,5 \text{ Дж}.$$

Допустимое число включений двигателя в час с $\text{ПВ}_{\text{ст}} = 1,0$ при $\text{ПВ} = 0,5$

$$\begin{aligned}h_{\text{доп}} &= 3600 \frac{(\Delta P_{\text{н}} - \Delta P) \text{ПВ} + \Delta P_{\text{н}} \beta_0 (1 - \text{ПВ})}{\Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{м}} - 2(t_{\text{п}} + t_{\text{м}}) [((\Delta P + (1 + \beta_0) \Delta P_{\text{н}}) / 2) - \Delta P_{\text{н}}]} = \\ &= 3600 \cdot \frac{(1536 - 1140) \cdot 0,5 + 1536 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,25)}{9665,5 + 2172,5 - 2 \cdot (1,5 + 1,5) [((1140 + (1 + 0,25)1536) / 2) - 1536]} = 206 \text{ вкл/ч}.\end{aligned}$$

Реальная частота включений двигателя определяется как

$$h = 3600 / (2(t_{\text{п}} + t_{\text{у}} + t_{\text{т}}) + t_0) = 3600 / (2 \cdot (1,5 + 20 + 1,5) + 45) = 39 \text{ вкл/ч}.$$

Так как $h_{\text{доп}} > h$, то рассматриваемый двигатель по условию нагрева выбран правильно.

Задача 3.14. Определить, с каким числом циклов в час может работать, не перегреваясь выше допустимой температуры, асинхронный

короткозамкнутый двигатель ($P_n = 4,5$ кВт; $n_0 = 1500$ об/мин; $s_n = 0,04$; $\eta = 0,855$; $\cos\varphi = 0,86$; $m_k = 2$; $J_d = 0,042$ кг·м²), если цикл работы включает в себя пуск двигателя со статическим моментом сопротивления 7,4 Н·м, установившаяся работа с $M_c = 28$ Н·м на протяжении 10 с, торможение противовключением со статическим моментом 3,2 Н·м. Момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя, составляет 0,015 кг·м².

Постоянные потери двигателя при номинальной нагрузке составляют 40 %, а переменные – 60 % от номинальных потерь. Коэффициент теплоотдачи при неподвижном роторе составляет 50 %, а при пуске и торможении – 75 % от коэффициента теплоотдачи при номинальной скорости. Сопротивление фазы статора больше приведенного сопротивления фазы ротора на 20 %.

Задача 3.15. Определить, на сколько возможно увеличить число циклов работы в час механизма из задачи 3.14, если вместо одного двигателя для привода механизма использовать два АД с короткозамкнутыми роторами той же общей мощности.

Каждый двигатель имеет следующие данные: $P_n = 2,25$ кВт; $n_0 = 1500$ об/мин; $s_n = 0,05$; $\eta = 0,84$; $\cos\varphi = 0,85$; $m_k = 2$; $J_d = 0,012$ кг·м²;

$R_1 = 1,2 R_2'$. Цикл работы и значения величин взять из задачи 3.14.

Задача 3.16. Асинхронный двигатель с самовентиляцией ($P_n = 13$ кВт; $n_n = 1400$ об/мин; $I_0 = 19$ А; $I_{1n} = 72$ А; $M_{\max} = 172,32$ Н·м; $p = 2$; $f = 50$ Гц; $\eta_n = 0,81$) работает с номинальным моментом нагрузки по графику скорости, который характеризуется временем пуска t_n , временем движения с установившейся скоростью t_y , временем торможения t_t и временем ожидания t_o . Суммарный приведенный момент инерции J . На участке торможения используется электродинамическое торможение двигателя. Коэффициент ухудшения теплоотдачи неподвижного двигателя $\beta_0 = 0,5$. Определить допустимую частоту включения двигателя для данных табл. 3.1.

Таблица 3.1

Номер варианта	$t_{\text{п}}$	t_{y}	t_{T}	t_{o}	J , кг·м ²
	с				
1	0,40	26	0,30	50	0,12
2	0,30	13	0,20	25	0,27
3	0,35	7	0,40	13	0,15
4	0,50	4	0,15	7	0,43
5	0,45	2	0,20	4	0,25

Продолж. табл. 3.1

Номер варианта	t_{Π}	t_{v}	t_{T}	t_{o}	J , кг·м ²
	с				
6	0,40	1	0,25	2	0,14
7	0,30	2	0,30	1	0,37
8	0,35	4	0,20	2	0,18
9	0,50	8	0,40	4	0,29
11	0,40	11	0,35	40	0,13
10	0,45	16	0,25	8	0,19
12	0,30	25	0,45	17	0,22
13	0,35	9	0,10	10	0,16
14	0,50	13	0,40	23	0,39
15	0,45	21	0,50	31	0,16
16	0,40	12	0,30	45	0,17
17	0,30	32	0,20	14	0,26
18	0,35	6	0,40	27	0,14
19	0,50	28	0,15	11	0,21
20	0,45	3	0,20	33	0,11
21	0,40	17	0,25	8	0,33
22	0,30	26	0,30	21	0,25
23	0,35	5	0,20	15	0,27
24	0,50	14	0,40	44	0,31
25	0,45	23	0,25	18	0,38

Приложение 1

Асинхронные двигатели серии 4А

Общие сведения

Асинхронные двигатели по сравнению с машинами постоянного тока обладают некоторыми преимуществами (конструктивно требуют меньшее количество цветных металлов, имеют лучшие энергетические показатели, проще при обслуживании, дешевле) и поэтому широко применяются в различных областях промышленности (около 90 % от всего парка машин, а по установленной мощности – 55 %).

Наиболее массовой серией АД является серия 4А, которая охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,06 до 400 кВт и выполнена на 17 высотах оси вращения – от 50 до 335 мм. Она включает в себя основное исполнение АД, ряд модификаций и специализированные исполнения.

Двигатели основного исполнения соответствуют общим требованиям, предназначены для нормальных условий работы (двигатели общего назначения). Они выпускаются во всем диапазоне мощностей и высот оси вращения, охватываемых сериями. Это – трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором, рассчитанные на частоту питания 50 Гц, имеющие степень защиты IP44 или IP23.

К электрическим модификациям АД серии 4А относятся АД с повышенным пусковым моментом, с повышенным номинальным скольжением, многоскоростные двигатели, с частотой питания 60 Гц.

В этой серии принята следующая система обозначений:

4А	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х
1	2	3	4	5	6	7	8

где 1 – название серии (4А); 2 – исполнение АД по способу защиты (буква Н – исполнение IP23, отсутствие буквы – исполнение IP44); 3 – исполнение АД по материалу станины и щитов (А – станина и щиты алюминиевые, Х – станина алюминиевая, щиты чугунные (или обратное сочетание материалов); отсутствие буквы – станина и щиты чугунные или стальные); 4 – высота оси вращения, мм (две или три цифры); 5 – установочный размер по длине станины (S – меньший, М – средний, L – больший); 6 – длина сердечника (А – меньшая, В – большая при условии сохранения установочного размера, отсутствие буквы означает, что при данном установочном размере (S, М или L) выполняется только одна длина сердечника); 7 – число полюсов АД (одна или две цифры); 8 – климатическое исполнение и категория размещения (У – для умеренного климата).

Основные технические данные наиболее часто используемых асинхронных короткозамкнутых двигателей серии 4А приведены в табл. П.1 – П.2, где параметры схемы замещения даны в относительных единицах, а именно:

$$R'_1 = \frac{r'_1}{Z_n}; \quad X'_1 = \frac{x_1}{Z_n}; \quad R'_2 = \frac{r'_2}{Z_n}; \quad X'_2 = \frac{x'_2}{Z_n},$$

где $Z_n = \frac{U_{1\phi}}{I_n}$.

Номинальный фазный ток I_n определяется как

$$I_n = \frac{P_n}{3U_n I_n \eta_n \cos \varphi_n}.$$

Величины активных сопротивлений асинхронных двигателей приведены при расчетной рабочей температуре.

**Основные технические данные
серии 4А; $U_n = 380 \text{ В}$;**

Таблица П.1

Типоразмер двигателя	P_n , кВт	I_n , А	η_n	$\cos\varphi_n$	i_n	s_n	s_k
						%	
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Синхронная частота</i>							
4AA50A2	0,09	0,32	0,60	0,70	3,5	8,6	50,0
4AA50B2	0,12	0,41	0,63	0,70	3,5	9,7	51,0
4AA56A2	0,18	0,54	0,66	0,76	4,0	8,0	46,0
4AA56B2	0,25	0,72	0,68	0,77	4,0	7,5	51,0
4AA63A2	0,37	0,93	0,70	0,86	4,5	8,3	50,5
4AA63B2	0,56	1,35	0,73	0,86	4,5	8,5	54,5
4A71A2	0,75	1,70	0,77	0,87	5,5	5,9	38,0
4A71B2	1,10	2,50	0,775	0,87	5,5	6,3	39,0
4A80A2	1,60	3,30	0,81	0,85	6,5	4,2	35,5
4A80B2	2,20	4,70	0,83	0,87	6,5	4,3	38,0
4A90L2	3,00	6,10	0,845	0,88	6,5	4,3	32,5
4A100S2	4,00	7,80	0,865	0,89	7,5	3,3	28,0
4A100L2	5,50	10,5	0,875	0,91	7,5	3,4	29,0
4A112M2	7,50	14,8	0,875	0,88	7,5	2,5	17,0
4A132M2	11,0	21,2	0,88	0,90	7,5	2,3	19,0
4A160S2	15,0	28,5	0,88	0,91	7,0	2,1	12,0
4A160M2	18,0	34,5	0,885	0,92	7,0	2,1	12,5
4A180S2	22,0	41,6	0,885	0,91	7,5	1,9	12,5
4A180M2	30,0	56,0	0,905	0,90	7,5	1,8	12,5
4A200M2	37,0	70,0	0,90	0,89	7,5	1,9	11,5
4A200L2	45,0	83,8	0,91	0,90	7,5	1,8	11,5
4A225M2	55,0	100,0	0,91	0,92	7,5	1,8	11,0
4A250S2	75,0	140,0	0,91	0,89	7,5	1,4	10,0
4A250M2	90,0	165,0	0,92	0,90	7,5	1,4	10,0
4A280S2	110,0	206,0	0,91	0,89	7,0	2,0	8,5
4A280M2	132,0	247,0	0,915	0,89	7,0	2,0	8,5
4A315S2	160,0	294,0	0,92	0,90	6,5	1,9	8,5
4A315M2	200,0	365,0	0,925	0,90	7,0	1,9	9,0
4A355S2	250,0	459,0	0,925	0,90	7,0	1,9	7,0
4A355M2	315,0	564,0	0,93	0,91	7,0	2,0	7,5

асинхронных двигателей
степень защиты IP44

m_{II}	m_M	m_K	X_μ	R'_1	X'_1	R'_2	X'_2	$J_{дв}$ кг·м ²
9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>вращения 3000 об/мин</i>								
2,0	1,8	2,2	2,5	0,15	0,092	0,14	0,16	0,000025
2,0	1,8	2,2	2,3	0,11	0,078	0,12	0,12	0,000028
2,0	1,5	2,2	2,0	0,17	0,052	0,094	0,067	0,00042
2,0	1,5	2,2	2,4	0,16	0,053	0,11	0,079	0,00047
2,0	1,5	2,2	2,5	0,14	0,052	0,096	0,08	0,00076
2,0	1,5	2,2	2,5	0,13	0,049	0,096	0,083	0,0009
2,0	1,5	2,2	2,6	0,12	0,052	0,064	0,077	0,00097
2,0	1,5	2,2	2,8	0,13	0,054	0,069	0,084	0,0011
2,1	1,4	2,6	2,5	0,084	0,051	0,019	0,081	0,0018
2,1	1,4	2,6	2,7	0,076	0,05	0,049	0,087	0,0021
2,1	1,6	2,5	3,4	0,072	0,057	0,047	0,1	0,0035
2,0	1,6	2,5	3,4	0,054	0,035	0,055	0,036	0,0059
2,0	1,6	2,5	3,8	0,05	0,054	0,036	0,11	0,0075
2,0	1,8	2,8	3,7	0,046	0,058	0,028	0,14	0,01
1,7	1,5	2,8	4,2	0,049	0,061	0,025	0,12	0,023
1,4	1,0	2,2	4,0	0,052	0,092	0,022	0,12	0,048
1,4	1,0	2,2	4,5	0,049	0,092	0,022	0,12	0,053
1,4	1,1	2,5	3,6	0,039	0,091	0,02	0,11	0,07
1,4	1,1	2,5	3,8	0,03	0,073	0,018	0,11	0,085
1,4	1,0	2,5	4,1	0,029	0,094	0,021	0,12	0,15
1,4	1,0	2,5	4,9	0,027	0,088	0,02	0,13	0,17
1,4	1,2	2,5	5,6	0,026	0,092	0,019	0,12	0,25
1,2	1,0	2,5	4,8	0,021	0,089	0,015	0,13	0,47
1,2	1,0	2,5	5,2	0,02	0,078	0,016	0,13	0,52
1,2	1,0	2,5	3,8	0,017	0,097	0,013	0,1	1,1
1,2	1,0	2,2	4,2	0,017	0,095	0,013	0,1	1,2
1,0	0,9	1,9	5,0	0,015	0,093	0,012	0,12	1,4
1,0	0,9	1,9	4,9	0,012	0,08	0,011	0,19	1,6
1,0	0,9	1,9	5,7	0,013	0,091	0,011	0,1	2,9
1,0	0,9	1,9	6,1	0,013	0,088	0,011	0,11	3,2

Продолж. табл. П.1

Типоразмер двигателя	P_n , кВт	I_n , А	η_n	$\cos\varphi_n$	i_n	s_n	s_k
						%	
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Синхронная частота</i>							
4AA50A4	0,06	0,3	0,5	0,6	2,5	8,1	58,5
4AA50B4	0,09	0,41	0,55	0,6	2,5	8,6	59,0
4AA56A4	0,12	0,44	0,63	0,66	3,5	8,2	49,0
4AA56B4	0,18	0,67	0,64	0,64	3,5	8,9	50,5
4AA63A4	0,25	0,86	0,68	0,65	4,0	8,0	48,0
4AA63B4	0,37	1,19	0,68	0,69	4,0	9,0	48,0
4A71A4	0,55	1,69	0,705	0,70	4,5	7,3	39,0
4A71B4	0,75	2,16	0,72	0,73	4,5	7,5	40,0
4A80A4	1,10	2,74	0,75	0,81	5,0	5,4	34,0
4A80B4	1,50	3,56	0,77	0,83	5,0	5,8	34,5
4A90L4	2,20	5,02	0,80	0,83	6,0	5,1	33,0
4A100S4	3,0	6,68	0,82	0,83	6,0	4,4	31,0
4A100L4	4,0	8,59	0,84	0,84	6,0	4,6	31,5
4A112M4	5,5	11,47	0,855	0,85	7,0	3,6	25,0
4A132S4	7,5	15,1	0,875	0,86	7,5	2,9	19,5
4A132M4	11,0	22,0	0,875	0,87	7,5	2,8	19,5
4A160S4	15,0	29,2	0,885	0,88	7,0	2,3	16,0
4A160M4	18,5	35,6	0,895	0,88	7,0	2,2	16,0
4A180S4	22,0	41,2	0,9	0,9	6,5	2,0	14,0
4A180M4	30,0	62,4	0,91	0,89	6,5	1,9	14,0
4A200M4	37,0	68,8	0,91	0,9	7,0	1,7	10,0
4A200L4	45,0	82,6	0,92	0,9	7,0	1,6	10,0
4A225M4	55,5	100,0	0,925	0,9	7,0	1,4	10,0
4A250S4	75,0	136,0	0,93	0,9	7,0	1,2	9,5
4A250M4	90,0	162,0	0,93	0,91	7,0	1,3	9,5
4A280S4	110,0	201,0	0,925	0,9	6,0	2,3	8,5
4A280M4	132,0	239,0	0,93	0,9	6,0	2,3	6,5
4A315S4	160,0	285,0	0,935	0,91	6,5	1,4	6,5
4A315M4	200,0	351,0	0,94	0,92	6,5	1,3	5,0
4A355S4	250,0	438,0	0,945	0,92	7,0	1,0	4,0
4A355M4	315,0	548,0	0,945	0,92	7,0	1,0	4,0

m_{Π}	m_M	m_K	X_{μ}	R'_1	X'_1	R'_2	X'_2	$J_{д\text{, кг}\cdot\text{м}^2}$
9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>вращения 1500 об/мин</i>								
2,0	1,7	2,2	1,2	0,16	0,17	0,22	0,17	0,000029
2,0	1,7	2,2	1,2	0,18	0,16	0,21	0,17	0,000033
2,1	1,5	2,2	1,2	0,18	0,087	0,15	0,15	0,0007
2,1	1,5	2,2	1,3	0,18	0,09	0,16	0,17	0,00079
2,0	1,5	2,2	1,4	0,15	0,082	0,14	0,17	0,0012
2,0	1,5	2,2	1,4	0,17	0,086	0,14	0,18	0,0014
2,0	1,8	2,2	1,6	0,18	0,086	0,11	0,2	0,0013
2,0	1,8	2,2	1,5	0,11	0,084	0,11	0,2	0,0014
2,0	1,6	2,2	1,7	0,12	0,078	0,068	0,12	0,0032
2,0	1,6	2,2	1,9	0,12	0,078	0,06	0,12	0,0033
2,1	1,6	2,4	2,1	0,098	0,076	0,06	0,13	0,0056
2,0	1,6	2,4	2,2	0,078	0,079	0,053	0,13	0,0087
2,0	1,6	2,4	2,4	0,067	0,079	0,053	0,14	0,011
2,0	1,6	2,2	2,8	0,064	0,078	0,041	0,13	0,017
2,2	1,7	3,0	3,0	0,048	0,085	0,033	0,13	0,028
2,2	1,7	3,0	3,2	0,043	0,085	0,032	0,13	0,04
1,4	1,0	2,3	4,0	0,047	0,086	0,025	0,13	0,1
1,4	1,0	2,3	4,3	0,042	0,085	0,024	0,13	0,13
1,4	1,0	2,3	4,0	0,041	0,08	0,021	0,12	0,19
1,4	1,0	2,3	3,9	0,034	0,068	0,018	0,12	0,23
1,4	1,0	2,5	4,4	0,039	0,086	0,018	0,14	0,37
1,4	1,0	2,5	4,6	0,034	0,082	0,017	0,14	0,45
1,3	1,0	2,5	4,2	0,027	0,086	0,015	0,14	0,64
1,2	1,0	2,3	4,4	0,025	0,089	0,014	0,11	1,0
1,2	1,0	2,3	5,0	0,024	0,093	0,014	0,12	1,2
1,2	1,0	2,0	4,9	0,023	0,122	0,019	0,16	2,3
1,3	1,0	2,0	4,5	0,021	0,115	0,018	0,15	2,5
1,3	0,9	2,2	4,6	0,018	0,107	0,017	0,15	3,1
1,3	0,9	2,2	4,1	0,014	0,086	0,014	0,12	3,6
1,2	0,9	2,0	4,6	0,013	0,09	0,013	0,13	6,0
1,2	0,9	2,0	5,7	0,012	0,099	0,014	0,14	7,0

Продолж. табл. П.1

Типоразмер двигателя	P_n , кВт	I_n , А	η_n	$\cos\varphi_n$	i_n	s_n	s_k
						%	
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Синхронная частота</i>							
4AA63A6	0,18	0,79	0,56	0,62	3,0	11,5	55,5
4AA63B6	0,25	1,04	0,59	0,62	3,0	10,8	62,5
4A71A6	0,37	1,26	0,645	0,69	4,0	9,2	49,0
4A71B6	0,55	1,74	0,675	0,71	4,0	10,0	49,0
4A80A6	0,75	2,23	0,69	0,74	4,0	8,4	37,0
4A80B6	1,1	3,04	0,74	0,74	4,0	8,0	38,0
4A90L6	1,5	4,1	0,75	0,74	4,5	6,4	31,0
4A100L6	2,2	5,64	0,81	0,73	5,0	5,1	25,5
4A112MA6	3,0	7,38	0,81	0,76	6,0	4,7	37,0
4A112MB6	4,0	9,12	0,82	0,81	6,0	5,1	38,0
4A132S6	5,5	12,25	0,85	0,8	6,0	3,3	36,0
4A132M6	7,5	16,41	0,855	0,81	6,0	3,2	26,0
4A160S6	11,1	22,53	0,86	0,86	6,0	2,7	15,0
4A160M6	15,0	29,86	0,875	0,87	6,0	2,6	14,0
4A180M6	18,0	36,61	0,88	0,87	6,0	2,4	13,5
4A200M6	22,0	41,15	0,9	0,9	6,5	2,3	13,5
4A200L6	30,0	55,81	0,905	0,9	6,5	2,1	13,5
4A225M6	37,0	69,22	0,91	0,89	6,5	1,8	11,5
4A250S6	46,0	85,59	0,915	0,89	6,5	1,4	9,0
4A250M6	55,0	103,0	0,915	0,89	6,5	1,3	9,5
4A280S6	75,0	139,0	0,92	0,89	7,0	2,0	8,3
4A280M6	90,0	165,0	0,925	0,89	7,0	1,8	8,3
4A315S6	110,0	199,0	0,93	0,9	7,0	1,8	8,2
4A315M6	132,0	239,0	0,935	0,9	7,0	1,7	8,2
4A355S6	160,0	291,1	0,935	0,9	7,0	1,4	6,5
4A355M6	200,0	362,0	0,94	0,9	7,0	1,3	6,4
<i>Синхронная частота</i>							
4A71B8	0,25	1,04	0,56	0,65	3,0	12,7	45,0
4A80A8	0,37	1,4	0,615	0,65	3,5	8,9	33,0
4A80B	0,55	2,0	0,64	0,65	3,5	9,0	34,0
4A90LA8	0,75	2,7	0,68	0,62	3,5	6,0	27,0
4A90LB8	1,1	3,5	0,7	0,68	3,5	7,0	27,0
4A100L8	1,5	4,73	0,74	0,65	4,0	7,0	27,0

m_{Π}	m_M	m_K	X_{μ}	R'_1	X'_1	R'_2	X'_2	$J_{д\gamma}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>вращения 1000 об/мин</i>								
2,2	1,5	2,2	1,3	0,24	0,15	0,22	0,18	0,0018
2,2	1,5	2,2	1,4	0,18	0,13	0,21	0,19	0,0022
2,0	1,8	2,2	1,3	0,17	0,12	0,15	0,16	0,0017
2,0	1,8	2,2	1,4	0,16	0,11	0,15	0,17	0,002
2,0	1,6	2,2	1,5	0,16	0,12	0,12	0,2	0,0031
2,0	1,6	2,2	1,6	0,12	0,11	0,11	0,19	0,0046
2,0	1,7	2,2	1,8	0,11	0,11	0,088	0,21	0,0073
2,0	1,6	2,2	1,9	0,09	0,11	0,067	0,21	0,013
2,0	1,8	2,5	1,9	0,085	0,074	0,063	0,1	0,017
2,0	1,8	2,5	2,0	0,077	0,073	0,062	0,11	0,021
2,0	1,8	2,5	1,9	0,067	0,072	0,041	0,11	0,04
2,0	1,8	2,5	2,1	0,06	0,07	0,04	0,11	0,058
1,2	1,0	2,0	3,0	0,073	0,11	0,03	0,15	0,14
1,2	1,0	2,0	3,0	0,062	0,1	0,028	0,16	0,18
1,2	1,0	2,0	2,9	0,056	0,11	0,026	0,13	0,22
1,3	1,0	2,4	4,1	0,05	0,11	0,024	0,14	0,4
1,3	1,0	2,4	3,7	0,046	0,12	0,022	0,13	0,45
1,2	1,0	2,3	3,7	0,042	0,1	0,019	0,13	0,74
1,2	1,0	2,1	3,8	0,037	0,09	0,015	0,14	1,2
1,2	1,0	2,1	3,4	0,034	0,083	0,014	0,13	1,3
1,2	1,0	2,2	3,7	0,032	0,12	0,021	0,13	2,9
1,2	1,0	2,2	3,5	0,03	0,11	0,019	0,12	3,4
1,0	0,9	2,2	3,9	0,026	0,1	0,018	0,12	4,0
1,4	0,9	2,2	3,5	0,023	0,099	0,018	0,12	4,5
1,4	0,9	2,2	3,8	0,02	0,1	0,015	0,14	7,3
1,4	0,9	2,2	3,6	0,018	0,091	0,014	0,13	8,8
<i>вращения 750 об/мин</i>								
1,6	1,4	1,7	1,2	0,22	0,18	0,23	0,28	0,0019
1,6	1,2	1,7	1,3	0,19	0,16	0,16	0,29	0,0034
1,6	1,2	1,7	1,3	0,17	0,16	0,15	0,29	0,0041
1,6	1,4	1,9	1,3	0,14	0,15	0,11	0,29	0,0067
1,6	1,4	1,9	1,4	0,13	0,15	0,11	0,3	0,0086
1,6	1,3	1,9	1,5	0,11	0,16	0,093	0,32	0,013

Продолж. табл. П.1

Типоразмер двигателя	P_n , кВт	I_n , А	η_n	$\cos\varphi_n$	i_n	s_n	s_k
						%	
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Синхронная частота</i>							
4A112MA8	2,2	6,14	0,765	0,71	5,0	6,0	23,0
4A112MB8	3,0	7,73	0,795	0,74	5,0	5,8	35,0
4A132S8	4,0	10,43	0,83	0,7	5,5	6,1	36,0
4A132M8	5,5	13,57	0,83	0,74	5,5	4,1	25,0
4A160S8	7,5	17,61	0,86	0,75	6,0	2,5	14,5
4A160M8	11,0	25,54	0,87	0,75	6,0	2,5	15,0
4A180M8	15,0	31,86	0,87	0,82	5,5	2,6	13,0
4A200M8	18,0	37,7	0,885	0,84	5,5	2,3	13,0
4A200L8	22,0	44,84	0,885	0,84	5,5	2,7	13,0
4A225M8	30,0	62,0	0,905	0,81	6,0	1,8	11,5
4A250S8	37,0	75,05	0,9	0,83	6,0	1,6	9,0
4A250M8	45,0	89,2	0,91	0,84	6,0	1,4	9,0
4A280S8	55,0	108,0	0,92	0,84	5,5	2,2	8,0
4A280M8	75,0	145,0	0,925	0,85	5,5	2,2	8,5
4A315S8	90,0	173,0	0,93	0,85	6,5	1,5	7,0
4A315M8	110,0	211,0	0,93	0,85	6,5	1,5	7,5
4A355S8	132,0	252,0	0,935	0,85	6,5	1,3	5,5
4A355M8	160,0	305,0	0,935	0,85	6,5	1,3	5,5
<i>Синхронная частота</i>							
4A250S10	30,0	63,77	0,88	0,81	6,0	1,9	10,5
4A280S10	37,0	78,98	0,91	0,78	6,0	1,7	8,5
4A280M10	45,0	95,53	0,915	0,78	6,0	1,7	7,5
4A315S10	55,0	115,0	0,92	0,79	6,0	1,8	10,0
4A315M10	75,0	154,0	0,92	0,8	6,0	1,6	8,5
4A355S10	90,0	179,0	0,925	0,83	6,0	1,6	5,5
4A355M10	110,0	215,0	0,935	0,83	6,0	1,6	6,5
<i>Синхронная частота</i>							
4A315S10	45,0	99,9	0,91	0,75	6,0	2,5	10,5
4A315M12	55,0	121,0	0,915	0,75	6,0	2,3	10,0
4A355S12	75,0	163,0	0,915	0,76	6,0	1,5	6,5
4A355M12	90,0	195,0	0,92	0,76	6,0	1,3	6,0

m_{Π}	m_M	m_K	X_{μ}	R'_1	X'_1	R'_2	X'_2	$J_{д}, \text{ кг} \cdot \text{ м}^2$
9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>вращения 750 об/мин</i>								
1,9	1,5	2,2	1,5	0,093	0,11	0,083	0,17	0,017
1,9	1,5	2,2	1,6	0,08	0,11	0,083	0,17	0,025
1,9	1,7	2,6	1,6	0,068	0,1	0,058	0,17	0,042
1,9	1,7	2,6	1,8	0,07	0,11	0,061	0,19	0,057
1,4	1,0	2,2	2,0	0,075	0,14	0,032	0,18	0,14
1,4	1,0	2,2	2,0	0,066	0,13	0,031	0,18	0,18
1,2	1,0	2,0	2,4	0,064	0,13	0,03	0,17	0,25
1,2	1,1	2,2	2,6	0,057	0,13	0,026	0,16	0,4
1,2	1,1	2,0	3,1	0,062	0,14	0,029	0,18	0,45
1,3	1,2	2,1	2,3	0,045	0,12	0,022	0,17	0,74
1,2	1,0	2,0	2,8	0,047	0,11	0,017	0,18	1,2
1,2	1,0	2,0	2,6	0,037	0,099	0,016	0,17	1,4
1,2	1,0	2,0	2,5	0,035	0,12	0,022	0,14	3,2
1,2	1,0	2,0	2,6	0,028	0,12	0,021	0,13	4,1
1,2	0,9	2,3	2,6	0,023	0,11	0,019	0,13	4,9
1,2	0,9	2,3	2,4	0,023	0,1	0,019	0,12	5,8
1,2	0,9	2,2	2,9	0,023	0,12	0,017	0,16	9,0
1,2	0,9	2,2	3,0	0,02	0,12	0,017	0,16	10,0
<i>вращения 600 об/мин</i>								
1,2	1,0	1,9	2,3	0,056	0,11	0,023	0,17	1,4
1,0	1,0	1,8	2,0	0,031	0,11	0,027	0,15	3,6
1,0	1,0	1,8	2,2	0,037	0,12	0,031	0,16	3,8
1,0	0,9	1,8	2,0	0,028	0,1	0,026	0,14	5,2
1,0	0,9	1,8	2,2	0,029	0,11	0,027	0,15	6,2
1,0	0,9	1,8	3,1	0,028	0,12	0,021	0,16	9,3
1,0	0,9	1,8	3,0	0,024	0,11	0,021	0,16	11,0
<i>вращения 500 об/мин</i>								
1,0	0,9	1,8	2,1	0,037	0,14	0,033	0,19	5,3
1,0	0,9	1,8	2,0	0,033	0,13	0,032	0,19	6,2
1,0	0,9	1,8	1,9	0,026	0,12	0,021	0,17	9,3
1,0	0,9	1,8	1,8	0,024	0,11	0,02	0,16	10,0

**Основные технические данные
серии 4А; $U_n = 380$ В;**

Таблица П.2

Типоразмер двигателя	$P_{\text{н}}$, кВт	$2p$	$s_{\text{н}}$	$s_{\text{к}}$	$\eta_{\text{н}}$	$\cos\varphi_{\text{н}}$
			%			
1	2	3	4	5	6	7
Синхронная частота						
4AA56A4/2	0,1	4	6,7	35,5	45,0	0,61
	0,14	2	10,7	60,0	50,0	0,7
4AA56B4/2	0,12	4	7,1	36,0	49,0	0,62
	0,18	2	12,1	58,0	57,0	0,72
4AA63A4/2	0,19	4	7,3	36,0	55,0	0,66
	0,27	2	12,3	60,0	61,0	0,75
4AA63B4/2	0,22	4	7,0	36,0	57,0	0,7
	0,37	2	14,9	61,0	61,0	0,88
4A71A4/2	0,45	4	6,2	34,0	64,0	0,73
	0,75	2	11,0	64,0	67,0	0,89
4A71B4/2	0,63	4	6,5	34,0	67,0	0,75
	0,95	2	11,3	64,5	69,0	0,89
4A80A4/2	1,1	4	4,3	36,0	73,0	0,79
	1,5	2	6,2	42,0	72,0	0,89
4A90LA4/2	1,5	4	6,1	39,5	76,0	0,81
	2,0	2	7,6	40,5	74,0	0,86
4A90LB4/2	2,0	4	3,8	29,5	77,0	0,86
	2,5	2	5,1	44,5	77,0	0,89
4A100S4/2	2,65	4	3,8	28,0	80,0	0,82
	3,4	2	5,0	41,0	77,0	0,91
4A100L4/2	3,2	4	3,7	28,0	82,0	0,82
	4,2	2	4,5	40,5	80,0	0,92
4A112M4/2	4,2	4	3,1	19,5	82,0	0,84
	5,0	2	3,1	29,0	77,0	0,89
4A132S4/2	6,0	4	2,9	17,0	84,0	0,87
	6,7	2	2,8	24,0	78,0	0,9
4A132M4/2	8,5	4	2,9	16,5	86,0	0,88
	9,5	2	2,6	24,5	81,0	0,9
4A160S4/2	11,0	4	2,1	13,0	85,0	0,85
	14,0	2	2,7	16,5	83,0	0,92
4A160M4/2	14,0	4	2,1	12,5	87,0	0,87
	17,0	2	2,4	16,0	84,0	0,92

двухскоростных электродвигателей
схема переключений Δ/Y

i_{Π}	m_{Π}	m_K	R'_1	X'_1	R''_2	X''_2	$J_{\text{д}}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$
8	9	10	11	12	13	14	15
<i>вращения 1500/3000 об/мин</i>							
3,5	1,8	2,2	0,56	0,32	0,3	0,3	0,0007
4,0	1,5	2,2	0,26	0,1	0,2	0,12	
3,5	1,6	2,2	0,53	0,29	0,28	0,3	0,0008
4,0	1,2	2,2	0,24	0,094	0,18	0,12	
3,5	1,6	2,2	0,43	0,24	0,24	0,3	0,0012
4,0	1,2	2,2	0,089	0,17	0,12	0,12	
3,5	1,5	1,9	0,37	0,2	0,22	0,28	0,0013
4,0	1,1	1,8	0,19	0,089	0,16	0,12	
4,0	1,5	1,8	0,27	0,18	0,17	0,26	0,0014
4,0	1,2	1,8	0,13	0,083	0,12	0,11	
4,5	1,3	1,9	0,25	0,18	0,16	0,26	0,0016
4,5	1,3	1,9	0,13	0,084	0,12	0,11	
5,0	1,7	2,0	0,22	0,12	0,11	0,14	0,0033
4,0	1,5	1,8	0,12	0,067	0,072	0,073	
5,5	1,7	2,1	0,2	0,13	0,13	0,17	0,0035
5,0	1,7	1,9	0,11	0,074	0,088	0,086	
6,0	1,7	2,2	0,17	0,12	0,08	0,16	0,0063
6,0	1,8	2,1	0,09	0,066	0,06	0,069	
6,0	1,8	2,2	0,15	0,14	0,083	0,19	0,0092
6,0	1,8	2,2	0,076	0,078	0,059	0,082	
7,0	1,8	2,2	0,13	0,14	0,079	0,2	0,012
7,0	1,8	2,2	0,065	0,07	0,051	0,082	
7,5	1,3	1,8	0,14	0,14	0,061	0,021	0,017
7,5	1,1	1,8	0,072	0,071	0,037	0,074	
7,5	1,3	1,8	0,11	0,17	0,054	0,21	0,028
7,5	1,1	1,8	0,054	0,08	0,033	0,082	
7,5	1,3	1,8	0,1	0,17	0,054	0,23	0,04
7,5	1,1	1,8	0,051	0,076	0,03	0,077	
7,5	1,5	2,1	0,12	0,18	0,041	0,22	0,11
7,5	1,2	2,0	0,06	0,1	0,029	0,11	
7,5	1,5	2,1	0,11	0,17	0,04	0,24	0,14
7,5	1,2	2,0	0,054	0,092	0,026	0,11	

Продолж. табл. П.2

Типоразмер двигателя	P_n , кВт	$2p$	s_n	s_k	η_n	$\cos\varphi_n$
			%			
1	2	3	4	5	6	7
Синхронная частота						
4A180S4/2	18,0	4	1,9	10,5	88,5	0,9
	21,0	2	2,2	13,5	85,0	0,93
4A180M4/2	22,0	4	1,8	11,0	90,0	0,9
	26,5	2	2,0	14,0	86,0	0,93
4A200L4/2	33,5	4	1,5	7,5	91,0	0,87
	37,0	2	1,6	11,0	87,0	0,89
4A225M4/2	42,5	4	1,2	6,5	92,0	0,85
	45,0	2	1,2	9,0	86,0	0,87
4A250S4/2	50,0	4	1,2	7,0	93,0	0,86
	60,0	2	1,4	8,5	87,0	0,89
4A250M4/2	60,0	4	1,3	7,0	93,0	0,87
	71,0	2	1,4	8,5	88,0	0,9
Синхронная частота						
4A90L8/4	0,63	8	4,0	19,5	73,0	0,72
	1,0	4	4,7	26,5	75,0	0,85
4A100S8/4	1,0	8	4,3	17,0	68,0	0,61
	1,7	4	4,9	23,0	80,0	0,87
4A100L8/4	1,4	8	5,3	17,0	69,0	0,62
	2,4	4	5,2	22,0	81,0	0,89
4A112MA8/4	1,9	8	4,7	25,5	72,0	0,71
	3,0	4	4,5	32,5	75,0	0,89
4A112MB8/4	2,2	8	3,9	25,5	75,0	0,69
	3,6	4	3,9	32,0	77,0	0,88
4A132S8/4	3,2	8	3,8	18,5	77,0	0,71
	5,3	4	3,7	23,5	80,0	0,9
4A132M8/4	4,2	8	1,8	18,5	80,0	0,72
	7,1	4	2,2	24,0	82,0	0,9
4A160S8/4	6,0	8	2,3	10,5	76,5	0,69
	9,0	4	2,5	15,0	84,0	0,92
4A160M8/4	9,0	8	2,5	10,0	79,0	0,69
	13,0	4	2,6	14,0	86,5	0,91
4A180M8/4	13,0	8	2,2	10,0	84,6	0,76
	18,0	4	2,2	11,5	87,5	0,92
4A200M8/4	17,0	8	2,4	9,5	86,0	0,75
	25,0	4	2,1	11,0	87,0	0,91

$i_{\text{п}}$	$m_{\text{п}}$	$m_{\text{к}}$	R_1'	X_1'	R_2''	X_2''	$J_{\text{д}}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$
8	9	10	11	12	13	14	15
вращения 1500/3000 об/мин							
6,5	1,3	1,8	0,091	0,17	0,035	0,2	0,21
6,5	1,1	1,8	0,46	0,999	0,023	0,099	
7,5	1,3	1,8	0,078	0,16	0,033	0,2	0,26
7,0	1,1	1,8	0,041	0,091	0,027	0,098	
7,0	1,8	2,0	0,067	0,16	0,029	0,28	0,59
7,5	1,8	2,2	0,032	0,083	0,018	0,12	
7,0	1,8	2,0	0,54	0,15	0,023	0,28	0,85
7,5	1,8	2,2	0,026	0,078	0,014	0,123	
6,5	1,8	2,0	0,041	0,15	0,022	0,23	1,3
7,0	1,6	2,2	0,023	0,091	0,016	0,12	
6,5	1,8	2,0	0,44	0,16	0,024	0,26	1,5
7,0	1,6	2,2	0,023	0,089	0,015	0,12	
вращения 750/1500 об/мин							
7,5	1,3	1,8	0,25	0,28	0,15	0,52	0,006
7,5	1,3	1,8	0,12	0,096	0,063	0,16	
5,0	1,2	1,8	0,24	0,26	0,13	0,47	0,012
6,0	1,4	1,9	0,11	0,092	0,51	0,15	
5,0	1,2	1,8	0,23	0,27	0,14	0,5	0,015
6,0	1,2	1,8	0,1	0,093	0,01	0,15	
7,5	1,2	1,8	0,21	0,23	0,14	0,29	0,018
7,5	1,0	1,8	0,1	0,085	0,06	0,092	
7,5	1,2	1,8	0,18	0,2	0,13	0,27	0,024
7,5	1,0	1,8	0,092	0,077	0,053	0,088	
7,5	1,2	1,8	0,18	0,21	0,098	0,3	0,043
7,5	1,0	1,8	0,089	0,081	0,042	0,1	
7,5	1,2	1,8	0,15	0,19	0,093	0,29	0,058
7,5	1,0	1,8	0,077	0,075	0,039	0,096	
5,5	1,5	2,0	0,097	0,15	0,036	0,23	0,15
7,0	1,2	2,0	0,062	0,078	0,024	0,12	
5,5	1,5	2,0	0,15	0,25	0,059	0,4	0,2
7,0	1,2	2,0	0,064	0,086	0,026	0,14	
5,5	1,2	1,8	0,13	0,25	0,055	0,37	0,28
6,5	1,0	1,8	0,064	0,11	0,026	0,14	
5,0	1,3	1,8	0,11	0,24	0,049	0,36	0,52
6,0	1,4	2,0	0,06	0,1	0,023	0,13	

Продолж. табл. П.2

Типоразмер двигателя	P_n , кВт	$2p$	s_n , %	s_k , %	η_n	$\cos\varphi_n$
1	2	3	4	5	6	7
<i>Синхронная частота</i>						
4A200L8/4	20,0	8	1,4	9,5	87,0	0,77
	28,0	4	1,5	11,0	88,0	0,91
4A225M8/4	22,4	8	1,4	8,5	87,0	0,69
	33,5	4	1,5	10,0	87,0	0,88
4A250S8/4	30,0	8	1,5	7,0	89,5	0,75
	45,0	4	1,5	8,0	88,5	0,9
4A250M8/4	37,0	8	1,4	7,0	89,5	0,75
	35,0	4	1,4	8,0	89,5	0,9
<i>Синхронная частота</i>						
4A180M12/6	6,7	12	4,6	11,0	76,0	0,66
	11,0	6	3,0	11,0	84,5	0,89
4A200M12/6	9,0	12	2,3	10,5	77,5	0,55
	14,0	6	1,8	10,5	88,0	0,86
4A200L12/6	10,0	12	2,3	10,5	80,0	0,56
	17,0	6	1,9	10,5	88,5	0,86
4A225M12/6	12,5	12	1,9	9,0	81,5	0,57
	22,0	6	1,7	9,0	88,0	0,86
4A250S12/6	16,0	12	1,3	8,5	83,0	0,53
	28,0	6	1,3	8,0	90,0	0,85
4A250M12/6	18,5	12	1,3	8,5	83,5	0,54
	35,5	6	1,4	8,0	89,5	0,85

i_{Π}	m_{Π}	m_{κ}	R_1'	X_1'	R_2''	X_2''	$J_{\text{д}}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$
8	9	10	11	12	13	14	15
вращения 750/1500 об/мин							
5,0	1,4	1,8	0,11	0,25	0,05	0,38	0,58
6,0	1,4	2,0	0,057	0,1	0,022	0,13	
6,0	2,0	2,2	0,082	0,19	0,035	0,32	0,93
7,0	1,5	2,2	0,042	0,085	0,017	0,11	
5,0	1,6	1,8	0,082	0,17	0,031	0,4	1,7
6,0	1,4	1,9	0,045	0,089	0,016	0,16	
6,0	1,8	1,8	0,08	0,16	0,03	0,39	1,8
6,5	1,5	2,0	0,043	0,081	0,015	0,15	
вращения 500/1000 об/мин							
4,5	1,6	1,9	0,18	0,4	0,11	0,59	0,28
6,5	1,3	1,9	0,068	0,1	0,027	0,13	
4,0	1,5	1,8	0,14	0,34	0,079	0,63	0,52
6,5	1,5	2,0	0,052	0,085	0,02	0,14	
4,0	1,5	1,8	0,13	0,32	0,074	0,6	0,58
6,5	1,5	2,0	0,056	0,089	0,021	0,15	
4,0	1,4	1,8	0,11	0,29	0,059	0,57	0,93
6,0	1,3	1,8	0,051	0,094	0,019	0,16	
4,0	1,7	1,8	0,093	0,28	0,047	0,45	1,7
6,0	1,5	1,8	0,041	0,089	0,014	0,12	
4,0	1,7	1,8	0,095	0,27	0,046	0,45	1,8
6,0	1,5	1,8	0,047	0,095	0,015	0,14	

Список рекомендованной литературы

1. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / *А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф* и др. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
2. *Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н.* Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов. – 2-е изд., стер. – М.: Изд. центр "Академия", 2004. – 576 с.
3. *Кобозев В.А.* Основы энергосбережения в асинхронном электроприводе. – Ставрополь, 1999. – 106 с.
4. *Москаленко В.В.* Электрический привод: Учеб. пособие. – 2-е изд., стер. – М.: Изд. центр "Академия", 2004. – 368 с.
5. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общ. ред. *И.П. Копылова* и *Б.К. Клокова*. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
6. *Сыромятников М.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
7. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: Практ. пособие: В 5 кн. / Под ред. *В.А. Веникова*. – Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе / *Н.Ф. Ильинский, Ю.В. Розанковский, А.О. Горнов*. – М.: Высшая школа, 1989. – 127 с.
8. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Под ред. *И.Я. Браславского*. – М.: Изд. центр "Академия", 2004. – 256 с.

Содержание

Обозначения основных величин и единицы их измерения	3
Раздел 1. Электромеханические особенности двигателей переменного тока в электроприводе	6
Раздел 2. Потери мощности и энергии в асинхронном электроприводе	19
2.1. Потери мощности и энергии в установившемся режиме работы электропривода	19
2.2. Потери мощности и энергии в переходных режимах электропривода	28
Раздел 3. Пути снижения энергопотребления при использовании асинхронных двигателей	35
3.1. Выбор установленной мощности и типа двигателя	35
3.2. Определение допустимой частоты включения двигателей ..	49
Приложения	54
Список рекомендованной литературы	70

Учебное издание

ВОЛЯНСКАЯ Яна Богдановна
ВОЛЯНСКИЙ Сергей Михайлович

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям
по курсу "ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ"

В двух частях
Часть 1
(на русском языке)

Компьютерная верстка *О.Н. Череватая*
Корректор *М.А. Паненко*

Свідोцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

Подписано к печати 22.11.07. Бумага офсетная. Формат 60×84/16.
Печать офсетная. Гарнитура "Таймс". Усл. печ. л. 4,2. Уч.-изд. л. 4,5.
Тираж 100 прим. Изд. № 38. Зак. № 367. Цена договорная.

Издатель и изготовитель Национальный университет кораблестроения,
54002, г. Николаев, ул. Скороходова, 5